

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

**INTEGRAÇÃO ENTRE ATIVIDADES COMPUTACIONAIS E
EXPERIMENTAIS COMO RECURSO INSTRUCIONAL NO
ENSINO DE ELETROMAGNETISMO EM FÍSICA GERAL***

PEDRO FERNANDO TEIXEIRA DORNELES

**PORTO ALEGRE
2010**

* Trabalho parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

**INTEGRAÇÃO ENTRE ATIVIDADES COMPUTACIONAIS E
EXPERIMENTAIS COMO RECURSO INSTRUCIONAL NO
ENSINO DE ELETROMAGNETISMO EM FÍSICA GERAL**

PEDRO FERNANDO TEIXEIRA DORNELES

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciências, Curso de Pós-Graduação em Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientadora: Profª. Dra. Eliane Angela Veit
Co-orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Moreira

*À minha família e amigos.
Em especial aos meus pais Antonio Pedro Dorneles e Clair Teixeira Dorneles, pelo
empenho em propiciar uma educação formal de qualidade aos seus filhos e pelo
exemplo de vida.
À minha eterna namorada Fabiana Silva, que com ela formamos uma família unida e
batalhadora e a mais nova fonte de inspiração, minha filha Fernanda da Silva
Dorneles.*

AGRADECIMENTOS

- A professora Eliane Angela Veit, pela dedicada e incansável orientação e pelo incentivo constante na minha carreira profissional.
- Ao professor Marco Antonio Moreira, pelo incentivo e os ensinamentos, os quais foram imprescindíveis para realização deste trabalho. E também pela oportunidade de ser seu orientando.
- Ao professor Ives Solano Araujo, pela colaboração em vários trabalhos, sempre contribuindo com inúmeras sugestões frutíferas e com críticas pertinentes.
- Aos professores Maria Helena Steffani e Henri Ivanov Boudinov, pelo convívio e aprendizado durante a realização do terceiro estudo.
- Aos alunos que participaram dos nossos procedimentos didáticos, pela ótima relação que tivemos ao longo dos estudos.
- Aos colegas em geral da UNIPAMPA/Campus Bagé, em particular à Direção e aos professores e alunos do Curso de Física, pelo ótimo ambiente de trabalho, o que contribuiu significativamente para a conclusão deste projeto.
- Ao Grupo de Pesquisa em Ensino de Física e em especial a Rafael Brandão, Neusa Massoni e Leonardo Albuquerque Heidemann, pelas inúmeras sugestões frutíferas e amizade.
- À minha irmã Fabiane Dorneles, pelo apoio em minhas iniciativas.
- A todos meus amigos, pelo apoio.
- Aos professores, funcionários e colegas do IF-UFRGS, em particular aos funcionários Waldomiro Olivo e Vera Oliveira, pelos ensinamentos e amizade.
- A todos que, diretamente ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para que eu pudesse realizar esta tese.

Muito Obrigado



SUMÁRIO

RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	27
2.1 DIFICULDADES DE APRENDIZAGEM EM ELETROMAGNETISMO....	27
2.2 FATORES POSITIVOS E NEGATIVOS ASSOCIADOS A ATIVIDADES EXPERIMENTAIS.....	50
2.3 FATORES POSITIVOS E NEGATIVOS ASSOCIADOS A ATIVIDADES COMPUTACIONAIS.....	53
2.4 INTEGRAÇÃO ENTRE ATIVIDADES COMPUTACIONAIS E EXPERIMENTAIS NO ENSINO DE ELETROMAGNETISMO.....	58
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	75
3.1 A TEORIA DE APRENDIZAGEM DE DAVID AUSUBEL.....	75
3.1.1 Aprendizagem Significativa.....	76
3.1.2 Diferenciação Progressiva e Reconciliação Integrativa.....	78
3.1.3 Condições para Ocorrência da Aprendizagem Significativa.....	79
3.1.4 Evidências da Aprendizagem Significativa.....	81
3.2 A TEORIA SÓCIO-INTERACIONISTA DE VIGOTSKI.....	83
3.2.1 Imitação.....	83
3.2.2 Interação social.....	84
3.2.3 Zona de Desenvolvimento Proximal.....	85
3.3 MODELAGEM ESQUEMÁTICA.....	87
3.4 VISÃO EPISTEMOLÓGICA DE MARIO BUNGE SOBRE MODELOS TEÓRICOS.....	89
4 FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA.....	95

4.1 METODOLOGIA QUANTITATIVA.....	95
4.2 METODOLOGIA QUALITATIVA.....	97
4.3 METODOLOGIA DIDÁTICA.....	99
5 SÍNTESE DO PRIMEIRO ESTUDO.....	111
5.1 OBJETO DE ESTUDO.....	111
5.2 METODOLOGIA.....	112
5.3 RESULTADOS.....	115
5.4 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES.....	116
6 SÍNTESE DO SEGUNDO ESTUDO.....	119
6.1 OBJETO DE ESTUDO.....	119
6.2 METODOLOGIA.....	120
6.3 RESULTADOS.....	124
6.4 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES.....	132
7 SÍNTESE DO TERCEIRO ESTUDO.....	135
7.1 OBJETO DE ESTUDO.....	136
7.2 METODOLOGIA.....	137
7.3 RESULTADOS.....	145
7.4 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES.....	148
8 SÍNTESE DO QUARTO ESTUDO.....	151
8.1 OBJETO DE ESTUDO.....	151
8.2 METODOLOGIA.....	151
8.3 RESULTADOS.....	173
8.4 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES.....	197

9 CONCLUSÕES.....	201
REFERÊNCIAS.....	207
APÊNDICES	
APÊNDICE A.....	223
APÊNDICE B.....	233
APÊNDICE C.....	235
APÊNDICE D.....	237
APÊNDICE E.....	243
APÊNDICE F.....	245
APÊNDICE G.....	259
APÊNDICE H.....	265
APÊNDICE I.....	277
APÊNDICE J.....	279
APÊNDICE K.....	281
ANEXOS	
ANEXO A.....	283
ANEXO B.....	323
ANEXO C.....	339
ANEXO D.....	343
ANEXO E.....	345
ANEXO F.....	357

RESUMO

Na literatura encontram-se inúmeros relatos sobre fatores negativos associados ao ensino de laboratório didático e ao uso do computador em sala de aula. Tendo isso em vista, buscamos integrar atividades computacionais com experimentais, visando a minimização dos fatores negativos de ambas atividades. Para investigar essa integração concebemos, implementamos e avaliamos uma proposta didática baseada nas teorias de aprendizagem de Ausubel e Vigotski e a visão epistemológica de Bunge sobre modelos teóricos. Tal proposta leva em conta que há diferentes maneiras de integrar experiência e recursos computacionais e que a eficácia desses recursos não depende apenas das suas características inerentes, mas, especialmente, das estratégias didáticas. Em um primeiro estudo, realizado a partir de uma metodologia predominantemente quantitativa, avaliou-se o desempenho de alunos que trabalharam com atividades de simulação e modelagem computacionais no estudo de circuitos elétricos, utilizando o *software Modellus*, comparado com o de alunos que tiveram apenas o sistema tradicional de ensino. Os resultados quantitativos mostram que houve melhorias estatisticamente significativas no desempenho dos alunos do grupo experimental, quando comparado aos alunos do grupo de controle (método tradicional de ensino). Na sequência, desenvolvemos dois estudos, adotando uma metodologia qualitativa do tipo estudo de casos exploratório com o propósito de levantar proposições norteadoras para embasarem um quarto estudo, em que investigamos formas de integração entre atividades computacionais e experimentais de modo a torná-las complementares, auxiliando os alunos a atingirem uma aprendizagem significativa de conceitos de Física e compreenderem algumas ideias sobre modelos científicos. Os resultados, do quarto estudo, mostram que a integração entre esses dois tipos de atividades pode proporcionar aos alunos uma visão epistemológica mais adequada sobre os papéis dos modelos teóricos, do laboratório e do computador, e promover a interatividade e o engajamento dos alunos em seu próprio aprendizado, transformando a sala de aula em um ambiente propício para uma aprendizagem significativa. Supomos que a adaptação e implementação de nossa proposta didática no ensino de Eletromagnetismo em nível de Física Geral possa contribuir para os alunos atingirem uma visão mais adequada sobre a natureza da Ciência e uma melhor aprendizagem conceitual. Apontamos como perspectiva futura a implementação e avaliação em outros conteúdos de Física, com melhorias no que diz respeito a incertezas experimentais e às noções de ordens de grandezas.

ABSTRACT

In the literature there are numerous reports of negative factors associated with the teaching of laboratory and the use of computers in the classroom. With this in mind, we sought to integrate experimental activities with computational ones in order to minimize the negative factors of both kinds of activities. To investigate this integration we designed, implemented and evaluated a didactical approach based on Ausubel's meaningful learning theory, Vigostki's social-interaction theory and Bunge's epistemological view about scientific models and science development. This approach took into account that there are different ways to integrate experiments and computational resources, and the effectiveness of these resources does not depend only on their inherent characteristics, but especially on the teaching strategies. In a first study, from a predominantly quantitative research methodology, we evaluated the performance of students that worked with simulation and modeling computational activities in the study of electric circuits, using the software Modellus, compared to students submitted only to the traditional system of education. The quantitative results show that there was a statistically significant improvement in the experimental group students' performance when compared to the control group, submitted only to the traditional teaching method. Following, we developed two exploratory case studies, adopting a qualitative research methodology to generate guiding propositions for future studies. In a fourth study, we investigated ways to integrate computational and experimental activities to make them complementary, helping students to achieve a meaningful learning of physics concepts and understand some ideas about scientific models. The results show that the integration between these two kinds of activities can provide for the students a more appropriate epistemological perspective of the roles of i) theoretical models in physics and ii) experimental and computational activities in the learning processes. encouraging the interactivity and engagement of the students with their own learning and transforming the classrooms in an environment suitable for a meaningful learning. We assume that the adaptation and implementation of our didactical approach in teaching electromagnetism, at the level of Introductory College Physics, can help students to achieve a more adequate view of the nature of science and a better conceptual learning. We point out as future prospects the implementation and evaluation of this approach to physics teaching in other areas of physics, with improvements in respect to experimental uncertainties and the notions of orders of magnitude.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Considero que minha trajetória no ensino de Física teve início em 2000, quando ainda cursava o terceiro semestre do curso de graduação em Licenciatura em Física pela Universidade Federal de Pelotas – UFPel, e comecei a participar como voluntário do projeto *Desafio pré-vestibular* (vinculado à Pró-Reitoria de Extensão), destinado a preparar alunos de baixa renda para o vestibular. No *Desafio* ministrei aulas de Física de 2000 a 2002; no ano de 2001 fui um dos coordenadores administrativos do curso.

No primeiro ano ministrei poucas aulas; minha maior participação foi, nos horários reservados para atendimento da disciplina de Física, resolvendo dúvidas dos alunos. O retorno que recebia dos alunos durante estes encontros motivou-me a encarar um desafio maior, o de ministrar um número significativo de aulas. No ano seguinte, assumi o conteúdo programático do vestibular da UFPel sobre Dinâmica e Ondas. Lembro-me que foi uma experiência muito interessante; os alunos participavam das aulas, consultavam-me sobre dúvidas quando me encontravam nos corredores e sempre que marcava aulas de reforço aos sábados a sala de aula ficava lotada. Isso motivava-me muito, dando-me certeza de que havia optado pela profissão certa.

No entanto, em 2001 concorri a uma bolsa de monitoria de Física Geral e Experimental III e IV, para a qual fui selecionado e ao desenvolver as atividades de

monitoria deparei-me com inúmeras dificuldades minhas, principalmente relacionadas aos conteúdos de Física. Apesar de estar no quinto semestre da graduação, naquele momento percebi que no ano anterior havia dedicado maior atenção ao cursinho pré-vestibular do que ao meu próprio curso. A Física que eu julgava saber era uma Física de apostilas de cursinhos e de livros de Ensino Médio, fortemente alicerçada em formalismos matemáticos e não em aspectos qualitativos capazes de favorecer um aprendizado conceitual. Hoje tenho consciência que eu aprendera mecanicamente, mas à época, sem maiores conhecimentos de teorias de aprendizagem, passei por um período de angústia. Por um lado sentia-me um jovem com 21 anos de idade pronto para ministrar aulas para cursinhos e para o Ensino Médio, mas por outro lado sentia-me um universitário que, apesar de ter sido sempre avaliado com boas notas e nunca ter sido reprovado, frequentemente deparava-se com dificuldades de aprendizagem e assim percebia que ainda precisava percorrer um longo caminho de formação. Confesso que naquele momento não me era claro que esse caminho, na verdade, é interminável e o percorremos com avanços e retrocessos.

Em 2002 aconteceram dois fatores fundamentais para que eu passasse a priorizar minha formação acadêmica. O primeiro foi que no início do semestre recebi um convite para ministrar aulas em um dos principais cursinhos particulares de Pelotas, na época, e por motivos financeiros o aceitei. Essa experiência colocou-me diante de uma realidade que eu ainda não tinha vivenciado. Encontrei nos alunos pouquíssimo interesse em aprender. O que eles mais queriam era aula estilo *show*, em que o professor conta piadas, canta música para ensiná-los a decorar fórmulas, etc. A

direção do cursinho tinha como objetivo um ensino de qualidade, mas frente à concorrência de mercado e precisando um número mínimo de alunos para não comprometer sua situação financeira, cobrava dos professores a motivação dos alunos, o que eu só conseguia com aulas engraçadas, pois através do conteúdo pouquíssimos alunos mostravam interesse. Isso deixou-me bastante insatisfeito, a ponto de pedir demissão na metade do ano. Outro fator que muito influenciou a minha carreira foi o apoio e incentivo de professores da graduação, (em especial dos Profs. Drs. Dimiter Hadjimichief, Eduardo Fontes Henriques e Victor Paulo Barros Gonçalves), no sentido que eu me dedicasse mais aos estudos e viesse a ingressar no Programa de Pós-Graduação na Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

Em 2003, ano em que terminei minha graduação, concorri a uma vaga para o curso de Mestrado no Instituto de Física da UFRGS, sendo selecionado. Inicialmente dediquei-me integralmente às disciplinas obrigatórias e no primeiro semestre de 2004, já convicto de que queria fazer pesquisa na área de Ensino de Física procurei os professores Dra. Eliane Angela Veit e Dr. Marco Antonio Moreira que me aceitaram como aluno.

Minha primeira disciplina de formação no Ensino de Física foi *Bases Teóricas e Metodológicas para o Ensino Superior*, ministrada pelos meus orientadores. Essa disciplina me fez perceber que as aulas que eu ministrara até então, além de serem fortemente ancoradas no formalismo matemático, continham demasiados elementos do ensino comportamentalista. Muitas vezes, nos cursinhos, eu buscava treinar os alunos

a resolverem questões simples, que não requeriam nenhuma competência especial; não me preocupava muito em avaliar como os alunos aprendiam, se é que aprendiam. Essa disciplina representou um marco em minha vida profissional. A partir dela consegui captar que utilizando teorias de aprendizagens e metodologias didáticas eu poderia aproveitar, por exemplo, o retorno positivo dos alunos que eu recebia no cursinho *Desafio* para propiciar-lhes aulas com mais conteúdo de Física, principalmente sob o ponto de vista conceitual e de contextualização, e conceber algum mecanismo de avaliação para buscar indícios de como e o quê os alunos assimilavam nas aulas.

Nos dias de hoje, em decorrência do aprendizado que obtive durante o Mestrado e Doutorado, considero-me com competência para propiciar um processo de ensino/aprendizagem capaz de contribuir mais efetivamente na formação de alunos de uma população semelhante à do curso pré-vestibular *Desafio*, ou seja, pessoas que não têm condições de pagarem um curso pré-vestibular convencional, mas que tendo a oportunidade de estudarem apresentam muita motivação e alguma dedicação. Também em relação ao cursinho pré-vestibular pago eu teria maior sucesso, porém por um motivo bastante distinto: tendo consciência hoje que o ensino que aí se quer é eminentemente comportamentalista, essa seria a corrente filosófica que eu seguiria, agora ancorado pela minha aprendizagem sobre as teorias comportamentalistas. Mas isso já é uma digressão do tema dessa tese, que está voltado para a aprendizagem significativa em nível universitário. Não pretendo voltar a atuar em cursinhos pré-vestibulares.

Um dos temas que me despertou interesse desde o primeiro contato com os professores e colegas de pós-graduação do Grupo de Ensino de Física da UFRGS foi a discussão e investigação do uso de tecnologias computacionais em sala de aula, de modo a atingir situações de ensino que vão além das tradicionais aulas expositivas. Por exemplo, usar representações dinâmicas de sistemas reais, como a simulação computacional do movimento de um pêndulo físico para pequenas e grandes amplitudes, levando-me a perceber que o uso de tecnologias poderia contribuir também para minhas futuras práticas de ensino serem mais focadas em aspectos qualitativos.

No Mestrado, integrei-me à linha de pesquisa que investiga o uso de tecnologias computacionais como recurso instrucional à aprendizagem de Física. Um dos objetivos dessa linha de pesquisa é apresentar propostas de atividades computacionais que, levando em conta as dificuldades de aprendizagem apresentadas pelos alunos em áreas específicas da Física, possam auxiliá-los a superá-las. Tais propostas abarcam tanto o conteúdo específico, abordado no material instrucional, quanto a metodologia de trabalho, de modo a propiciar condições favoráveis à aprendizagem significativa (Ausubel, 2003). Em outras palavras, a ideia é conceber propostas didáticas que favoreçam a interação de forma substantiva entre as ideias prévias dos alunos e os significados dos conceitos físicos envolvidos nas atividades.

O primeiro trabalho realizado no âmbito dessa linha de pesquisa foi o de Araujo (2002), que teve como foco a interpretação de gráficos da cinemática por parte de

calouros de cursos da área das exatas (Física e Engenharia). Araujo concebeu e desenvolveu uma série de atividades nas quais os alunos interagiam intensamente com os recursos computacionais, com os colegas e o professor. O desempenho dos alunos do grupo experimental, que desenvolveu essas atividades, foi superior ao dos alunos expostos somente ao método tradicional de ensino. (Informações mais específicas sobre esse estudo serão apresentadas na revisão da literatura.)

Um outro trabalho desta linha de pesquisa Araujo (2005) teve como foco a aprendizagem das Leis de Maxwell do Eletromagnetismo, particularmente das Leis de Gauss e Ampère. Atividades computacionais foram concebidas, levando em conta as dificuldades de aprendizagem relatadas na literatura, e aplicadas a um grupo de alunos. Os resultados sugerem que as atividades computacionais motivaram os alunos para aprender e facilitaram a visualização de conceitos abstratos, mostrando-se potencialmente facilitadoras de aprendizagem significativa em Física.

O terceiro estudo no âmbito dessa linha foi o meu trabalho de Mestrado (Dorneles, 2005), voltado para a aprendizagem de circuitos elétricos simples e do tipo RLC de corrente contínua¹. Concebemos uma série de atividades de simulação e modelagem computacionais com o propósito de auxiliar os alunos a superar as dificuldades de aprendizagem desses tipos de circuitos elétricos apontadas na literatura. As atividades concebidas foram implementadas em uma experiência didática com alunos de cursos de Engenharia (grupo experimental), que apresentaram um

¹ Designamos genericamente como circuitos RLC, circuitos do tipo RC, RL, LC e RLC.

desempenho (frente a situações problemáticas sobre circuitos elétricos simples e RLC) estatisticamente superior ao de um grupo de controle, que não desenvolveu atividades computacionais. Resultados de uma análise qualitativa nos levaram a concluir que as atividades haviam auxiliado os alunos no sentido de atingirem uma aprendizagem significativa, porém possivelmente melhores resultados poderiam ser atingidos se houvesse alguma integração entre as atividades computacionais (AC) e experimentais (AE).

Essa é a origem da presente tese de doutorado, cujo objetivo é investigar a integração entre AC e AE no ensino de Eletromagnetismo em nível de Física Geral. Como essa investigação tem como ponto de partida os resultados obtidos no mestrado, consideramos apropriado incluí-los sucintamente nesta tese, o que é feito no capítulo 5. Na sequência apresentamos os três estudos posteriores (denominados de segundo, terceiro e quarto estudo), nos quais concebemos, implementamos e avaliamos a integração entre AC e AE.

No segundo estudo, apresentado no Capítulo 6, realizamos uma investigação exploratória sobre as potencialidades do uso de AE em conjunto com AC no estudo de circuitos elétricos simples e RLC, de corrente contínua e alternada. A dinâmica de integração no ensino de circuitos simples consistiu em disponibilizar simultaneamente os materiais experimentais e os recursos computacionais durante o desenvolvimento das atividades. No ensino de circuitos do tipo RLC e de corrente alternada inicialmente os alunos trabalharam somente com atividades computacionais e ao final foram

desafiados a encontrarem experimentalmente algum parâmetro do circuito elétrico, Por exemplo, a constante de tempo capacitiva de um circuito RC e a frequência de ressonância de um circuito RLC de corrente alternada.

No terceiro estudo (Capítulo 7) nos concentramos nos circuitos RC e RLC em série com um gerador de corrente alternada e investigamos alternativas para a integração, através de diferentes combinações de AC e AE, buscando identificar situações em que as atividades se complementem de modo a propiciarem melhores condições para uma aprendizagem significativa.

No quarto e último estudo (Capítulo 8) passamos a trabalhar com todo o curso de Eletromagnetismo em nível da Física Geral e as AC e AE foram trabalhadas de distintos modos. Em algumas aulas os alunos trabalharam somente com o computador, em outras somente com os materiais experimentais e nas demais com atividades integradas. Na dinâmica de integração proposta os alunos trabalharam inicialmente somente com AC e na sequência desenvolveram AE, sendo auxiliados por uma simulação computacional sobre o experimento envolvido. Nesse estudo além de buscar auxiliar os alunos a superarem suas dificuldades de aprendizagem, proporcionando-os melhores condições para aprendizagem significativa, também tivemos como objetivo proporcionar aos alunos uma concepção de modelos teóricos, na acepção de Bunge (1974), com objetivo de criar um vínculo efetivo entre teoria e realidade para preencher a lacuna entre as aulas teóricas e o ensino de laboratório,

relatada na literatura (Ronen e Eliahu, 2000; Gil-Pérez et al., 1999) e corroborada em nossos estudos anteriores.

No próximo capítulo, faremos a revisão da literatura sobre as dificuldades de aprendizagem dos alunos em Eletromagnetismo, sobre os fatores positivos e negativos associados a atividades computacionais e experimentais e sobre a integração entre atividades computacionais e experimentais. Nos demais serão, sucessivamente, enfocados a fundamentação teórica e metodológica que embasa esta pesquisa, o detalhamento dos estudos realizados e as conclusões desta tese.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Revisamos a literatura em busca de publicações que identificam as principais dificuldades de aprendizagem dos alunos em Eletromagnetismo, no período de 1985 a 2009. Também buscamos trabalhos que discutem fatores positivos e negativos associados a atividades computacionais e experimentais no ensino de Física em nível superior e de estudos sobre a integração entre essas atividades no ensino de Eletromagnetismo, no período de 1994 a 2009. Incluímos nessa revisão treze periódicos especializados em Ensino de Física, a saber: *American Journal of Physics*, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*², *Ciência e Educação*, *Computer and Education*, *Enseñanza de las Ciencias*, *Investigações em Ensino de Ciências*, *International Journal of Science Education*, *Journal of Computer Assisted Learning*, *Journal of Research in Science Teaching*, *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*³ e *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*. Além disso, foi também utilizado o sistema ERIC (Education Resources Information Center) e a base de dados WEBOFSCIENCE disponíveis na internet.

2.1 DIFICULDADES DE APRENDIZAGEM EM ELETROMAGNETISMO

² Intitulado Caderno Catarinense de Ensino de Física até 2001.

³ Intitulada Revista de Ensino de Física até 1991.

Revisamos a literatura, no que tange a dificuldades de aprendizagem dos alunos, em busca, inicialmente de trabalhos sobre o ensino de circuitos elétricos, pois esse foi o tópico de ensino dos três primeiros estudos realizados no âmbito desta tese. Como no último estudo (quarto) passamos a trabalhar com todo o conteúdo de Eletromagnetismo buscamos, também, estudos sobre as equações de Maxwell, especificamente sobre as leis de Gauss e Ampère.

Dificuldades de aprendizagem em circuitos elétricos

A Eletricidade é uma das áreas da Física que possuem mais estudos referentes a dificuldades de aprendizagem. Esses estudos incluem dificuldades conceituais, concepções alternativas, uso indiscriminado da linguagem e raciocínios errôneos que os alunos costumam apresentar no estudo de circuitos elétricos. Em nossa revisão da literatura realizada durante o Mestrado (Dorneles, 2005), encontramos 50 publicações sobre circuitos elétricos simples e do tipo RLC, no período de 1985 a 2005. Na atualização até a presente data localizamos mais quatro publicações, de modo que o número total é de 54 publicações. Dessas, 48 referem-se ao ensino de circuitos simples e apenas seis ao ensino de circuitos RLC.

Dentre as 48 relativas a circuitos simples de corrente contínua, destacamos três: Duit e Von Rhöneck (2010), que em 1998 dedicaram um capítulo de um livro⁴ para

⁴ *Learning and understanding key concepts of electricity*. In: Connecting Research in Physics Education with Teacher Education, *An I.C.P.E. Book* © International Commission on Physics Education 1997, 1998.

uma ampla revisão da literatura referente às dificuldades de aprendizagem dos alunos; McDermott e Shaffer (1992), que desenvolveram um exaustivo estudo de identificação de dificuldades⁵ e Engelbart e Beichner (2004), que desenvolveram um teste com 29 questões para detectar e interpretar conceitos sobre circuitos resistivos de corrente contínua (DIRECT – Determining and Interpreting Resistive Electric Circuit Concepts Test), testado com centenas⁶ de alunos de nível médio e universitário nos Estados Unidos e Canadá, cuja aplicação reproduziu dificuldades relatadas na literatura.

Esses três estudos nortearam as atividades que concebemos em nosso trabalho e passamos a detalhar seus principais resultados referentes às dificuldades conceituais e concepções alternativas relacionadas aos conceitos de corrente elétrica, diferença de potencial e resistência elétrica. Na sequência apresentamos os principais raciocínios errôneos que os alunos costumam empregar no estudo de circuitos simples e em seguida, uma síntese das dificuldades identificadas ou mencionadas por outros autores.

As principais concepções alternativas e uma síntese das dificuldades de natureza específicas relacionadas aos conceitos de corrente elétrica, diferença de potencial e resistência elétrica, apontadas por Duit e Von Rhöneck (2010), McDermott e Shaffer (1992) e Engelbart e Beichner (2004) são apresentadas na Tabela 1.

⁵ Esses autores fazem parte do grupo de Ensino de Física da Universidade de Washington, o qual tem se dedicado a identificar dificuldades dos alunos em vários domínios da Física e as consideram no planejamento de estratégias instrutivas.

⁶ A primeira versão do teste foi aplicada a 1135 alunos e a segunda a 695.

Tabela 1 – Síntese das dificuldades conceituais e concepções alternativas identificadas na terceira coluna por [1] Duit e Von Rhöneck (2010), [2] McDermott e Shaffer (1992) e [3] Engelhardt e Beichner (2004).

Conceitos	Dificuldades conceituais	Concepções alternativas: Os estudantes...
1. Corrente elétrica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Compreender que a intensidade da corrente elétrica em um circuito depende das características da fonte, mas também da resistência equivalente do que foi acoplado entre os seus terminais. 2. Considerar a conservação da corrente elétrica. 3. Reconhecer que a intensidade da corrente elétrica não depende da ordem em que se encontram os elementos no circuito e nem do sentido da corrente. 	<ol style="list-style-type: none"> a) ... pensam que a corrente se desgasta ao passar por uma resistência elétrica [1- 3]. b) ... pensam que a bateria é uma fonte de corrente elétrica constante [1- 3]. c) ... acreditam que a ordem dos elementos no circuito e o sentido da corrente elétrica são relevantes [1- 3]. d) ... pressupõem que a fonte fornece os portadores de carga responsáveis pela corrente elétrica no circuito [3].
2. Diferença de potencial	<ol style="list-style-type: none"> 1. Diferenciar os conceitos: diferença de potencial e corrente elétrica. 2. Diferenciar os conceitos de diferença de potencial e de potencial elétrico. 3. Reconhecer que uma bateria ideal mantém uma diferença de potencial constante entre seus terminais. 4. Calcular a diferença de potencial entre pares de pontos ao longo do circuito. 	<ol style="list-style-type: none"> e) ... pensam que a bateria é uma fonte de corrente elétrica constante e não como uma fonte de diferença de potencial constante [1- 3]. f) ... percebem a diferença de potencial como uma propriedade da corrente elétrica [3]. g) ... consideram que as diferenças de potencial entre pares de pontos ao longo do circuito permanecem constantes [1]. h) ... associam o brilho de uma lâmpada com o valor do potencial em um dos terminais da lâmpada [2].
3. Resistência elétrica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Distinguir resistência equivalente de uma parte do circuito e a resistência elétrica de um elemento individual. 2. Perceber que a resistência equivalente é uma abstração útil para obter a corrente total ou a diferença de potencial em uma parte do circuito. 3. Compreender que as divisões de correntes elétrica em um ponto de junção do circuito dependem da configuração do circuito. 4. Entender a associação em série de resistores como um impedimento à passagem de corrente; e a associação em paralelo como um caminho alternativo, para a passagem de corrente. 5. Identificar associações em série e em paralelo. 	<ol style="list-style-type: none"> i) ... frequentemente pensam na resistência equivalente no circuito como se fosse uma propriedade de um elemento individual do circuito [1]. j) ... ao determinar como se divide a corrente elétrica em ramos paralelos de um circuito, consideram somente o número de ramos e não as resistências elétricas relativas dos vários ramos [1- 3]. k) ... pensam que se um resistor reduz a corrente por x, dois resistores vão reduzi-la por $2x$, independentemente do arranjo dos resistores [3]. l) ... consideram que resistores alinhados em série estão associados em série quer haja uma junção ou não entre eles e que resistores alinhados geometricamente em paralelo estão associados em paralelo mesmo se há uma bateria no ramo [3].

A seguir, serão exemplificadas as principais dificuldades conceituais contidas na Tabela 1, ilustrando com questões típicas aplicadas aos alunos para identificar tais dificuldades e concepções alternativas sobre os conceitos físicos envolvidos em circuitos elétricos simples.

Dificuldades relacionadas ao conceito de corrente elétrica

Muitos alunos não compreendem que a intensidade da corrente elétrica em um circuito depende não somente das características da fonte, mas também da resistência equivalente do que foi acoplado entre os terminais da fonte (dificuldade 1.1 da Tabela 1). Uma questão típica para identificar esse tipo de dificuldade é apresentada por McDermott e Shaffer (1992): solicitados a ordenar o brilho das lâmpadas⁷ presentes nos circuitos 1, 2 e 3 mostrados na Figura 1, somente 10% a 15% dos alunos fornecem a resposta correta: $L_1 = L_5 = L_4 > L_2 = L_3$. Muitos alunos predizem que L_2 brilha mais do que L_3 no Circuito 2 da Figura 1, ou seja, acreditam que a corrente elétrica é consumida no circuito (dificuldade 1.2). Outros tantos acreditam que a ordem dos elementos é relevante (dificuldade 1.3). Por exemplo, há aluno que pensa que as lâmpadas L_1 , L_2 , L_4 e L_5 têm um mesmo brilho, “porque a corrente está livre para passar por elas sem ter de passar por nenhuma outra lâmpada antes”. Esse aluno, claramente pensa que as intensidades de L_2 e L_3 não são as mesmas. A concepção de que uma bateria é uma fonte constante de corrente elétrica transparece quando os alunos, ignorando o papel da resistência equivalente sobre a corrente no circuito

⁷ Em todas as questões apresentadas neste trabalho admite-se que: as lâmpadas são iguais, os brilhos das lâmpadas crescem quando a intensidade da corrente elétrica aumenta, as baterias são ideais e os fios elétricos possuem resistência elétrica desprezível.

dizem, em relação aos circuitos da Figura 1, afirmativas do tipo: “ L_1 , L_2 e L_3 têm o mesmo brilho, que é maior do que o de L_4 e L_5 , que são iguais entre si. A mesma corrente elétrica i que passa em L_1 se divide no Circuito 3 entre as lâmpadas L_4 e L_5 ”.

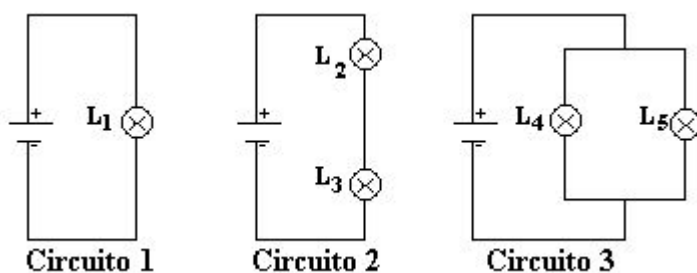


Figura1 – Teste típico para verificar se os alunos possuem concepções alternativas sobre corrente elétrica e diferença de potencial (McDermott e Shaffer, 1992).

Dificuldades relacionadas ao conceito de diferença de potencial

Muitos alunos não compreendem bem os conceitos de potencial elétrico, diferença de potencial e corrente elétrica (dificuldades 2.1 e 2.2). Por exemplo, em relação à confusão entre potencial e diferença de potencial, mais da metade dos alunos não foi capaz de ordenar corretamente o brilho das lâmpadas da Figura 2, quando o interruptor está fechado, nem responder corretamente o que aconteceria com o brilho da lâmpada L_1 se o interruptor fosse aberto (McDermott e Shaffer, 1992). Pode-se chegar à resposta correta $L_1 = L_4 > L_2$ e L_3 observando que a corrente elétrica que passa pelas lâmpadas L_1 e L_4 é a mesma e maior do que a que passa por L_2 e L_3 ; ou pode-se raciocinar que a diferença de potencial entre os bornes de L_1 e de L_4 é maior do que a estabelecida entre os bornes de L_2 e de L_3 .

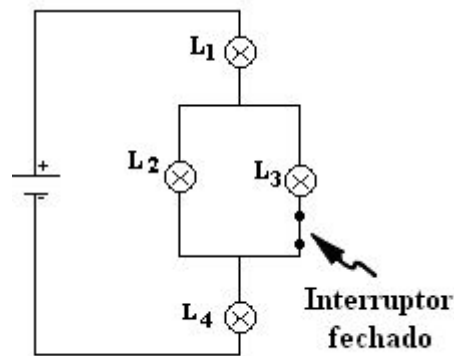


Figura 2 – Teste típico para verificar se os alunos possuem concepções alternativas sobre corrente elétrica e diferença de potencial (McDermott e Shaffer, 1992).

Dificuldades com o conceito de diferença de potencial fazem com que os alunos considerem uma bateria como uma fonte de corrente elétrica constante e não como uma fonte de diferença de potencial constante, conforme já abordado no item anterior (dificuldade 2.3).

A falta de clareza quanto à diferença de potencial, conforme salientam McDermott e Shaffer (1992), também faz com que os alunos tenham grandes dificuldades em diferenciar entre:

- uma associação em paralelo conectada diretamente a uma bateria ideal (Circuito 3 da Figura 1), de modo que a alteração em um dos ramos não afeta o outro, pois a bateria estabelece uma mesma diferença de potencial entre as junções destes ramos

e

- uma associação do tipo da Figura 2, em que os ramos paralelos não se conectam diretamente à bateria, e a alteração em um dos ramos afeta o outro. Isso é equivalente ao que ocorre quando se tem uma associação em paralelo conectada a uma bateria real.

Em torno de 40% dos alunos que foram questionados por Duit e Von Rhöneck (2010) sobre o comportamento da diferença de potencial entre todos os pares de pontos da Figura 3 (dificuldade 2.4) concluíram que em todos os casos seria de 6 V. Também não foram capazes de diferenciar os conceitos diferença de potencial e corrente elétrica (dificuldade 2.1) nesta situação.

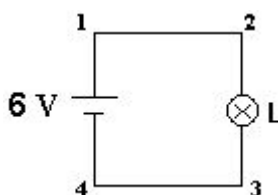


Figura 3 – Representação de um circuito elétrico com uma lâmpada submetida a uma diferença de potencial fixa, para verificar a compreensão sobre o comportamento da diferença de potencial ao longo do circuito (Duit & Von Rhöneck, 2010).

Dificuldades relacionadas com conceito de resistência elétrica

Alguns alunos pensam na resistência equivalente de uma parte do circuito como se fosse uma propriedade de um elemento individual (dificuldade 3.1), não percebendo a resistência equivalente como uma abstração útil para obter a corrente total ou a diferença de potencial em uma parte do circuito (dificuldade 3.2). Muitos não são capazes de chegar a uma solução qualitativa correta, embora resolvam com sucesso problemas complicados usando a lei de Ohm e leis de Kirchhoff. Um exemplo típico em que isso ocorre é nos exercícios sobre brilhos de lâmpadas, como o da Figura 4. Segundo McDermott e Shaffer (1992), muitos alunos não assimilam os conceitos básicos de eletricidade de um modo coerente e não têm condições de elaborar um raciocínio físico, precisando necessariamente se valer de fórmulas ou da intuição, ou ambos.

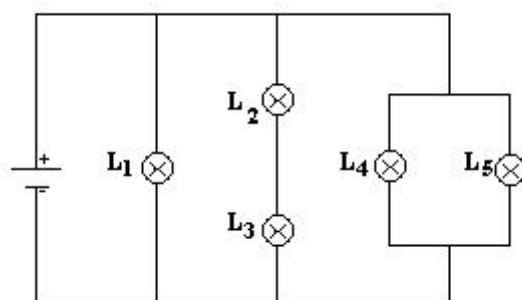


Figura 4 – Teste típico para verificar se os alunos são capazes de classificar as intensidades dos brilhos das lâmpadas em uma associação mista McDermott e Shaffer (1992).

Muitos alunos apresentam dificuldade para compreender que as divisões de correntes elétricas em um ponto de junção do circuito dependem do que existe em todo o circuito (dificuldade 3.3). Por exemplo, se a resistência elétrica do resistor R_1 , mostrado na Figura 5, for aumentada, apenas 20% dos alunos são capazes de responder que i_1 decrescerá e i_2 permanecerá constante (Duit e Von Rhöneck, 2010).

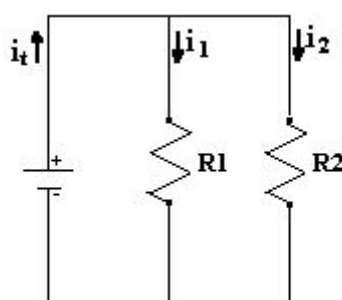


Figura 5 – Teste típico para verificar se os alunos compreendem a divisão de corrente elétrica em uma associação de resistências (Duit e Von Rhöneck, 2010).

Concepções alternativas

É bem sabido e divulgado que as concepções alternativas dos alunos influenciam fortemente na aprendizagem. Menos divulgado é o fato de que estas

concepções podem influenciar inclusive o que os alunos vêem. Conforme relatam Schlichting *apud* Duit e Von Rhöneck (2010), é como se os alunos não vissem o que efetivamente devem ver, mas o que as suas concepções lhes permitem ver. Por exemplo, dado o experimento esquematizado na Figura 6 e questionados sobre em que parte o fio fino incandesceria caso o circuito fosse fechado, os alunos fizeram três diferentes predições: *a)* primeiro na esquerda (ou direita) dependendo da suposição feita sobre o sentido da corrente e considerando que incandesceria o lado pelo qual a corrente “entra no fio”; *b)* no meio, já que haveria dois tipos de corrente – uma que entra pela esquerda e outra pela direita – que se encontrariam no meio e *c)* o fio se incandesceria simultaneamente em todos os lugares (visão correta). Depois das predições terem sido feitas, a experiência foi realizada e praticamente todos viram o que esperavam, ou seja, a demonstração apenas reforçou as concepções alternativas dos alunos.

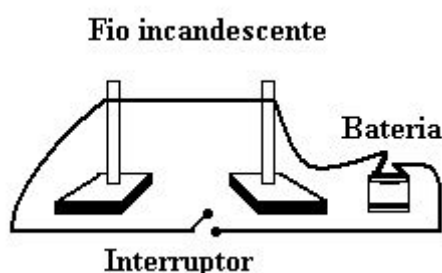


Figura 6 – Esquema do experimento proposto por Schlichting *apud* Duit e Von Rhöneck (2010) para verificar a influência das concepções alternativas dos alunos.

Raciocínios errôneos que os alunos costumam apresentar na aprendizagem de circuitos elétricos

O uso de um raciocínio local em vez de sistêmico ou holístico. Muitos alunos focalizam sua atenção em um ponto do circuito e ignoram o que está acontecendo em

outra parte. Exemplos de raciocínio local: os alunos consideram *a)* a bateria como uma fonte de corrente elétrica constante e não como uma fonte de diferença de potencial constante; então, consideram que a corrente elétrica fornecida pela bateria independe do circuito que é conectado à bateria (Engelhart e Beichner, 2004), ver Figura 1; *b)* a divisão de corrente elétrica em uma junção do circuito (em associações em paralelo) independe do restante do circuito. Muitos alunos respondem que os valores das intensidades da corrente elétrica no circuito mostrado na Figura 7 são: $i_1 = 0,6 A$, $i_2 = 0,3 A$ e $i_3 = 0,3 A$ (Duit e Von Rhöneck, 2010).

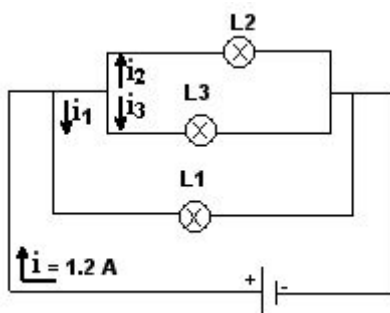


Figura 7 – Representação de um circuito elétrico com lâmpadas associadas em paralelo para verificar a compreensão sobre associação de resistências em paralelo (Duit e Von Rhöneck, 2010).

O uso de um raciocínio sequencial em vez de sistêmico ou holístico. Muitos alunos analisam um circuito elétrico em termos de “antes” e “depois” da passagem de corrente elétrica, isto é, reconhecem que uma mudança no “começo” do circuito influencia os elementos “posteriores”, mas consideram que uma mudança no “fim” do circuito não influencia os elementos “anteriores”. Na Figura 8, vê-se um exemplo de tarefa proposta para verificar se o aluno tem raciocínio sequencial. Em torno de um terço dos alunos avaliados mostraram raciocínio sequencial (Duit e Von Rhöneck, 2010), i.e., utilizam o raciocínio que se a resistência elétrica R_1 for alterada, haverá mudança no brilho da lâmpada L_1 , mas se for alterada R_2 o brilho permanecerá o

mesmo em L_1 . Para muitos alunos, o brilho da lâmpada L_1 permanece constante se o interruptor for aberto na Figura 2, pois consideram que o sentido da corrente elétrica e a ordem dos elementos no circuito são relevantes (dificuldade 1.3).

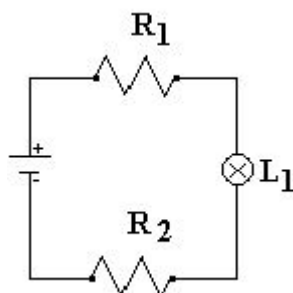


Figura 8 – Teste típico para verificar se os alunos analisam um circuito elétrico em termos de “antes” e “depois” da passagem de corrente elétrica (Duit e Von Rhöneck, 2010).

A inabilidade para aplicar o conceito de um circuito completo. Muitos estudantes não são capazes de fazer acender uma lâmpada com uma bateria e um único pedaço de fio elétrico (Figura 9), pois não consideram que uma lâmpada possui dois terminais (bornes) para conexão (Arnold, Middle e Millar, 1987; Sanchez e Sánchez, 1989; McDermott e Shaffer, 1992; Shaffer e McDermott, 1992; Shepardson e Moje, 1994; Benseghir e Closset, 1996; Chambers e André, 1997; Shepardson e Moje, 1999; Sencar e Eryilmaz, 2004; Chiu e Lin, 2005; Laború, Gouveia e Barros, 2009).

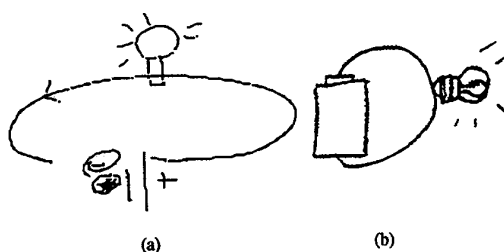


Figura 9 – Diagramas desenhados incorretamente pelos alunos para mostrar como acender uma lâmpada dado uma bateria, uma lâmpada e um pedaço de fio (McDermott e Shaffer, 1992, p. 996).

O uso indiscriminado da linguagem. Os significados associados pelos alunos a um conceito formal da Física são frequentemente muito diferentes daqueles que um físico atribui a esse mesmo conceito (McDermott e Shaffer, 1992). Em particular, os significados atribuídos aos conceitos de corrente elétrica, diferença de potencial e resistência elétrica na linguagem cotidiana diferem dos significados aceitos cientificamente para estas grandezas. Em particular, o significado atribuído ao conceito de corrente elétrica na linguagem cotidiana inclui um amplo espectro de significados com certo domínio de ideias sobre energia. Os equívocos em aulas de Física, portanto, são comuns, e mais frequentes se o professor não estiver ciente dessas diferenças entre o seu contexto e o contexto dos alunos para falar sobre fenômenos elétricos (Duit e Von Rhöneck, 2010; Pacca et al., 2003).

As principais dificuldades conceituais, concepções alternativas e raciocínios errôneos encontrados ou citados nas demais referências de nossa revisão da literatura são sintetizados na Tabela 2.

Em relação ao ensino de circuitos elétricos do tipo RLC, encontramos quatro publicações que investigam a aprendizagem dos alunos (Eylon e Ganiel, 1990; Thacker, Ganiel e Boys, 1999; Greca e Moreira, 1996 e 1998) e duas que se referem ao ensino desses circuitos, mas não focam a atenção na aprendizagem dos alunos (Krapas e Borges, 1998 e Redondo e Líbero, 1996). Mais recentemente constam algumas novas possibilidades de abordagens teóricas e experimentais para o ensino (Faleski, 2006; Hellen e Lanctot, 2007; Magno *et al.*, 2007; Ross e Venugopal, 2006).

Tabela 2 – Trabalhos de pesquisa sobre o ensino de circuitos elétricos simples. A identificação de cada item está apresentada na Tabela 1.

Estudos	Dificuldade Conceitual	Concepção Alternativa	Raciocínio	
			Local	Sequencial
Andrés (1990)	2.1	-	-	-
Axt e Alves (1994)	1.1	-	-	-
Barbosa, Paulo e Rinaldi (1999)	1.1	a)	-	X
Carter, Westbrook e Thompkins (1999)	1.1	a)	-	-
Castro (1992)	2.1	-	-	-
Dupin e Johsua (1987; 1990)	2.3	b)	-	-
Dupin e Johsua (1989)	1.2	-	-	-
Gravina e Buchweitz (1996)	1.1	a)	-	-
Gutwill, Frederiksen e Ranney (1996)	2.1	-	-	-
Laburú, Gouveia e Barros (2009)	1.2	b)	-	X
Lee (2007)	1.2	b)	-	-
Liegeois et al.(2003)	2.1	-	-	-
Liegeois e Mullet (2002)	2.1	-	-	-
Metioui <i>et al</i> (1996)	-	-	-	X
Miera, Rosado e Oliva (1991)	1.1	a)	-	-
Millar, Beh e Alam (1993)	2.1	-	-	-
Millar e King (1993)	2.1	-	-	-
Moreira e Domínguez (1987)	1.1 e 1.2	a) e f)	-	-
Nieto, Campo e Martinez (1988)	1.1 e 2.1	a)	-	X
Olde e Jong (1990)	1.1	a)	-	-
Paatz et al. (2004)	1.1	-	-	-
Pardhan e Bano (2001)	1.1	-	-	-
Planinic et al. (2005)	1.1	b)	-	X
Psillos (1988)	2.1	-	-	-
Saxena (1992)	3.3	j)	x	-
Shipstone et al.(1988)	1.1 e 2.1	a)	x	x
Silveira, Moreira e Axt (1989)	1.1	a)	-	-
Solano <i>et al.</i> (2002)	1.1	f)	-	x
Stocklmayer e Treagust (1996)	1.1 e 2.1	-	-	-
Talim e Oliveira (2001)	1.1	-	-	-
Tsai (2003)	1.1	a)	-	-
Tsai et al. (2007)	1.1	-	-	-
Vieira et al. (1986)	1.1	a)	-	-
Webb (1992)	1.1	-	-	-

Nos estudos de Eylon e Ganiel (1990) e Thacker, Ganiel e Boys (1999) foi investigado se os alunos são capazes de associar fenômenos macroscópicos que ocorrem em circuitos RC com processos microscópicos. No primeiro estudo, após o ensino desses circuitos, foi aplicado um teste constituído de quatro questões para 92 alunos, com o objetivo de identificar suas principais dificuldades de aprendizagem

sobre o tema. Alguns alunos que responderam o teste foram entrevistados para explorar com maior detalhe a natureza destas dificuldades e suas origens. Os autores verificaram que muitos alunos não utilizam os conceitos de corrente elétrica, carga elétrica e diferença de potencial em suas descrições dos processos microscópicos que ocorrem em circuitos elétricos. Então, desenvolveram um segundo estudo (Thacker, Ganiel e Boys, 1999) em que buscaram identificar as concepções dos alunos sobre a relação entre fenômenos macroscópicos transientes em circuitos do tipo RC e os processos microscópicos que podem explicar esses fenômenos. Para tanto, compararam o desempenho de dois grupos de alunos universitários, que responderam um questionário. Um grupo, formado por 90 alunos, estudou por um texto tradicional⁸, enquanto que o outro, formado por 29 alunos, usou um texto que enfatiza modelos de processos microscópicos⁹. A partir da análise do desempenho dos dois grupos e também do estudo de Eylon e Ganiel (1990), os autores concluem que o desempenho dos alunos, cuja instrução enfatizou o desenvolvimento de modelos de processos microscópicos, foi superior aos demais alunos. A partir de considerações qualitativas em suas análises, estes alunos foram capazes de desenvolver modelos coerentes para descrever suas observações. Já os alunos que estudaram pelo texto tradicional foram capazes de resolver apenas problemas quantitativos que não exigiam mais do que a memorização de fórmulas e a manipulação algébrica adequada de algumas equações. Este resultado está de acordo com os resultados encontrados nos estudos de Greca e Moreira (1996 e 1998), cujo principal objetivo não foi o ensino de circuitos RLC e sim investigar o entendimento dos alunos sobre o conceito de campo eletromagnético

⁸ D. Halliday; R. Resnick e J. Walker, *Fundamentals of Physics 3* (Wiley, New York, 1986).

⁹ R. Chabay e B. Sherwood, *Electric and Magnetic Interactions* (Wiley, New York, 1995).

quando resolvem problemas e questões teóricas. Em uma questão teórica sobre um circuito RLC, vários alunos que passaram apenas pelo ensino tradicional, foram capazes de apresentar somente afirmações soltas, como por exemplo: “Bueno, este é um circuito RLC, não sei o que se passa. Tendo as fórmulas, alguma deve me servir” (Greca e Moreira, 1996). Para Greca e Moreira (1998) os alunos trabalham com “a articulação da estrutura matemática do eletromagnetismo”, sem o objetivo de entender o que ocorre fisicamente.

Segundo Eylon e Ganiel (1990) a ausência de uma integração entre fenômenos macroscópicos e processos microscópicos impede que os alunos desenvolvam a capacidade de tratar um circuito elétrico como um sistema. Nesta tese temos também como objetivo propor aos alunos uma metodologia de ensino que propicie o desenvolvimento de raciocínios sistêmicos. Para isto, no entanto, não estamos investindo na integração entre fenômenos macroscópicos e processos microscópicos e sim propondo atividades computacionais integradas com experimentais que possibilitem aos alunos a interação com representações dinâmicas de circuitos RLC visando um melhor entendimento sobre o comportamento das grandezas macroscópicas presentes nestes circuitos.

A seguir analisaremos as principais dificuldades identificadas na aprendizagem de circuitos RLC (Eylon e Ganiel, 1990; Thacker, Ganiel e Boys, 1999; Greca e Moreira, 1996 e 1998) apontando semelhanças e diferenças com as dificuldades observadas na aprendizagem de circuitos simples, sintetizadas anteriormente.

Dificuldades conceituais e concepções alternativas

Uma das concepções alternativas mais frequentes na aprendizagem de circuitos simples é conceber que a corrente elétrica em um circuito elétrico é consumida ao percorrer um caminho em que há resistência elétrica. Esta concepção também se manifestou no estudo realizado por Thacker, Ganiel e Boys (1999) sobre a aprendizagem de circuitos RC. Questionados sobre a intensidade da corrente elétrica nos amperímetros A1 e A2 mostrados na Figura 10, 20% dos alunos responderam que a corrente elétrica em A1 é menor do que em A2. Esses resultados corroboram os estudos de Duit e Von Rhöneck (2010), McDermott e Shaffer (1992) e de Engelbart e Beichner (2004), que mostram que mesmo após o estudo de circuitos simples muito alunos continuam apresentando a concepção alternativa sobre o consumo da corrente elétrica.

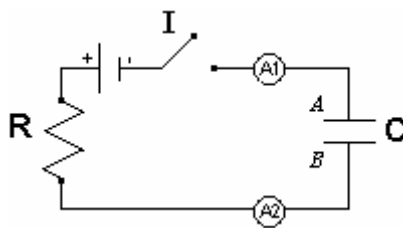


Figura 10 – Representação de um circuito RC, para verificar a compreensão dos alunos sobre o comportamento da corrente elétrica ao longo do circuito (Eylon e Ganiel, 1990; Thacker, Ganiel e Boys, 1999).

Outra das principais dificuldades dos alunos no estudo de circuitos simples é compreender que a intensidade da corrente elétrica não depende somente das características da fonte, mas também da resistência equivalente entre os seus terminais. No caso da aprendizagem dos circuitos RLC, os alunos apresentam, adicionalmente, dificuldades em entender o caráter dinâmico inerente ao comportamento das grandezas eletromagnética nestes circuitos, por exemplo, não são capazes de explicar porque

durante os processos de carga e descarga de um capacitor em um circuito RC a intensidade da corrente elétrica no circuito decai exponencialmente com o tempo. Uma questão típica apresentada por Eylon e Ganiel (1990) para identificar essa dificuldade, questiona como é o comportamento da corrente elétrica ao longo do circuito mostrado na Figura 10, quando o interruptor I for fechado. As respostas incorretas de 20 alunos foram categorizadas e os autores verificaram que: *i*) 35% dos alunos consideraram que o capacitor representa uma interrupção no circuito e conseqüentemente o circuito permanecerá aberto e nenhuma corrente elétrica poderá fluir ($i_1 = i_2 = 0$)¹⁰; *ii*) 10% dos alunos desconsideraram o efeito do capacitor completamente e responderam que $i_1 = i_2 = \text{constante}$, argumentando que “a diferença de potencial e a resistência elétrica são constantes”; *iii*) 25% dos alunos tiveram dificuldades para analisar o efeito do capacitor no circuito, respondendo que “quando o capacitor estiver completamente carregado, a corrente elétrica é constante e a resistência elétrica também” ou que “ i_1 decresce, pois $i = q/t$ ”; *iv*) 30% dos alunos adotaram uma visão sequencial do fluxo de corrente elétrica, argumentando que a corrente elétrica pode fluir do terminal positivo da bateria até a placa B do capacitor, mas não pode atravessá-lo ($i_1 = 0; i_2 \neq 0$).

Segundo Thacker, Ganiel e Boys (1999) muitos alunos não são capazes de compreender os processos de carga e descarga de um capacitor em um circuito RC. Muitos deles pensam que as cargas elétricas saltam de uma placa para a outra do capacitor ou consideram que a ordem dos elementos no circuito é relevante,

¹⁰ i_1 corrente elétrica que passa pelo amperímetro A1 e i_2 corrente elétrica que passa por A2.

argumentando que o capacitor carrega-se de carga elétrica que só pode fluir por uma parte do circuito.

No presente trabalho apresentamos exemplos de atividades computacionais que possibilitam uma visão mais imediata da medida de grandezas físicas envolvidas em circuitos RLC. Em qualquer instante de tempo os alunos podem observar simultaneamente o comportamento da intensidade da corrente elétrica, da resistência elétrica, das diferenças de potencial ao longo do circuito e da quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor. Com isto, esperamos que os recursos computacionais possam auxiliá-los a compreender os efeitos transientes característicos destes circuitos.

Raciocínios errôneos

No estudo de circuitos simples os alunos têm a tendência de apresentar raciocínios locais e sequenciais em vez de sistêmicos ou holísticos. No estudo de circuitos RLC estes raciocínios errôneos nem chegam a transparecer porque predomina o raciocínio mecânico, baseado unicamente em fórmulas (Thacker, Ganiel e Boys, 1999; Greca e Moreira, 1996 e 1998). Neste caso o principal objetivo é encontrar as soluções particulares das equações diferenciais que descrevem o comportamento das grandezas físicas presentes nos circuitos em questão sem se aprofundar na sua interpretação conceitual. Um exemplo disso é apresentado por Greca e Moreira (1996), que observaram que os alunos ao descreverem o comportamento do campo elétrico no capacitor e o do campo magnético no indutor em um circuito LC durante uma

oscilação completa, reproduzem mecanicamente as equações matemáticas e os gráficos de barra que estão no livro-texto, para as energias armazenadas em um circuito LC, mas não conseguem representar nem sequer o sentido das linhas de campo magnético no indutor durante uma oscilação completa.

Uma síntese das dificuldades conceituais que os alunos usualmente apresentam no estudo de circuitos RLC é apresentada na Tabela 3, enquanto as várias concepções alternativas e raciocínios errôneos constam da Tabela 4.

Tabela 3 – Síntese das principais dificuldades conceituais sobre circuitos RLC identificadas em Eylon e Ganiel (1990); Thacker, Ganiel e Boys (1999); Greca e Moreira (1996 e 1998).

	Conceitos	Dificuldades
Circuitos RC	Corrente elétrica	<ul style="list-style-type: none"> • Compreender que durante os processos de carga e descarga a intensidade da corrente elétrica decai exponencialmente. • Considerar a conservação espacial da corrente elétrica.
	Carga elétrica	<ul style="list-style-type: none"> • Compreender os processos de carga e descarga do capacitor. • Entender a relação entre carga elétrica e corrente elétrica.
	Diferença de potencial	<ul style="list-style-type: none"> • Relacionar a diferença de potencial no capacitor com a quantidade de carga armazenada e a diferença de potencial no resistor com a intensidade de corrente elétrica.
Circuitos LC e RLC	Carga elétrica e corrente elétrica	<ul style="list-style-type: none"> • Relacionar a intensidade da corrente elétrica com a quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor em função do tempo. • Identificar o sentido das linhas de campo magnético no indutor, durante os processos de carga e descarga do capacitor.
	Campo eletromagnético	<ul style="list-style-type: none"> • Compreender o comportamento das energias elétrica, magnética e eletromagnética, durante uma oscilação completa.

Tabela 4 – Síntese das principais concepções alternativas e raciocínios errôneos apresentados pelos alunos no ensino de circuitos RLC identificados [1] Eylon & Ganiel (1990), [2] Thacker, Ganiel & Boys (1999) e [3,4] Greca & Moreira (1996, 1998) respectivamente.

Os alunos ...
<p>... pensam que a corrente se desgasta ao passar por uma resistência elétrica [2].</p> <p>... acreditam que em um circuito RC:</p> <p>a) a corrente elétrica é constante em ambos os lados do capacitor, desde que a diferença de potencial fornecida pela fonte e a resistência elétrica permaneçam constantes [1];</p> <p>b) a intensidade de corrente elétrica é nula, pois o capacitor representa uma interrupção no circuito [1,2];</p> <p>c) quando o capacitor estiver totalmente carregado a corrente elétrica permanecerá constante e não-nula [1];</p> <p>d) a ordem dos elementos importa [2];</p> <p>e) as cargas elétricas saltam de uma placa para a outra do capacitor [2].</p> <p>... reproduzem mecanicamente os gráficos de barra que estão no livro-texto, para as energias armazenadas em um circuito LC, não conseguindo representar nem sequer o sentido das linhas de campo magnético no indutor, durante uma oscilação completa [4].</p> <p>... desenvolvem um raciocínio mecânico, baseado em fórmulas, sem se preocupar com o que ocorre fisicamente em circuitos RLC [2, 3, 4].</p>

Dificuldades de aprendizagem sobre as leis de Gauss e de Ampère

Em relação às dificuldades de aprendizagem dessas leis nos baseamos na revisão da literatura realizada por Araujo, Veit e Moreira (2007), no período de 1990 a 2005, na qual são relatados cinco estudos sobre a Lei de Gauss (Goldman, Lopes e Robilotta, 1981; Viennot e Rainson, 1992; Krapas, Alves e Carvalho, 2000; Guisasola et al., 2003; Araujo, Veit e Moreira, 2005; Moreira e Krey, 2006), dois estudos a respeito da Lei de Ampère (Guisasola et al., 2003; Moreira e Pinto, 2003) e é feita, ainda, uma síntese das principais dificuldades de aprendizagem e exemplos de argumentação dos alunos identificadas nesses estudos, transcritas literalmente nas tabelas 5 e 6. Acrescentamos nessas tabelas as principais dificuldades de aprendizagem apontadas nos estudos de Singh (2006) e Manogue et al. (2006).

Tabela 5 – Principais dificuldades dos alunos na aprendizagem da Lei de Gauss discutidas por [1] Araujo, Veit e Moreira (2007, p. 605) e [2] Sinh (2006).

Dificuldade	Exemplos de argumentação
Visão da Lei de Gauss como apenas um método para resolução de problemas com alto grau de simetria [1].	“A Lei de Gauss é um método que nos permite calcular o campo elétrico mais facilmente do que usando a Lei de Coulomb quando temos simetria [1].”
Confusão entre campo elétrico e fluxo elétrico [1].	“Se não houver carga alguma dentro da superfície gaussiana, o campo é nulo [1].”
[Superposição dos campos] o campo elétrico referido pela Lei de Gauss é devido somente às cargas internas à superfície gaussiana [1].	“Apenas o campo produzido pelas cargas dentro da superfície gaussiana precisa ser considerado, pois a contribuição das cargas externas é zero [1].”
Escolha da forma e onde posicionar a superfície gaussiana [1].	“Nunca sei qual a forma e onde colocar a origem da superfície gaussiana, pois mudam a cada problema [1].”
Confusão entre as dimensões da gaussiana com as dimensões de objetos que compõem o sistema [1].	“Não consigo distinguir quando devo usar o raio da esfera ou o raio da gaussiana para calcular o campo elétrico de uma esfera isolante carregada [1].”
Dificuldade em identificar a carga líquida envolvida pela superfície gaussiana [1].	“Faço confusão quando tenho que determinar qual a carga líquida quando o raio da gaussiana é menor do que o raio da esfera e esta tem ‘buracos dentro’ ” (casca esférica) [1].
Confusão entre o fluxo do campo elétrico e o fluxo de cargas [1].	“A Lei de Gauss serve para calcularmos o campo elétrico em um ponto a partir do fluxo de cargas que atravessa uma superfície gaussiana [1].”
Perceber que é a simetria da distribuição de carga elétrica que é importante para a obtenção do campo elétrico em um dado ponto e não a simetria da superfície gaussiana [2].	“Ao identificarem a forma da superfície gaussiana adequada para tornar simples a aplicação da Lei de Gauss em uma linha de carga infinita os alunos acreditam que pode ser qualquer forma, desde que a superfície gaussiana seja simétrica [2].”
Dificuldade em diferenciar os conceitos de campo elétrico e fluxo elétrico [2].	“Os alunos consideram que se o fluxo através de uma superfície fechada é menor em comparação a outra superfície, o módulo do campo elétrico sobre os pontos da superfície de menor fluxo também é menor [2].”

Tabela 6 – Principais dificuldades dos alunos na aprendizagem da Lei de Ampère discutidas por [1] Araujo, Veit e Moreira (2007, p. 607) e [2] Manogue et al. (2006).

Dificuldade	Exemplos de argumentação
Visão da Lei de Ampère como apenas um método para resolução de problemas com alto grau de simetria [1].	“A Lei de Ampère é um método que nos permite calcular o campo magnético mais facilmente do que usando a Lei de Biot-Savart para casos com simetria [1].”
Confusão de linha amperiana com “superfície” amperiana [1]*.	“... a superfície amperiana que envolve a corrente líquida ... [1]”
[Superposição dos campos] o campo magnético referido pela Lei de Ampère é devido somente às correntes internas à linha amperiana [1].	“A Lei de Ampère indica que são as intensidades (de corrente) que atravessam a linha amperiana que criam o campo magnético [1].”
Confusão entre campo magnético e circulação do campo magnético [1].	“Se a corrente líquida envolvida pelo laço amperiano é zero, o campo magnético é nulo sobre ele [1].”
Determinação do contexto de validade da Lei de Ampère [1].	“A Lei de Ampère é válida sempre, para qualquer situação [1].”
Dificuldade para adotar e posicionar um laço amperiano imaginário [2].	“Alguns alunos escolhem um círculo ao redor de um fio longo, encontrando-se precisamente na superfície do fio [2]”.
* Esta dificuldade, sugerida na ref. Moreira e Pinto (2003), é questionada por Araujo, Veit e Araujo (2007, p. 617) com a seguinte argumentação: “... frequentemente, os alunos falavam em “carga líquida”, mas na verdade estavam se referindo à “corrente líquida”. Em nossa análise, esta dificuldade não chega a ser conceitual, estando mais relacionada a um erro de linguagem.”	

Araujo, Veit e Moreira (op. cit.) usaram simulações computacionais para fornecer elementos perceptivos necessários para o entendimento de conceitos abstratos, associados às leis de Gauss e de Ampère. Tais simulações foram trabalhadas pelos alunos em uma abordagem que envolveu um método colaborativo presencial como dinâmica de base para o estabelecimento de relações interpessoais entre o professor e a turma, e os alunos entre si. Na análise dos resultados foi adotada uma metodologia qualitativa, em que o foco estava no processo de ensino-aprendizagem no ambiente de sala de aula. Seus resultados sugerem que as atividades de simulação e modelagem computacionais são potencialmente facilitadoras de aprendizagem

significativa em Física. Sugerem, também, que a atividade colaborativa presencial contribui positivamente para esse tipo de aprendizagem. No presente trabalho além de utilizar alguns dos guias concebidos por Araujo (2005), para os alunos, também nos valem dos resultados sobre o método colaborativo presencial para fundamentar e conceber nossa abordagem didática. No entanto, nossos objetivos se diferenciam dos de Araujo tanto em termos de conteúdo, pois nossa abordagem abarca todo o conteúdo de Eletromagnetismo, com ênfase no ensino de circuitos elétricos, tanto em termos de uso do computador, pois estamos investigando a possibilidade de integrar AC e AE para propiciar além de melhores condições para aprendizagem significativa a reflexão nos alunos sobre o contexto de validade dos modelos teóricos subjacentes a implementação das AC.

2.2 FATORES POSITIVOS E NEGATIVOS ASSOCIADOS A ATIVIDADES EXPERIMENTAIS

É praticamente consensual entre professores de Física que o uso de experimentos didáticos é uma componente indispensável no ensino da disciplina, porém muitos deles não são capazes de especificar claramente o que se espera do uso de AE e confessam que pouco as usam em suas aulas. Vários trabalhos (Hodson, 1994; Gil-Pérez et al., 1999; Ronen e Eliahu, 2000; Borges, 2002; Zacharia, 2007) alertam que muitas das atividades propostas pelos docentes em aulas experimentais não privilegiam a interatividade e apresentam um distanciamento entre teoria e prática. Segundo esses autores as tradicionais aulas de laboratório propostas com roteiros fortemente dirigidos “ao estilo de receita de bolo” têm contribuído para uma

aprendizagem mecânica e uma visão empirista-indutivista da experimentação em Física. Isso resulta do fato que tradicionalmente atividades experimentais vêm sendo subutilizadas e dessa forma costumam apresentar os pontos negativos mostrados na segunda coluna da Tabela 7. Por outro lado, se as atividades forem planejadas levando em conta as possibilidades de promoção de experiências de ensino que propiciem a reflexão e a interação entre os alunos e os recursos experimentais poderão apresentar os fatores positivos mostrados na primeira coluna (Tabela 7). Por exemplo: Hodson (1994) defende um ensino de laboratório menos prático e mais reflexivo. Diversos estudos (e. g., Gangoli e Gurumurthy, 1995; Roychoudhury e Roth, 1996; Guridi e Islas, 1998) apresentam resultados que sugerem que AE concebidas a partir de guias que não contêm uma estrutura rígida, os chamados guias abertos, favorecem a conceitualização propiciando melhores condições para os alunos testarem suas ideias e confrontarem suas opiniões.

Para Saraiva-Neves, Caballero e Moreira (2006) atividades experimentais devem envolver situações problemáticas cuja busca por soluções leve os alunos à reestruturação de suas ideias prévias. Para que isso ocorra eles apontam os seguintes fatores em que se deve investir no ensino de laboratório: *i*) propor atividades motivadoras, *ii*) levar em consideração os conhecimentos que os alunos já possuem, *iii*) ultrapassar a visão empirista da resposta única e correta e *iv*) permitir uma inter-relação teoria/prática. Séré (2002) também defende a inter-relação entre teoria/experimento e sugere uma diminuição da carga conceitual em favor da escolha consciente de procedimentos e epistemologias adequadas. Em um estudo posterior

Séré, Coelho e Nunes (2003) destacam que é através das AE que o aluno é estimulado a não permanecer somente no mundo dos conceitos e das “linguagens”, pois tem a oportunidade de relacionar esses dois mundos com o empírico. Argumentam que para o aluno conseguir questionar esses mundos, manipular modelos e desenvolver métodos ele deve estar consciente de que é necessária uma teoria, isto é, estabelecer uma inter-relação entre teoria e experimento.

Tabela 7 – Fatores positivos das AE e fatores negativos das tradicionais aulas de laboratório, discutidos na literatura por Hodson (1994), identificado na tabela por [1]; Gil-Pérez *et al.* (1999), [2]; Borges (2002) [3]; Marineli e Pacca (2006) [4].

Atividades experimentais	
Fatores positivos	Fatores negativos (em abordagens tradicionais¹¹)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Manipulação de objetos reais [1-4]. 2. Geração de hipóteses focadas na investigação e na construção de delineamentos experimentais [2, 4]. 3. Aprendizado de técnicas de laboratório: manipulação de instrumentos e realização de medidas experimentais [1]. 4. Intensificação da aprendizagem de conceitos científicos [1]. 5. Conexão entre o que ocorre fisicamente nos experimentos e os conceitos físicos apresentados nas aulas teóricas. [1]. 6. Desenvolvimento de atitudes científicas, tais como: objetividade e rigor [1]. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Os alunos são induzidos a uma visão empirista-indutivista da metodologia científica, quando propostas na forma de “receitas de bolo” [1, 2]. 2. Consomem muito tempo dos alunos nas operações de montagem de equipamentos, coleta de dados e cálculos para obter respostas esperadas, ao ponto de desmotivá-los [1, 3]. 3. Os alunos com frequência percebem as aulas práticas como eventos isolados, em que o objetivo é chegar à “resposta certa”, pois, na maior parte das vezes, não estão efetivamente relacionadas com os conceitos físicos [3].

Segundo Andrés, Pesa e Moreira (2006) o trabalho de laboratório consiste em uma situação problemática cuja resolução demanda a realização de diversas tarefas (gerar predições, formular hipóteses, selecionar métodos, elaborar sínteses, conclusões etc.) e deve predominar o aprendizado do domínio metodológico inter-relacionado com algum marco teórico (eles optaram pelo referencial de campos conceituais de

¹¹ Atividades propostas a partir de roteiros fortemente dirigidos ao estilo “receita de bolo” que priorizam a coleta e análise de dados.

Vergnaud (1990)), de modo que se estabeleça uma inter-relação entre teoria, modelo e experimento. Gaspar e Monteiro (2005) também utilizam um referencial teórico (pedagogia sociocultural de Vigotski (2001)) para fundamentar a utilização de AE no ensino de Física. Para Gaspar (2003) as AE podem ser valiosas para promover interações sociais que tornem as explicações e ilustrações de modelos científicos mais acessíveis e eficientes para o entendimento dos alunos.

No presente trabalho procuramos estabelecer um vínculo entre teoria e experimento, ancorados em uma fundamentação teórica, como sugerem Coelho e Nunes (2003), Saraiva-Neves, Caballero e Moreira (2006) e Andrés, Pesa e Moreira (2006). Optamos pelas teorias de aprendizagem de Ausubel (2003) e Vigotski (2003) e pela epistemologia de Bunge (1994) para fundamentar o uso das AE em sala de aula.

2.3 FATORES POSITIVOS E NEGATIVOS RELATIVOS ÀS ATIVIDADES COMPUTACIONAIS

Em relação às atividades computacionais cabe inicialmente mencionar que se constituem em um recurso instrucional relativamente novo, pois o uso do computador em sala de aula passou a ser mais significativo a partir da década de noventa. Assim sendo, ainda não se tem uma tradição sobre a sua aplicação em sala de aula, como ocorre com o ensino de laboratório. Apesar disso, Araujo e Veit (2004) em uma revisão sobre o uso de novas tecnologias no ensino de Física apontam certa tendência nos trabalhos publicados, cuja maior parte se refere ao relato da aplicação ou desenvolvimento de algum recurso computacional, sem levar em consideração o

conhecimento produzido na pesquisa em ensino de Física. Trabalhos com referencial teórico de aprendizagem que investigam o uso de novas tecnologias ainda são minoria comparada com o modismo de produzir simulações ricas em cores e detalhes, que segundo Medeiros e Medeiros (2002) costumam desconsiderar totalmente o contexto de validade dos modelos teóricos e podem ser vistas como jogos, ou como verdadeiras caixas-pretas pelos alunos. Para Medeiros e Medeiros (*op. cit.*) outro principal fator negativo do uso de simulações computacionais é o perigo da perda da referência objetiva, ocasionada pelo trabalho descontextualizado. Progressivamente, entretanto, têm sido dedicados mais esforços no sentido de avaliar sistematicamente o uso de novos recursos tecnológicos no ensino de Física, como é o caso, por exemplo, dos trabalhos de Zacharia e Anderson (2003), Zacharia (2007) e Araujo, Veit e Moreira (2008). Esses estudos destacam os fatores positivos mostrados na primeira coluna da Tabela 8.

Zacharia e Anderson (2003) apresentam uma série de características desejáveis em simulações computacionais, a saber: *i)* ser interpretativa e focada no tópico específico a ser aprendido; *ii)* permitir que sejam alteradas todas as variáveis associadas com o fenômeno físico simulado, mesmo aquelas que não afetam o fenômeno em estudo; *iii)* permitir ao aluno fazer observações enquanto roda a simulação (permitir a visualização em câmera lenta quando relevante); *iv)* não conter elementos irrelevantes ou que dispersem a atenção dos alunos; *v)* ter um formato e apresentação tão simples quanto possível, para garantir que toda modificação

introduzida pelo aluno produza um resultado facilmente observável e *iv*) ser facilmente manipulável.

Tabela 8 – Fatores positivos das atividades computacionais e fatores negativos das “tradicionais” AC, discutidos na literatura por Hodson (1994), identificados na tabela por [1]; Steinberg (2000) [2]; Medeiros e Medeiros (2002), [3]; Zacharia e Anderson (2003), [4]; Zacharia (2007), [5]; Araujo, Veit e Moreira (2008), [6]; Jaakkola e Nurmi (2008), [7].

Atividades Computacionais	
Fatores positivos	Fatores negativos (em abordagens “tradicionais”¹²)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Reificação de conceitos abstratos (visualização) [3, 6]. 2. Elaboração e teste de hipóteses à medida que estas são levantadas [3, 4]. 3. Interação com representações de experiências impossíveis de serem realizadas em contexto de sala de aula (e.g. alunissagem de uma espaçonave e vazamento radioativo em uma usina nuclear) [3]. 4. Obtenção de dados de forma rápida e dinâmica. [3, 5]. 5. Desenvolvimento de atitudes, tais como: curiosidade, interesse, objetividade, precisão, confiança, perseverança, consenso [4]. 6. Diminuição ou aumento do nível de complexidade dos sistemas físicos, tais como: incluir ou excluir certos aspectos, adotar condições, fazer idealizações [1, 5]. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desenvolvimento de uma visão “míope” sobre o contexto de validade dos modelos teóricos, pois os alunos podem confundir o virtual com o real [3]. 2. O procedimento para executar uma simulação é muito diferente do que montar um experimento [2]. 3. Frequentemente são usadas para demonstrar um produto final da Física, não explicitam a forma como o conhecimento científico é produzido [2]. 4. Passam a ideia de que simulações computacionais são uma espécie de jogo e consideradas como verdadeiras caixas-pretas pelos alunos, que também atribuem a elas poderes quase mágicos [3]. 5. Não possibilitam a riqueza heurística da experiência dos erros experimentais e, assim, a tentativa de resolverem problemas da vida real [3]. 6. Os alunos nem sempre percebem que as leis e princípios físicos subjacentes as simulações se aplicam também em sistemas reais [7].

Para Araujo e Veit (2009) apesar das características apontadas por Zacharia serem altamente desejáveis e úteis para nortear a concepção e avaliação de simulações computacionais, não são garantia de sucesso, pois a eficácia de um recurso computacional não depende apenas de suas características inerentes, mas, especialmente, das estratégias didáticas empregadas no seu uso. Araujo e Veit (*op. cit.*)

¹² Atividades de simulação computacional que não requerem que o aluno reflita sobre os referentes reais representados e as idealizações assumidas nos modelos teóricos empregados na implementação das simulações computacionais (Araujo e Veit, 2004).

acrescentam a essa série de características algumas recomendações relativas à forma de implementação de simulações computacionais em sala de aula, a saber: *i)* propor questões instigantes, que requeiram interação com o recurso computacional; *ii)* contextualizar; *iii)* definir objetivos a serem alcançados na interação; *iv)* definir conceitos e procedimentos associados ao conteúdo que se deseja que os alunos aprendam; promover reflexão por parte do aluno, tanto sobre os resultados imediatos de suas ações quanto sobre a razoabilidade física dos resultados encontrados; *v)* incentivar o trabalho em pequenos grupos e *vi)* criar momentos e condições propícias para a troca de significados.

Ainda em relação às atividades computacionais cabe salientar as potencialidades do *software Modellus* utilizado pelos alunos nas AC. Dentre as várias ferramentas computacionais disponíveis (*Interactive Physics, Java applets, Stella, PowerSim, Modellus, etc.*) optamos pelo *software Modellus* (Teodoro, Vieira e Clérigo, 1997), por ter uma interface intuitiva, que facilita a interação dos estudantes com os modelos computacionais em tempo real, permitindo, também, observar múltiplos experimentos (conceituais) simultaneamente (Teodoro, 1998). Segundo Veit e Teodoro (2002) o *Modellus* permite ao aluno fazer e refazer representações de sistemas (em nosso caso sistemas físicos) e explorá-las sob várias perspectivas, facilitando a familiarização com representações e criando de certo modo uma intimidade entre aprendiz e representação, intimidade essa que muito dificilmente resulta da simples observação ocasional de equações e representações feitas pelo professor ou apresentadas nos livros. Atualmente o *Modellus* vem sendo bastante

utilizado em atividades de ensino (e.g., Teodoro, 2010; IOP, 2004), porém raros são os trabalhos na literatura que investigam sistematicamente os benefícios para a aprendizagem dos estudantes que utilizaram essa ferramenta. Uma das poucas investigações sistemáticas nesse sentido foi desenvolvida por Araujo, Veit e Moreira (2008), tendo como foco o uso de atividades de simulação e modelagem computacionais, com o *Modellus*, como complemento instrucional no ensino de gráficos da Cinemática. O estudo envolveu dois grupos (experimental e de controle) de estudantes que já tinham sido expostos à instrução formal de Cinemática e ocorreu na forma de um curso extraclasse. Foi usado como instrumento de medida uma adaptação para o português do “Test of Understanding Graphs in Kinematics TUG-K” (Beichner, 1994) para avaliar a compreensão conceitual dos estudantes. Os resultados mostram que houve melhorias estatisticamente significativas no desempenho dos estudantes do grupo experimental, quando comparado com os estudantes do grupo de controle, expostos apenas ao método tradicional de ensino, sugerindo que o uso de atividades computacionais pode aumentar a habilidade dos estudantes para o entendimento de gráficos da cinemática. Também foi constatado que em simulações em que os alunos trabalhavam muito livremente, com frequência criavam situações muito trabalhosas para uma descrição textual do movimento, conforme requerido na tarefa. Como resultado, suas respostas eram incompletas e de difícil comparação com as dos colegas, e, como consequência, esse tipo de atividade não cumpriu com seus objetivos. Outro aspecto importante é que ao perceber a relevância de algumas relações matemáticas e conceitos físicos, durante as interações com os modelos computacionais, os estudantes demonstraram predisposição para aprender, pois

assuntos que previamente pareciam muito abstratos tornaram-se mais familiares e mais concretos. Esses resultados nos motivaram a desenvolver o presente trabalho, que se diferencia do proposto por Araujo, Veit e Moreira (2008) pelo conteúdo de Física trabalhado, por ter sido desenvolvido em situação real de sala de aula e também por envolver o ensino de laboratório.

2.4 INTEGRAÇÃO ENTRE ATIVIDADES COMPUTACIONAIS E EXPERIMENTAIS NO ENSINO DE ELETROMAGNETISMO

Enquanto nas seções anteriores apresentamos somente artigos que serviram como embasamento para o nosso trabalho, dentro de um universo bem maior de estudos que envolvem o uso do laboratório ou do computador, na presente seção apresentamos todos os trabalhos encontrados na revisão da literatura sobre a integração entre atividades experimentais e computacionais no ensino de Eletromagnetismo. Localizamos somente três estudos no período de 1994 a 2009 (Ronen e Eliahu, 2000; Zacharia, 2007; Jaakkola e Nurmi, 2008). Dentre as investigações sobre a integração entre AC e AE em outras áreas da Física, destacamos os estudos de Zacharia e Anderson (2003) e de Hennessy, Deaney e Ruthven (2006) na área de Mecânica e os estudos de Zacharia e Constantinou (2008) e de Zacharia, Olympiou e Papaevripidou (2008) em Termodinâmica.

A seguir descrevemos os principais aspectos dos três artigos citados sobre o ensino de Eletromagnetismo, especificando: *i)* o(s) objetivo(s); *ii)* o conteúdo

abordado; *iii*) o tipo de integração proposto; *iv*) o referencial teórico; *v*) a população alvo; *vi*) a metodologia da pesquisa e *vii*) os resultados. Concluiremos com uma apreciação sobre os aspectos apontados nesses artigos que levamos em consideração no nosso estudo e, também, sobre diferenças existentes entre o nosso estudo e os citados.

Ronen e Eliahu (2000) investigaram o papel de uma simulação computacional como recurso didático para auxiliar os alunos no aprendizado da física envolvida em circuitos elétricos simples, partindo do princípio que a simulação pode diminuir o distanciamento entre teoria e realidade. O estudo foi realizado em uma escola urbana de Israel, envolvendo 65 duplas de alunos com 15 anos de idade, de quatro turmas da 9ª série, ministradas por dois professores. Para cada professor, de forma aleatória, uma turma foi escolhida como grupo de controle e a outra como experimental. Todas as turmas utilizaram o mesmo livro e desenvolveram as mesmas experiências de laboratório.

O diferencial do grupo experimental foi que na bancada em que desenvolveram as atividades os alunos tinham à disposição uma simulação, que já lhes era familiar e poderia ser explorada ligando o monitor do computador ao lado, caso julgassem que fosse útil. Essa simulação computacional permitia construir ou manipular qualquer modelo de um circuito elétrico de corrente contínua, como por exemplo, modelo contendo pilhas, fontes de tensão, resistores com resistência variável ou não, lâmpadas, fusíveis, aparelhos de medição, etc.

Cada tarefa foi desenvolvida em quatro aulas. Antes do desenvolvimento das tarefas os alunos receberam instrução sobre a parte teórica e foram familiarizados com problemas qualitativos a partir da resolução de exercícios teóricos. Nas folhas de respostas dos guias dos alunos encontrava-se um espaço reservado para cada dupla apresentar o grau de confiança em suas próprias respostas, de acordo com a seguinte escala: (1) não temos certeza em tudo, (2) não temos certeza, (3) quase certo e (4) completamente certo. O horário em que os alunos concluíram as tarefas também era registrado na folha de respostas. Na primeira tarefa (Tarefa I) um circuito elétrico, contendo uma fonte, três lâmpadas e dois interruptores, foi montado sobre uma mesa. Os alunos, em duplas, foram desafiados a desenharem um diagrama do circuito. Essa tarefa foi considerada difícil porque um dos interruptores foi associado de maneira não familiar para os alunos – em paralelo com uma lâmpada – e também porque havia quatro posições possíveis para os interruptores. Três tipos de categorias para as soluções foram previamente estabelecidas: *solução correta* – diagrama representando exatamente a topologia de todos os componentes; *solução parcial* – diagramas que incluem o interruptor em paralelo e podem representar três das quatro combinações possíveis dos interruptores e *solução incorreta* – os demais diagramas, que incluíam apenas interruptores em série e diagramas “ilegítimos”. Na Tarefa II, fios elétricos, lâmpadas idênticas e uma fonte de tensão foram disponibilizados para os alunos construírem um circuito real, de modo que a intensidade do brilho das lâmpadas fosse: $A > B > C = D$. Essa atividade exigiu dos alunos uma boa compreensão dos conceitos envolvidos em circuitos elétricos. Durante o desenvolvimento das tarefas um professor/observador acompanhava o trabalho de duas ou três duplas. Os resultados

foram obtidos a partir da análise de dados coletados com os seguintes instrumentos: as folhas de respostas dos guias, que incluem as explicações, grau de confiança dos alunos em suas respostas, tempo de realização e comentários adicionais escritos pelos observadores; as notas de campo dos observadores, com vários detalhes sobre o trabalho das duplas, e a filmagem de oito duplas trabalhando em cada aula.

No grupo experimental, formado por 34 duplas, apenas 13 delas utilizaram a simulação computacional. Seis das 13 duplas apresentaram soluções corretas; cinco, soluções parcialmente corretas e as outras duas, soluções incorretas. Das demais duplas do grupo experimental (21), que não utilizaram a simulação, somente três tiveram suas soluções consideradas corretas e três soluções parcialmente corretas. No grupo de controle (constituído de 29 duplas) apenas duas apresentaram soluções corretas, três parcialmente corretas e as outras 24, incorretas.

Os autores observaram, através do teste Qui-quadrado, que as diferenças entre as duplas do grupo experimental que utilizaram a simulação computacional e as que não utilizaram é estatisticamente significativa ($\chi^2 = 16,9, p < 0,001$). Na comparação entre as 13 duplas do grupo experimental que utilizaram a simulação computacional e as 29 duplas do grupo de controle também foram observadas diferenças estatisticamente significativas ($\chi^2 = 7,2, p < 0,05$). Não houve diferenças significativas entre as duplas do grupo experimental que não utilizaram a simulação com as do grupo de controle. Em síntese, o melhor desempenho observado no grupo experimental que usou a simulação pode ser atribuído ao uso do computador. Foi constatado, também,

que a simulação computacional, para os alunos que a utilizaram, inicialmente não passava de uma ferramenta motivacional, mas ao interagirem passaram a perceber a potencialidade de identificar seus próprios erros e assim corrigir os diagramas dos circuitos elétricos propostos.

Ainda em relação à Tarefa I foi observado que vários alunos do grupo de controle colocaram em seus diagramas lâmpadas contendo três ou mais contatos, demonstrando não perceberem que uma lâmpada possui somente dois bornes para conexão. Essa dificuldade não foi evidenciada pelos alunos que interagiram com a simulação computacional, possivelmente porque na simulação o aluno é obrigado a usar somente a representação correta.

Na Tarefa II inicialmente não foram observadas diferenças entre os grupos pois na concepção dos primeiros projetos tanto no grupo de controle quanto no experimental os circuitos reais refletiam concepções alternativas comuns aos alunos. Porém, foi observado que as duplas que obtiveram maior êxito na superação de suas dificuldades de aprendizagem, mostrando-se mais confiantes, foram as duplas do grupo experimental, que usaram o computador. Nesta tarefa a decisão de usar ou não a simulação computacional se mostrou correlacionada com o nível conceitual dos alunos (avaliado com a aplicação de um teste inicial). Observaram-se, também, diferenças estatisticamente significativas a favor das duplas que utilizaram a simulação em comparação às demais duplas que não o utilizaram, tanto as do grupo de controle quanto as do grupo experimental.

Os resultados superiores das duplas que utilizaram a simulação computacional foram atribuídos, pelos autores, à combinação entre o conhecimento prévio dos alunos e o “*feedback* construtivo”, possibilitado pela simulação computacional, que ajudou os alunos a identificarem e corrigirem seus próprios erros. Foi constatado também que a simulação computacional se constituiu em uma excelente opção para auxiliar os alunos a compreenderem a relação entre modelos teóricos, representações formais e a realidade. No entanto, vale a pena destacar que Ronen e Eliahu (op. cit.) identificaram que para algumas duplas do grupo experimental o computador não foi útil. Cerca de 10-15% dos alunos, com um domínio conceitual insuficiente, interagiram aleatoriamente, não sendo possível usufruir do *feedback* fornecido pela simulação computacional. Já outros 10%, com um ótimo domínio conceitual, não necessitaram de nenhum auxílio e aproximadamente 5% não manifestaram nenhum interesse em utilizar a simulação computacional, afirmando que “odeiam” computadores.

Outra investigação sobre a combinação entre AC e AE em Eletromagnetismo é a de Zacharia (2007), que averiguou o entendimento conceitual de alunos que utilizaram AC como complemento às AE, em uma investigação desenvolvida em três partes¹³: Na Parte A foi abordado o comportamento das grandezas físicas presentes em circuitos elétricos simples; na Parte B, medidas de corrente elétrica e de resistência elétrica e na Parte C, medidas de diferenças de potencial¹⁴.

¹³ Com base nos materiais curriculares propostos por McDermott e *The Physics Education Group* (1996, p. 382).

¹⁴ Não encontramos no artigo original qual foi o tempo de aplicação destas três partes, mas pelas informações sobre o conteúdo trabalhado e o número de testes aplicados estimamos que tenha durado várias semanas.

Participaram do estudo 90 estudantes matriculados em uma disciplina introdutória de Física de uma universidade do Chipre, com idade de 20 a 22 anos.

Um grupo experimental, constituído por 45 alunos, e outro de controle (43 alunos)¹⁵ foram formados aleatoriamente. Os alunos do grupo de controle desenvolveram atividades experimentais sobre o conteúdo envolvido nas três partes (A, B, C), em um laboratório de Física, utilizando somente materiais experimentais. Os alunos do grupo experimental trabalharam de forma semelhante aos do grupo de controle nas partes A e B, mas na parte C o *software Virtual Laboratories Electricity* substituiu completamente o laboratório de Física. O *software* permitia avaliar o circuito sempre que algum elemento a ele fosse adicionado ou removido. O *software* era utilizado para a montagem de um circuito elétrico virtual, fornecendo aos alunos um *feedback* sobre as possíveis conexões elétricas que poderiam ser implementadas no circuito caso a ele fosse adicionado um elemento, por exemplo, uma resistência elétrica. Após a montagem era possível observar o comportamento de grandezas físicas presentes no circuito (e. g. brilho nas lâmpadas, intensidade de corrente elétrica) e fazer medidas na simulação de algumas delas.

Um teste conceitual, contendo 13 itens com quatro alternativas cada, foi elaborado com base, principalmente, no estudo de McDermott e Shaffer (1992) e foi utilizado como pré e pós-teste. Também foram aplicados pré e pós-testes em cada parte do estudo, denominados de: pré-teste1, pré-teste2, pré-teste3, pós-teste1, pós-

¹⁵ O grupo de controle inicialmente foi composto por 45 alunos, porém dois não conseguiram participar de todo o estudo.

teste² e pós-teste³. Para fins de avaliação, entretanto, foram utilizados somente os dados oriundos do pré-teste aplicado no início do estudo e do pós-teste aplicado ao final e os dados dos pré e pós-teste³, referentes à Parte C.

Na comparação entre as médias do pré-teste e do pós-teste foram observadas diferenças estatisticamente significativas em ambos os grupos. Isso mostra que tanto as AE combinadas com AC quanto somente AE, ambas embasadas nos materiais curriculares propostos por McDermott e *The Physics Education Group* (1996) auxilia os alunos a adquirirem um entendimento conceitual no estudo de circuitos elétricos simples. Na comparação entre os grupos, uma análise de covariância (ANCOVA)¹⁶ – análise por regressão que ajusta as médias dos alunos no pós-teste, nivelando os alunos entre si no pré-teste – mostrou diferenças significativas em favor do grupo experimental ($F = 10.6, P < 0,001$), sugerindo que a combinação entre AE e AC teve uma implicação mais forte na compreensão conceitual dos alunos do que o uso exclusivo de AE.

Em relação à análise dos pré e pós-teste³ aplicados durante a Parte C, novamente, foram encontradas diferenças estatisticamente significativa a favor dos alunos que trabalharam com atividades combinadas ($F = 13,8, P < 0,001$). Outro resultado importante mostra que a maioria dos alunos explicitou compartilhar das mesmas concepções (cientificamente aceitas ou não) antes e depois do procedimento didático adotado na Parte C. O grupo experimental apresentou apenas uma leve

¹⁶ Este tipo de análise será discutido na primeira seção do quarto capítulo, que se refere a nossa fundamentação metodológica.

tendência para as concepções científicas e um pouco menos para as não científicas, confirmando o que já é amplamente consensual na literatura de que o processo de mudança de concepções alternativas para concepções científicas não é algo trivial, e que ainda necessita de muito estudo.

O autor (Zacharia, op. cit.), tendo constatado que os alunos do grupo experimental apresentaram uma leve tendência para as concepções científicas, levanta a seguinte questão: quais fatores das AC podem ter ocasionado esta diferenciação? Apesar desse estudo não levar a uma resposta conclusiva sobre essa questão alguns comentários foram apresentados sobre o fato que as AC:

- i) tornaram os fenômenos mais visíveis para os alunos;
- ii) permitiram aos alunos a manipulação mais fácil e rápida de variáveis, comparada com a experimentação real;
- iii) propiciaram um *feedback*, principalmente, sobre os erros cometidos pelos alunos durante todo o processo de construção dos circuitos.

Concluindo a apresentação desse estudo observamos que anteriormente Zacharia se preocupou com a investigação do impacto da combinação entre AC e AE no ensino de Mecânica. Nessa área, Zacharia e Anderson (2003) investigaram o uso de simulações computacionais como preparação para as atividades desenvolvidas no laboratório didático, tendo constatado que os alunos que trabalharam com as simulações se mostraram mais capazes de fazer previsões e dar explicações cientificamente aceitas sobre fenômenos físicos presentes nos experimentos, em

comparação aos alunos que apenas resolveram problemas tradicionais sobre o conteúdo.

O terceiro estudo que abordaremos sobre integração entre AC e AE na área de Eletromagnetismo é o de Jaakkola e Nurmi (2008). Essa investigação teve o objetivo de avaliar se há vantagens em combinar AC e AE, ou se essas atividades devem ser usadas separadamente no ensino de circuitos elétricos. Participaram do estudo 66 alunos de uma escola urbana da Finlândia, com idade entre 10 a 11 anos. Os alunos estavam cursando a 4^a ou 5^a série do ensino fundamental e ainda não haviam recebido nenhuma instrução sobre Eletricidade.

O estudo teve duração de duas semanas, uma aula em cada semana. Na primeira aula, que teve a duração de 1h30min, foi aplicado um pré-teste, cujos resultados serviram para a formação de três grupos da seguinte forma. Foram identificados os três alunos com menor desempenho e de maneira aleatória eles foram designados um para cada grupo e assim por diante foram distribuídos os alunos até que cada grupo estivesse completo (22 alunos).

Na segunda e última aula, com duração de 2h, os alunos dos três grupos receberam uma instrução teórica, de aproximadamente 15 minutos, focada nos aspectos qualitativos de circuitos elétricos, para que estabelecessem relações entre as variações nos brilhos das lâmpadas e as variáveis observáveis (configurações dos circuitos e número de pilhas e lâmpadas). Na sequência, duplas foram formadas

aleatoriamente e distribuídas em três grupos. Um desses grupos recebeu *kits* de laboratório (ambiente experimental), incluindo baterias, lâmpadas, fios elétricos, interruptores e multímetros para desenvolver as atividades propostas. Outro grupo trabalhou com uma simulação computacional, em um laboratório de informática, utilizando o *software Electricity Exploration Tool* (ambiente computacional). A simulação computacional permitia construir vários circuitos, arrastando, facilmente, fios, lâmpadas e resistores para as posições desejadas. Alterações nos parâmetros do circuito (e. g. a diferença de potencial das baterias) poderiam ser realizadas, como também medidas com multímetros. De forma semelhante às simulações utilizadas nos dois estudos descritos anteriormente os alunos conseguiam observar os efeitos de suas ações e obter um *feedback* instantâneo. O terceiro grupo trabalhou no laboratório de informática e, além de poder utilizar o *software Electricity Exploration Tool*, teve a disposição o *kit* experimental (ambiente combinado - computacional e experimental). Nesse ambiente os alunos foram orientados a trabalharem primeiro com a simulação computacional e, após de terem êxito no seu uso, repetir a atividade utilizando o material experimental. Os autores estabeleceram essa dinâmica por esperarem que fosse mais fácil para os alunos descobrir os princípios teóricos com a simulação computacional e, em seguida, transferi-los para os circuitos reais e ver que as leis físicas presentes nas simulações também são aplicadas em outros ambientes.

As atividades propostas foram as mesmas para os três grupos. A primeira atividade foi simples, requerendo que os alunos construíssem um circuito com fios

elétricos, uma fonte e uma lâmpada. Na sequência, o grau de dificuldade foi aumentado, com atividades mais desafiadoras em que os alunos tinham que, por exemplo, construir um circuito em que o brilho de quatro lâmpadas deveria apresentar a seguinte relação: $A > B > C = D$. Cada grupo teve 2 horas para completar as atividades.

Os principais dados deste estudo foram extraídos da aplicação de pré e pós-teste e de uma entrevista, para a qual 20 alunos foram selecionados e solicitados a explicarem e justificarem suas próprias respostas. O pré-teste foi constituído de quatro questões: as duas primeiras para avaliar o conceito de circuito elétrico (e.g. configurações possíveis para uma lâmpada acender ou não, sentido da corrente elétrica, etc.); e as outras duas para avaliar a compreensão do conceito de diferença de potencial em associações em série e em paralelo. Para isso, foram exploradas a influência de diferentes configurações de um circuito sobre o brilho das lâmpadas presentes. No pós-teste essas quatro questões foram mantidas, e acrescentadas mais quatro, consideradas desafiadoras. Nessas questões foram inseridas mais lâmpadas, cálculos simples de diferenças de potencial e lâmpadas em associação mista. Os dados foram analisados de forma quantitativa e qualitativa.

Na análise quantitativa as respostas dos alunos nos testes foram quantificadas em 0 (zero) pontos para respostas erradas e de 0,5 a 1,0 ponto para respostas corretas. Os dados do pré-teste foram utilizados como covariáveis para o pós-teste. A comparação dos resultados entre os grupos mostrou diferenças estatisticamente

significativas a favor do grupo que trabalhou no ambiente combinado em relação aos grupos que trabalharam no ambiente experimental ou ambiente computacional ($P < 0,001$ e $P < 0,033$, respectivamente). Não houve diferenças entre os grupos dos ambientes experimental e computacional ($P > 0,05$). Adicionalmente, houve um desvio padrão maior entre as médias dos grupos que trabalharam nos ambientes computacional ou experimental do que o desvio padrão do grupo com ambiente combinado, ou seja, houve uma dispersão maior no desempenho dos alunos que trabalharam somente com AC ou AE, que pode ser um indicativo de que para alguns alunos o uso exclusivo de AC ou AE contribuiu para o aprendizado e para outros alunos não, ocasionando essa dispersão em torno da média.

Na análise qualitativa os dados das quatro questões idênticas nos dois testes foram utilizados para categorizar as respostas dos alunos em sete tipos de concepções¹⁷. A seguir apresentamos exemplos para cada uma delas. Os alunos: 1) pensam que somente com um fio elétrico é possível acender uma lâmpada (concepção primitiva); 2) imaginam que as cargas positivas se deslocam do terminal positivo da fonte até um dispositivo e que as negativas partem do terminal negativo e também se deslocam até o dispositivo e quando as cargas positivas e negativas se chocam produzem eletricidade, possibilitando o funcionamento do dispositivo (concepção de choque de corrente); 3.a) consideram que a intensidade de corrente elétrica é gradualmente consumida pelos componentes do circuito (concepção de

¹⁷ No artigo consta o termo modelos conceituais, porém preferimos substituir por concepção, pois na presente tese adotamos a aceção de Bunge (1974) para modelo conceitual, explicitada no próximo capítulo.

consumo); 3.b) acreditam que a intensidade de corrente elétrica fornecida pela fonte independe da configuração do circuito (concepção de corrente constante); 3.c) acreditam que o número de lâmpadas no circuito influencia no brilho das mesmas, independentemente da configuração do circuito (concepção de superficial); 4) indicam alguma compreensão de que a configuração do circuito afeta o brilho das lâmpadas (concepção científica preliminar¹⁸); 5) são capazes de distinguir associações em série e em paralelo e compreenderem como a configuração do circuito afeta o brilho de cada lâmpada (concepção científica). A classificação dos alunos nessas categorias evidenciou que dos 22 alunos do ambiente combinado 15 apresentaram no pós-teste a concepção científica; no ambiente de simulação computacional apenas sete, de 22 alunos, e no ambiente experimental o número de alunos foi ainda menor (quatro). A fim de obter inferências estatísticas sobre essas diferenças foi adotada uma distribuição binomial para as categorias, sendo atribuído valor 1 (um) para a categoria científica e 0 (zero) para as seis demais. Uma análise feita através do teste Qui-quadrado revelou que as diferenças de alunos categorizados na concepção científica entre os grupos do ambiente combinado e os dos ambientes experimental e computacional são estatisticamente significativas (χ^2

¹⁸ Também substituímos modelo preliminar de Ohm por concepção científica preliminar por entender que a palavra Ohm pode gerar confusão com a Lei de Ohm. É bastante comum nos livros didáticos o equívoco de que esta lei pode ser expressa matematicamente pela simples equação $V = R I$. No entanto, essa equação estabelece a relação entre as grandezas físicas: diferenças de potencial, resistência elétrica e intensidade de corrente elétrica para qualquer dispositivo resistivo em um circuito elétrico. A Lei de Ohm se refere à forma como a intensidade de corrente elétrica se comporta em um elemento resistivo do circuito a partir de uma variação na diferença de potencial. Se, mantida a temperatura constante, a intensidade de corrente elétrica apresentar uma dependência linear com a diferença de potencial aplicada sobre o dispositivo é correto afirmar que este dispositivo obedece a Lei de Ohm, mas se a dependência for de qualquer outro tipo, e. g. quadrática, o dispositivo será considerado não ôhmico, embora a equação apresentada acima continue sendo válida.

= 9,26, $p < 0,002$ e $\chi^2 = 3,39$, $P < 0,065$, respectivamente) . Novamente não houve diferenças significativas entre os grupos dos ambientes experimental e computacional ($\chi^2 = 0,786$, $P < 0,38$). Os autores destacam a potencialidade das atividades computacionais para auxiliar aos alunos na compreensão dos princípios teóricos presentes nos modelos computacionais. No entanto, a fim de promover a superação das concepções intuitivas dos alunos consideram que é necessário demonstrar através de testes que as leis e princípios presentes em uma simulação computacional também se aplicam na realidade.

Feito esse relato do conteúdo dos estudos de outros autores sobre a integração entre atividades computacionais e experimentais, passamos à nossa análise, de modo a explicitar os pontos fortes e as relações com o nosso trabalho. Os três estudos possuem um objetivo em comum com nosso estudo: a integração entre AC e AE de modo a torná-las complementares no auxílio que prestam aos alunos para atingirem uma aprendizagem conceitual satisfatória. Porém, nossos objetivos incluem também possibilitar aos alunos algumas noções de modelos científicos, pois consideramos que é essencial a discriminação entre um modelo teórico e a realidade. Para isso utilizamos as ideias de Bunge (*apud* Brandão, 2008, p. 24) de que “*a função dos modelos é justamente a de mediar a relação entre teoria e realidade*”. Voltaremos a essa discussão no próximo capítulo; de momento queremos tão somente lembrar que os modelos teóricos subjacentes à implementação das simulações computacionais possuem idealizações que podem gerar dados que não apresentam qualquer concordância com os obtidos experimentalmente e assim pode surgir uma lacuna entre

teoria e realidade. Atribuímos, em parte, o fato de que os alunos persistem repetindo o dito popular “*a teoria na prática é outra*”, sem qualquer comentário adicional ou reflexão, à inexistência, usual, de discussões sobre o contexto de validade dos modelos teóricos durante as aulas.

Outro diferencial do nosso estudo refere-se ao fato de utilizarmos explicitamente referenciais teóricos de aprendizagem e epistemológicos para conceber e aplicar tanto o material instrucional empregado, quanto a metodologia de avaliação dos dados coletados. Nos três artigos avaliados, não encontramos menções explícitas e significativas sobre o referencial teórico adotado.

Em relação ao conteúdo abordado os artigos envolvem somente circuitos simples. Nos nossos estudos, conforme relatamos na introdução, inicialmente trabalhamos com circuitos simples e do tipo RLC, na sequência incluímos circuitos de corrente alternada e no último estudo trabalhamos com todo o Eletromagnetismo.

Reconhecemos o rigor metodológico adotado nos três trabalhos na análise e no rico relato dos resultados, com detalhes importantes que dão corpo aos trabalhos (e. g. dinâmica dos procedimentos adotados; esquemas de análise e avaliação.) No entanto, o número total de horas em sala de aula, nos três estudos, não nos parece suficiente para os autores fazerem inferências qualitativas, pois uma análise qualitativa requer uma profunda imersão do pesquisador no fenômeno de interesse, que deve durar meses e não algumas semanas. O estudo de Jaakkola e Nurmi (2008) teve praticamente a

duração de apenas duas horas de aula; o de Ronen e Eliahu (2000) apenas quatro aulas, sem explicitar o total de horas em cada aula; o de Zacharia (2007) nos parece que envolveu mais aulas, mas em nenhuma parte do texto original encontramos alguma menção ao número de aulas e ao total de horas. Isto sugere que os autores dos três artigos, aqui discutidos, não atribuem o tempo de realização do estudo como uma prioridade. Consideramos que os resultados qualitativos desses estudos apresentam alguns indícios sobre a compreensão conceitual dos alunos, mas estão distante de alguma constatação de aprendizagem significativa.

Sobre o paralelo entre as metodologias de integração empregadas nos artigos e a nossa, deixamos para discutir na seção 4.3, onde fundamentamos a nossa proposta de integração. Os resultados de nossos estudos serão triangulados ao longo de cada um dos capítulos específicos para cada estudo que desenvolvemos.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresentamos a fundamentação teórica adotada na pesquisa. O embasamento teórico associado à aprendizagem está ancorado na Teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (Ausubel, 2003; Moreira, 2006) e na Teoria sócio-interacionista de Vigotski (Vygotsky, 2003; Vigotski, 2001). Sobre a construção do conhecimento científico, os três primeiros estudos foram apoiados pelo referencial de trabalho de Halloun (1996), que define a chamada modelagem esquemática. No quarto estudo passamos a adotar a visão epistemológica de Bunge (1974) sobre modelos teóricos.

3.1 A TEORIA DE APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DAVID AUSUBEL

Começamos nossa discussão sobre esta teoria destacando que nela é proposta uma explicação teórica para o processo de aprendizagem envolvendo, principalmente, a aquisição de novos significados. Para Ausubel (2003), a partir de uma teoria de aprendizagem podemos desenvolver noções defensáveis de como os fatores decisivos no processo ensino-aprendizagem podem ser manipulados com maior eficácia.

A teoria de Ausubel é uma teoria cognitiva construtivista, extremamente voltada para a aprendizagem tal como ela ocorre na sala de aula, no dia a dia da grande maioria das escolas. Para Ausubel apud Moreira (2006, p.13):

“Se tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um só conceito diria o seguinte: o fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Averigüe isso e ensine-o de acordo”.

Novos conceitos podem ser aprendidos e retidos, na medida em que conceitos relevantes e inclusivos estejam adequadamente claros e disponíveis na estrutura cognitiva do indivíduo e servindo, desta forma, como ancoradouro a novas ideias e conceitos.

3.1.1 Aprendizagem Significativa

O conceito central da teoria de Ausubel é o de aprendizagem significativa. Para Ausubel, aprendizagem significativa é aquela em que o significado do novo conhecimento resulta da interação de maneira não-arbitrária e não-literal entre uma nova informação e um aspecto especificamente relevante da estrutura de conhecimento do aprendiz, à qual Ausubel define como conceito subsunçor, ou simplesmente subsunçor. Essa interação de maneira não-arbitrária e não-literal entre conhecimentos novos e prévios é a característica-chave da aprendizagem significativa. (Moreira, *op. cit.*).

A aprendizagem mecânica é definida por Ausubel como sendo a aprendizagem de novas informações com pouca ou nenhuma interação com conceitos relevantes existentes na estrutura cognitiva. Neste caso, a nova informação é armazenada de maneira literal e arbitrária. O aprendiz não dá significados ao que aprende. No entanto, a distinção entre aprendizagem significativa e aprendizagem mecânica não é

dicotômica, pois existem casos intermediários. Como exemplo, a aprendizagem mecânica pode tornar-se inicialmente necessária quando o indivíduo adquire informações em uma área de conhecimento completamente nova; logo o indivíduo passa a possuir subsunçores que vão ficando cada vez mais elaborados e mais capazes de ancorar novas informações. (Moreira, 1999b, p.154).

Segundo Ausubel (2003) os conceitos aprendidos por simples memorização e de forma significativa são transformados e organizados de modo bastante diferente na estrutura cognitiva do aprendiz. Os conceitos aprendidos de forma significativa possibilitam a apreensão e a compreensão de vários tipos de relações significativas (como exemplo: qualitativas, derivativas, correlativas, subordinantes) e o surgimento paralelo de novos significados correspondentes. Por outro lado, os aprendidos por memorização são entidades de informações discretas e relativamente isoladas que são relacionadas com a estrutura cognitiva apenas de forma arbitrária e literal, não permitindo o estabelecimento das relações citadas. Os conceitos aprendidos por memorização mecânica, por não estarem ancorados em sistemas ideários existentes, tem possibilidade de retenção muito inferior do que os aprendidos de forma significativa.

A distinção entre aprendizagem por recepção e aprendizagem por descoberta, é feita por Ausubel, do seguinte modo. Na aprendizagem por recepção o conteúdo que deve ser aprendido é apresentado ao aluno em sua forma final. Já na aprendizagem por descoberta, o aprendiz deve em primeiro lugar descobrir este conteúdo, criando

proposições que representem soluções para os problemas suscitados, ou passos sucessivos para a resolução dos mesmos. Entretanto, a aprendizagem por recepção ou por descoberta só será significativa, na concepção ausubeliana, se o novo conteúdo incorporar-se, de forma não-arbitrária e não-literal, à estrutura cognitiva do aluno. Ausubel (2003, p.4) salienta que a linguagem é um importante facilitador da aprendizagem significativa tanto por recepção quanto por descoberta. Aumentando-se a manipulação de conceitos e de proposições, através das propriedades representacionais das palavras, e aperfeiçoando compreensões subverbais emergentes na aprendizagem significativa, clarificam-se tais significados e tornam-se mais precisos e transferíveis. Por conseguinte, a linguagem desempenha um papel integral e operativo no raciocínio e não meramente um papel comunicativo.

3.1.2 Diferenciação Progressiva e Reconciliação Integrativa

As ideias de que é preciso levar em conta o que o aluno já sabe e que os alunos precisam dar significado àquilo que apreendem foram apresentados por Ausubel na década de 60. Nos dias de hoje isso já foi incorporado nas principais teorias pedagógicas contemporâneas. Porém, os conceitos de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa, também apresentados nos anos sessenta, continuam ainda sendo um dos diferenciais da teoria de Ausubel, o que contribui, substancialmente, para utilizarmos esse referencial como um dos aportes teóricos na concepção, implementação e avaliação de nossos estudos realizados. Esse diferencial da teoria de

Ausubel talvez possa ser um dos fatores que contribuem para essa teoria ser bastante utilizada até os dias de hoje.

A diferenciação progressiva é o princípio segundo o qual as ideias mais gerais e mais inclusivas da matéria de ensino devem ser apresentadas no início do ensino para, somente então, serem progressivamente diferenciadas em seus pormenores e em suas especificidades. Ausubel baseia-se em duas hipóteses: *i)* é mais fácil para seres humanos captar aspectos diferenciados de um todo mais inclusivo previamente aprendido, do que chegar ao todo a partir de suas partes diferenciadas previamente aprendidas; *ii)* a organização do conteúdo de uma certa disciplina, na mente de um indivíduo, é uma estrutura hierárquica na qual as ideias mais inclusivas e gerais estão no topo e, progressivamente, incorporam proposições, conceitos e fatos menos inclusivos e mais diferenciados. Já a reconciliação integrativa é o princípio segundo o qual a instrução deve também explorar relações entre ideias, apontar similaridades e diferenças importantes e reconciliar discrepâncias reais ou aparentes, opondo-se à prática usual nos livros de texto, que consiste em separar ideias e tópicos em capítulos e em seções (Moreira, 2006, p. 36). Em nossa metodologia didática esses princípios são sistematicamente empregados, apresentando ao aluno, com alguma regularidade, as ideias mais gerais, especialmente na parte receptiva das aulas, e levando-o a explorar as ideias mais específicas nos trabalhos em pequeno grupo.

3.1.3 Condições para Ocorrência da Aprendizagem Significativa

Duas são as condições, segundo a Teoria de Ausubel, para ocorrência de aprendizagem significativa: *i)* o aluno deve manifestar disposição para relacionar o novo material, potencialmente significativo, de forma substantiva e não-arbitrária, à sua estrutura cognitiva; e *ii)* o material deve ser potencialmente significativo, isto é, ter estruturação lógica que possibilite que um indivíduo interessado que possua em sua estrutura cognitiva subsunçores adequados aprenda as novas informações nele contidas. Ou seja, para que o material seja potencialmente significativo para um indivíduo em particular duas condições devem ser satisfeitas: o material deve ter estruturação lógica adequada e o indivíduo possuir os subsunçores apropriados em sua estrutura cognitiva.

Essas duas condições devem ser satisfeitas simultaneamente durante os processos de ensino/aprendizagem, pois mesmo que o material seja potencialmente significativo, se a intenção do aluno for a de memorizá-lo, arbitrária e literalmente, o processo de aprendizagem, se ocorrer, será mecânico e resultará em uma aprendizagem mecânica, ou seja, a aprendizagem não será significativa. Por outro lado, se o aluno estiver disposto a aprender de maneira significativa e o material não for potencialmente significativo o processo continuará sendo mecânico (automático) e a aprendizagem também será mecânica. Ilustramos tais condições com um exemplo, envolvendo a lei de Ohm proposto pelo próprio Ausubel e apresentado por Moreira (1999a, p. 23):

“Um estudante pode aprender a lei de Ohm, a qual indica que, num circuito, a corrente é diretamente proporcional à voltagem. Entretanto, essa proposição não será aprendida de maneira significativa a menos que o estudante já tenha adquirido, previamente, os significados dos conceitos de

corrente, voltagem, resistência, proporcionalidade direta e inversa (satisfeitas estas condições, a proposição é potencialmente significativa, pois seu significado lógico é evidente), e a menos que tente relacionar estes significados como estão indicados na lei de Ohm”.

3.1.4 Evidências da Aprendizagem Significativa

A busca por evidências de aprendizagem significativa é um dos fatores mais complexos da teoria de Ausubel, pois tais evidências devem partir do próprio aluno. Na concepção de Ausubel não há sentido um professor simplesmente concluir que sua aula foi significativa a partir da sua opinião sobre tal aula sem levar em consideração indícios que os alunos durante as aulas ou nas suas avaliações estão sendo capazes de relacionar de forma substantiva os conceitos trabalhados nas aulas com suas ideias prévias. Falar-se em aprendizagem significativa só tem sentido quando os indícios forem extraídos de dados dos alunos, pois só dessa forma é possível ter alguma noção sobre as interações estabelecidas na estrutura cognitiva dos alunos durante os processos de ensino e aprendizagem. Uma avaliação é algo que pode conter vários elementos internos e externos ao processo de ensino aprendizagem (e. g. representatividade do conteúdo e fatores do contexto social do aluno, respectivamente). Dada essa complexidade, Ausubel argumenta que a avaliação da compreensão dos alunos simplesmente pedindo-lhes que digam quais os atributos de um conceito, pode resultar na obtenção de respostas apenas mecanicamente memorizadas. Argumenta, ainda, que a experiência em realizar exames faz com que os alunos se habituem a memorizar não só proposições e fórmulas, mas também causas, exemplos, explicações e maneiras de resolver problemas tradicionais. Recomenda,

então, que ao se procurar evidências de aprendizagem significativa formulem-se questões e problemas de maneira nova e não-familiar, que requeiram máxima transformação do conhecimento adquirido.

Moreira (*ibid*) inclui o ensino ao discutir a aprendizagem e a avaliação. Segundo ele, o ensino deve ser planejado de modo a facilitar a aprendizagem significativa, pois não adianta buscar evidências de aprendizagem significativa se o ensino não foi organizado e ministrado de modo a proporcionar condições favoráveis a esta aprendizagem.

No presente trabalho utilizamos a Teoria de Ausubel para conceber atividades potencialmente significativas, que apresentem estrutura lógica adequada à matéria de ensino e que levem em consideração o conhecimento prévio do aluno, de modo que eles usufruam o máximo possível dos benefícios provenientes dos recursos instrucionais. Com isso esperamos não nos deparar com resultados do tipo dos obtidos por Ronen e Eliahu (2000), nos quais o uso de simulação computacional não contribuiu para aprendizagem de alguns alunos devido ao fato destes não possuírem conhecimento prévio para interagirem significativamente com o computador. Em nossas avaliações sempre buscamos usar instrumentos de medida contendo questões não familiares, porém muitas delas apresentadas nos trabalhos em grupo, nos quais contavam com a ajuda de um professor ou tutor. No desenvolvimento de cada estudo nossas avaliações foram evoluindo e no último estudo concebemos um esquema de avaliação (descrito na seção 8.2), que consideramos apropriado para avaliação da

aprendizagem significativa no contexto de nosso projeto. Também utilizamos os princípios de diferenciação progressiva e reconciliação integradora ao aplicar um método de ensino que denominamos de método colaborativo presencial, a ser descrito no próximo capítulo.

3.2 A TEORIA SÓCIO-INTERACIONISTA DE VIGOTSKI

3.2.1 *Imitação*

A teoria sócio-interacionista de Vigotski é fundamentada na ideia de que uma criança em colaboração com um adulto sempre pode fazer mais do que sozinha. Porém não infinitamente mais, somente dentro de certos limites, determinados pelo estado de desenvolvimento e pelas potencialidades intelectuais daquela criança. Segundo Vigotski (2001, p. 329):

“Em colaboração, a criança se revela mais forte e mais inteligente que trabalhando sozinha, projeta-se ao nível das dificuldades intelectuais que ela resolve, mas sempre existe uma distância rigorosamente determinada por lei, que condiciona a divergência entre a sua inteligência ocupada no trabalho que ela realiza sozinha e a sua inteligência no trabalho em colaboração”.

Vigotski (*op. cit.*) relata que suas investigações mostram que ao resolver uma tarefa uma criança busca imitar alguém que é capaz de resolver esta mesma tarefa. Essa imitação deve encontrar-se na zona das próprias potencialidades intelectuais da criança. É preciso que a criança tenha condições de progredir do que já sabe fazer para o que ainda não sabe. Isto é considerado por Vigotski (*op. cit.*, p.329) *“o sintoma mais sensível que caracteriza a dinâmica do desenvolvimento e o êxito da criança”*. Essa

concepção de imitação estabelecida pela psicologia moderna contrapõe a concepção do senso comum de que imitação é uma atividade puramente mecânica, que considera que quando uma criança resolve um problema com ajuda, a solução não ilustra o desenvolvimento do seu intelecto. Na aceção de Vigotski o homem através de suas potencialidades intelectuais procura imitar um parceiro mais capaz em situações problemáticas e não familiares para adquirir uma estrutura cognitiva semelhante a do imitado, de modo que ele possa ser capaz de resolver futuramente sozinho.

Na teoria vigotskiana o papel de parceiros mais capazes para auxiliar alguém que ainda não é capaz de resolver certa tarefa sozinho é amplamente discutido e o conceito de imitação recebe destaque nessa discussão. Por exemplo, Vigotski (2001, p. 331) afirma que:

“O desenvolvimento decorrente da colaboração via imitação, o desenvolvimento decorrente da aprendizagem é o fato fundamental. [...] Porque na escola a criança não aprende o que sabe fazer sozinha, mas o que ainda não sabe e lhe vem a ser acessível em colaboração com o professor. O fundamental é que na aprendizagem é justamente o fato de que a criança aprende o novo.”

3.2.2 Interação social

Segundo Vygotsky (2003) o desenvolvimento cognitivo do ser humano não pode ser compreendido sem referência ao contexto social, sendo a interação social a componente principal para a transmissão dinâmica (de inter para intrapessoal) do conhecimento. O processo de desenvolvimento do pensamento não se realiza do indivíduo para o socializado, mas do social para o individual. É precisamente com o

auxílio dos problemas propostos, da necessidade que surge e é estimulada, dos objetivos colocados perante o adolescente que o meio social circundante o motiva e o leva a dar esse passo decisivo no desenvolvimento do seu pensamento (Vigotski, 2001).

No contexto de sala de aula o professor é o participante que já internalizou os significados contextualmente aceitos. E cabe a ele, em uma aula, apresentar aos alunos um conjunto de significados do contexto da matéria de ensino e os alunos devem, de alguma maneira, externalizarem ao professor os significados captados. O professor tem ainda a responsabilidade de verificar se os significados que os alunos assimilaram são aceitos, compartilhados socialmente. A responsabilidade dos alunos é verificar se os significados que captaram são aqueles ao qual o professor pretendia e se são aqueles compartilhados no contexto da área de conhecimento em questão. Para Gowin, por exemplo, o processo ensino/aprendizagem se consuma quando os alunos e o professor compartilham dos significados a respeito da matéria de ensino (*apud* Moreira, 1999b).

3.2.3 Zona de Desenvolvimento Proximal

Para Vygostky (2003) a interação social que provoca a aprendizagem deve ocorrer dentro da zona de desenvolvimento proximal ou imediato (segundo as traduções das obras de 2003 e 2001, respectivamente) e tem um papel determinante nos limites desta zona. Por definição o limite inferior é fixado pelo nível real de desenvolvimento do aprendiz. Já o limite superior é determinado por processos

instrucionais que podem ocorrer no brincar, no ensino formal ou informal e no trabalho (Driscoll, 1995, *apud* Moreira, 1999b, p. 116).

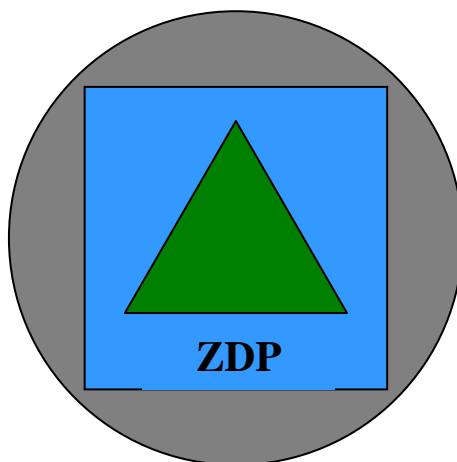
Para Moreira (*ibid.*):

“O conceito de zona proximal é definido como a distância entre o nível de desenvolvimento cognitivo real do indivíduo, tal como medido por sua capacidade de resolver problemas independentemente, e o seu nível de desenvolvimento potencial, tal como medido através da solução de problemas sob orientação (de um adulto, no caso de uma criança) ou em colaboração com companheiros mais capazes”.

Na Figura 11 ilustramos o conceito de zona de desenvolvimento proximal. Na área preenchida com a cor verde encontram-se os problemas que o aluno é capaz de resolver sozinho (desenvolvimento atual), de modo que atividades de ensino que se situam nessa zona não propiciam ao aluno aquisição de novos significados. Na área de cor azul encontram-se os problemas que o aluno necessita de algum auxílio (zona de desenvolvimento proximal). Nessa zona a aprendizagem antecede o desenvolvimento e conduz o aluno para a aquisição de novos significados. Mas Vigotski (2001) alerta que a aprendizagem só é viável onde é possível a imitação. Sugere que deve começar com o que ainda não está maduro no aprendiz, pois investigações realizadas revelam que todo objeto de aprendizagem escolar se constrói sobre um terreno ainda não amadurecido. Por isso, ele defende que a aprendizagem e o desenvolvimento não coincidem imediatamente, mas são dois processos que estão em complexas inter-relações, argumentando que aquilo que a criança é capaz de fazer hoje em colaboração conseguirá fazer amanhã sozinha. A área cinza da Figura 11 representa atividades que extrapolam a capacidade dos alunos em desenvolvê-las até mesmo com o auxílio de

parceiros mais capazes, restando-lhes no máximo a alternativa de uma aprendizagem mecânica. Vigotski (*op. cit.*, 336) complementa que “*Ensinar uma criança o que ela não é capaz de aprender é tão estéril quanto ensiná-la a fazer o que ela já faz sozinha*”.

Figura 11 – Ilustração do conceito de zona de desenvolvimento proximal (ZDP).



No presente trabalho utilizamos especificamente da teoria de Vigotski os conceitos de zona de desenvolvimento proximal e de interação social para embasarem um método que denominamos colaborativo presencial, que será discutido no próximo capítulo.

3.3 MODELAGEM ESQUEMÁTICA

Halloun (1996) desenvolveu um referencial de trabalho para modelagem que pode ser sistematicamente aplicado na solução de problemas paradigmáticos, definidos como problemas que possuem características especiais cuja solução não pode ser obtida por aplicação direta de fórmulas e substituição de valores numéricos, podendo incluir questões abertas. A solução de tais problemas requer que os alunos reflitam sobre suas próprias concepções sobre os sistemas físicos, sendo propícios para a

aprendizagem significativa. A modelagem esquemática de Halloun se processa em cinco estágios não-hierárquicos: seleção, construção, validação, análise e expansão. Na solução de um problema paradigmático, o primeiro estágio do processo consiste na seleção de um modelo científico de um repertório de modelos familiares de uma teoria específica. A seleção é guiada pelo domínio do modelo, o objetivo da modelagem (i.e., do problema) e a validade dos resultados esperados (incluindo aproximações e precisão dos resultados). Então, formula-se a solução do problema construindo um modelo matemático que leve em conta os parâmetros relevantes, as condições iniciais, os vínculos, enfim um modelo que pode ser processado, analisado e validado continuamente, de modo a se avaliar se ele conduz a uma solução aceitável para o problema em estudo. Estes estágios intermediários de construção, validação e análise sobrepõem-se e alguns destes passos ocorrem concomitantemente. A expansão do modelo inclui a descrição ou predição de novas situações referentes ao mesmo sistema em estudo, ou implicações em outros sistemas de referência do modelo, assim como extrapolação para a construção de novos modelos.

Nos três primeiros estudos utilizamos as ideias de Halloun sobre modelagem esquemática para conceber as atividades, visando à proposição de situações-problema cuja solução não pode ser obtida por aplicação direta de fórmulas. Assim como Araujo, Veit e Moreira (2008), consideramos o computador como um elemento potencialmente facilitador para o desenvolvimento dos estágios de construção, validação, análise e, eventualmente, expansão do modelo. No quarto estudo decidimos nos ancorar em uma epistemologia contemporânea, em vez de um referencial de

trabalho, como é o de Halloun. Optamos pela visão epistemológica de Bunge (1974), particularmente sobre modelos teóricos, descrita brevemente a seguir, porque esta visão envolve, principalmente, a análise do contexto de validade de modelos teóricos, que nos é útil para estabelecer um vínculo entre os dados experimentais e teóricos (obtidos a partir da interação com computador).

3.4 VISÃO EPISTEMOLÓGICA DE MARIO BUNGE SOBRE MODELOS TEÓRICOS

Bunge é um epistemólogo realista crítico. Para ele a experiência é um pequeno conjunto de fatos observáveis de um universo de fatos reais e os físicos trabalham com alguns fatos reais, observáveis ou não, estendendo seu trabalho sobre fatos inteiramente imaginários – assumidos falsamente como fatos (Figura 12).

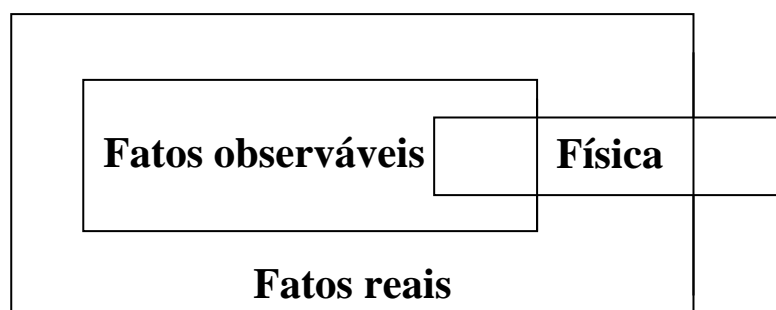


Figura 12 – Visão de Bunge sobre a Física (Bunge, 1974, p. 181).

A respeito das teorias científicas, Bunge (1974, p. 124) argumenta que “*são sistemas hipotéticos (proposições corrigíveis) que contêm conceitos extralógicos que vão além de um universo específico, isto é, que se referem a um assunto definido*”. Também argumenta que tanto as teorias quanto seus referentes podem ser comparados a dispositivos em formas de caixas com variáveis externas e internas. As externas

representam propriedades observáveis (e. g. a posição e a velocidade de algum corpo em movimento), enquanto as internas correspondem a peças “dentro” da caixa (e. g. tensão elástica e peso atômico). O propósito dos físicos teóricos pode influenciar na construção e funcionalidade de uma caixa (teoria), pelo menos em dois aspectos: *i)* se apenas as variáveis externas do tipo entrada-saída forem manipuladas a finalidade é a obtenção de teorias do tipo fenomenológicas (caixa preta), em que se busca descrever o comportamento da caixa apenas pela observação e *ii)* se além da manipulação das variáveis externas se busca desenvolver um hipotético mecanismo interno descrito por meio das variáveis internas a finalidade é a obtenção de teorias representacionais (caixa translúcida), em que se busca uma descrição profunda dos processos internos por meio de variáveis indiretamente controladas. Bunge (*op. cit.*, p. 69) explicita uma série de exemplos de teorias do tipo caixa preta e para alguns desses exemplos menciona a correspondente caixa translúcida, conforme transcrito abaixo:

- i) “Cinemática, ou estudo do movimento sem levar em conta as forças envolvidas – estudo que fica a cargo da dinâmica, uma teoria típica de caixa translúcida;*
- ii) Óptica Geométrica, ou a teoria dos raios luminosos, que não faz suposição acerca da natureza e estrutura da luz, um problema abordado pela óptica física, uma teoria representacional;*
- iii) Termodinâmica, que não faz suposição sobre a natureza e o movimento dos constituintes do sistema, um problema tratado pela Mecânica Estatística, que é uma teoria da caixa translúcida;*
- iv) Teoria do Circuito Elétrico, na qual cada elemento em um circuito é tratado como unidade despida de estrutura interna; tal estrutura é o objeto da teoria dos campos e da teoria do elétron;*
- v) Teoria da Matriz de Espalhamento, na Física nuclear e atômica que enfoca as características mensuráveis dos fluxos de partículas que entram e que saem; a correspondente teoria da caixa translúcida é a usual teoria quântica hamiltoniana, cujos postulados definem as interações entre partículas;*

- vi) *Cinética Química Clássica, que lida com a velocidade de reação e evita a questão dos mecanismos de reação;*
- vii) *Teoria da Informação, que ignora a espécie e a estrutura dos elementos implicados (transmissor, canal, etc.)bem como o significado das mensagens transmitidas;*
- viii) *Teoria da aprendizagem na psicologia behaviorista que evita qualquer referência a mecanismos filosóficos e estados mentais”.*

Para Bunge, segundo Brandão (2008, p. 24), a concepção de modelo é fundamental, pois apesar das teorias científicas desempenharem um papel essencial, não se aplicam diretamente à realidade, por se tratarem de abstrações criadas através da intuição e da razão dos cientistas. Na outra extremidade, encontram-se os dados empíricos, que embora próximos da realidade não geram conhecimento por si só, sendo o papel dos modelos de estabelecer um vínculo entre teoria e experimento. Na aceção de Bunge (1974, p.20) há pelo menos dois sentidos para o termo modelo nas ciências teóricas: *“o modelo enquanto representação esquemática de um objeto concreto e o modelo enquanto teoria relativa a esta idealização”*. O primeiro sentido Bunge denomina de objeto modelo ou modelo conceitual, que em alguns casos pode ser representado graficamente. O segundo representa o que é definido como modelo teórico ou teoria específica, constituindo-se em um sistema hipotético-dedutivo que pertence a um objeto modelo, que é, por sua vez, uma representação esquemática de uma coisa ou de uma situação real ou suposta como tal.

Para Bunge (*op. cit.*) o único método eficaz para representar a realidade pelo pensamento é converter sistemas físicos em imagens conceituais e expandir em modelos teóricos progressivamente complexos e mais fiéis aos fatos. Por isso, ele defende que a busca pela conquista conceitual da realidade deve começar por

idealizações, para, então, adicionar elementos imaginários (ou hipotéticos) com intenção realista e assim constituir um objeto modelo/modelo conceitual, que inserido em uma teoria geral pode gerar um sistema hipotético-dedutivo particular (modelo teórico/teoria específica). Os modelos conceituais têm a função de representar esquematicamente traços-chave de sistemas físicos e os modelos teóricos de especificar o comportamento e/ou mecanismos internos de sistemas físicos particulares. Os modelos teóricos são capazes de representar completamente modelos conceituais, que são seus referentes diretos e, devido às idealizações, de representar de forma parcial as particularidades de sistemas físicos, que são os referentes diretos dos modelos conceituais. Desta forma, resultados empíricos, ao lado de hipóteses teóricas geradas a partir de modelos teóricos, proporcionam alguma evidência acerca dos contextos de validade dos modelos teóricos, isto é, o grau de precisão em que os traços-chave selecionados para construção do modelo conceitual são capazes de representar o sistema físico como um todo.

O mapa conceitual da Figura 13 representa nossa interpretação sobre as ideias acima expostas, ilustrando-as com um circuito RLC. O objeto modelo consiste de um resistor, um indutor e um capacitor associados em série por fios elétricos. No objeto modelo admite-se que os fios elétricos e o indutor possuem resistência desprezível e o resistor é ôhmico e desprezam-se efeitos de radiação. Inserido no Eletromagnetismo, este esquema conceitual dá origem ao modelo teórico baseado em uma equação diferencial de segunda ordem que descreve as oscilações eletromagnéticas do circuito idealizado.

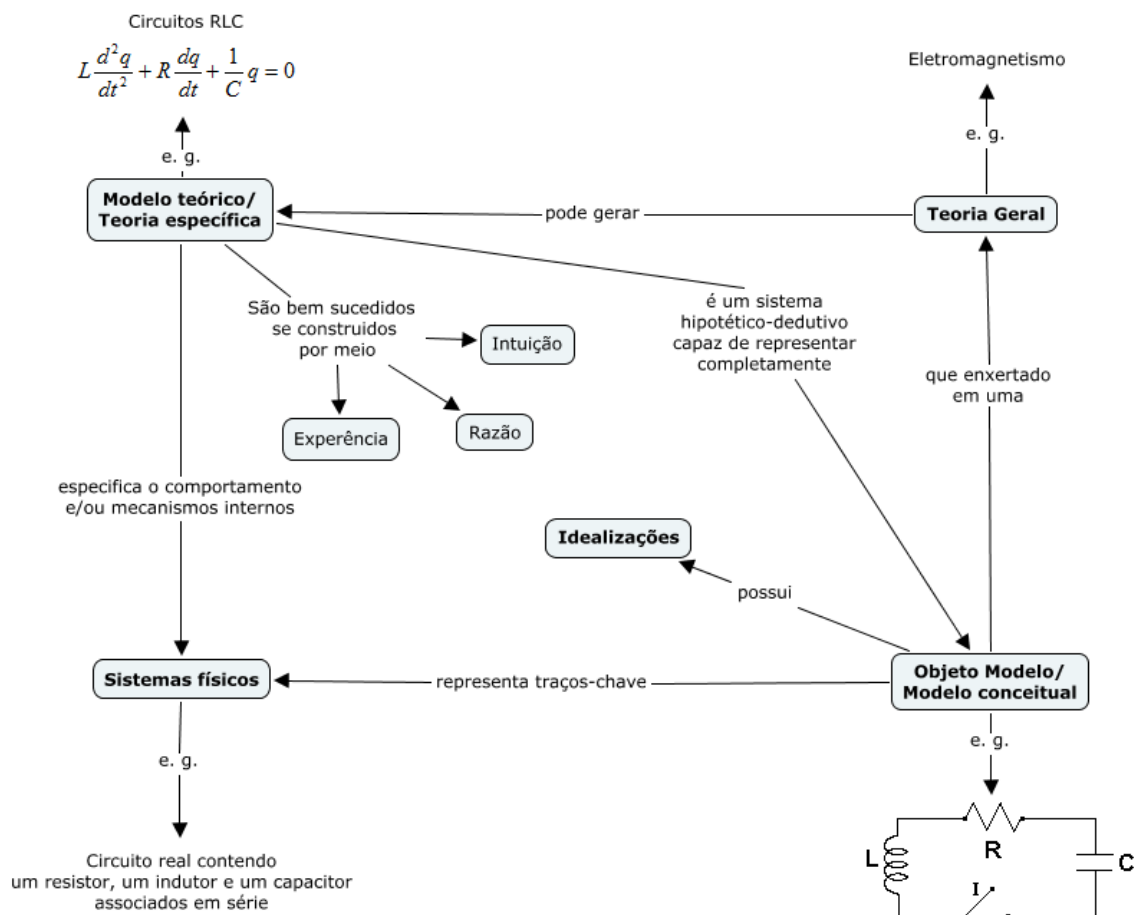


Figura 13 – Mapa conceitual relacionado à concepção de Mario Bunge sobre modelos teóricos, exemplificado com um circuito RLC.

No quarto estudo utilizamos essas ideias de Bunge para conceber atividades que propiciem a exploração dos contextos de validade dos modelos teóricos subjacentes às simulações computacionais. A seguir passamos a descrever a fundamentação metodológica adotada.

CAPÍTULO 4

FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA

Neste capítulo apresentamos a fundamentação metodológica adotada na presente tese. No primeiro estudo, adotamos uma metodologia predominantemente quantitativa (Campbell e Stanley, 1979), que é apresentada na primeira seção. Nos demais estudos passamos a adotar uma metodologia qualitativa do tipo estudo de caso (Yin, 2005), apresentada na segunda seção, e, na terceira, a nossa metodologia didática.

4.1 METODOLOGIA QUANTITATIVA

O estudo em que utilizamos metodologia quantitativa foi desenvolvido segundo um delineamento quase-experimental¹⁹ do tipo 10, segundo notação de Campbell e Stanley (1979), no qual se tem um grupo de controle não-equivalente e um grupo experimental (Tabela 9).

Tabela 9 – Delineamento do estudo quantitativo. (Adaptado de Campbell e Stanley, 1979.)

Grupo	Delineamento
Experimental	O ₁ X O ₂
Controle	O ₁ O ₂

O₁ = Pré-teste
O₂ = Pós-teste
X = Procedimento didático

Neste delineamento inicialmente se aplica um pré-teste em ambos os grupos. Em um dos grupos (grupo experimental) é realizado um procedimento didático (variável X) e no grupo de controle não. Após, aplica-se um pós-teste em ambos os grupos, já que diferenças entre os resultados do pré e pós-testes em ambos os grupos podem fornecer evidências sobre o efeito do procedimento didático.

¹⁹ Neste caso, os grupos constituem turmas de alunos reunidos naturalmente.

Para verificar se a diferença entre as médias dos grupos é estatisticamente significativa as principais possibilidades são: um teste de diferenças de médias para grupos independentes, utilizando a variável ganho (diferença na pontuação entre o pré-teste e o pós-teste) ou a análise de Variância e Covariância, ou seja, análise de regressão. Optamos por comparar os grupos com uma Análise de Variância e Covariância - ANOVA/ANCOVA – (Finn, 1997). Este procedimento corrige (ajusta por regressão) os escores do pós-teste, equiparando os sujeitos entre si nos escores do pré-teste, ou seja, calcula por regressão quais seriam os escores no pós-teste caso não houvesse diferenças entre os indivíduos no pré-teste (consequentemente não houvesse também diferença em média entre os dois grupos). Os resultados do uso da ANOVA/ANCOVA apresentam as médias ajustadas no pós-teste para os dois grupos, e também a razão F de Snedecor (através da qual é obtido o nível de significância estatística) para a diferença entre as duas médias e o nível de significância estatística desta diferença.

Nos testes utilizados como pré e pós-teste realizamos uma análise de consistência interna, para estimar o coeficiente de fidedignidade do escore total e identificar, se for o caso, itens que devem ser excluídos porque não se correlacionam com os demais. O coeficiente de fidedignidade de um instrumento refere-se à estabilidade, à reprodutibilidade, à precisão das medidas com ele obtidas, i. e., ao grau de consistência dos valores medidos. Uma maneira de se estimar o coeficiente de fidedignidade é decompondo a variância do escore total em uma parcela atribuída ao que há de comum entre os escores parciais e outra parte, ao erro da medida. A

estimativa desta parcela fidedigna comum aos itens do teste pode ser quantificada pelo coeficiente alfa de Cronbach (Cronbach, 1951, *apud* Moreira e Silveira, 1993). O valor mínimo aceitável para um coeficiente de fidedignidade dependerá da utilização que se fará com os escores gerados pelo instrumento. Quando se deseja utilizar os escores gerados pelo instrumento para comparar grupos em médias, como no presente caso, pode-se tolerar coeficientes da ordem de 0,7 (*op. cit.*, p.83).

4.2 METODOLOGIA QUALITATIVA

A partir do segundo estudo passamos a adotar uma metodologia predominantemente qualitativa do tipo estudo de caso. Segundo Yin (Yin, 2005) um estudo de caso é uma investigação empírica que: *i)* investiga um fenômeno contemporâneo dentro do seu contexto de vida real; *ii)* mostra-se adequada quando as questões de pesquisa são do tipo “como?” e “por quê?”; *iii)* pode se beneficiar do desenvolvimento prévio de proposições norteadoras²⁰; *iv)* enfrenta uma situação tecnicamente única em que haverá muito mais variáveis de interesse do que pontos de dados e *v)* se baseia em várias fontes de evidências (por exemplo, entrevistas e observações direta e participante).

Para Yin os principais componentes de um projeto de estudo de caso são: as questões de pesquisa, as proposições norteadoras, se houver, a(s) unidade(s) de

²⁰ Substituímos a expressão proposição teórica empregada por Yin por proposição norteadora porque no nosso trabalho conferimos o status de teoria apenas a sistemas hipotéticos-dedutivos coerentes, já aceitos por uma comunidade científica.

análise, a lógica que une os dados às proposições e os critérios para interpretar as constatações. Em relação às proposições, Yin (*idem*) argumenta que elas, além de refletirem questões teóricas importantes, direcionam a atenção do investigador ao que deve ser investigado dentro do propósito do estudo.

Um estudo de caso pode envolver um único indivíduo ou uma única instituição (caso único), mas também pode envolver um grupo de indivíduos ou várias instituições (casos múltiplos). Por exemplo, pacientes clínicos, alunos de uma turma, escolas, empresas, etc. Em ambos os casos cada indivíduo ou instituição será a unidade primária de análise. No método de estudo de casos múltiplos para cada caso o relatório individual deve indicar como e por que se demonstrou (ou não) uma proposição. Os casos devem seguir a lógica da replicação – prever resultados semelhantes ou produzir resultados contrastantes apenas por razões previsíveis. No caso de haver um achado ou constatação durante a realização de um estudo de caso individual é necessário reformular uma ou mais das proposições norteadoras iniciais, como ilustrado pela linha pontilhada Figura 14. Se o achado for ignorado ou distorcido para acomodar o projeto original, corre-se o risco de o estudo receber a crítica de que os dados foram adaptados a ideias preconcebidas (Yin, *ibidem*).

Segundo Yin, estudos de casos podem apresentar propósitos diferentes, sendo os principais: descritivo, exploratório e explanatório. Um estudo descritivo tem o objetivo de descrever uma intervenção dentro do contexto em que ela ocorreu. O exploratório busca um levantamento de hipóteses ou proposições norteadoras para

embasarem pesquisas futuras. Nesses estudos, geralmente, a intervenção que está sendo investigada não apresenta um conjunto simples e claro de resultados. Já o explanatório tem o objetivo de explicar relações de causa e efeito a partir de proposições norteadoras.

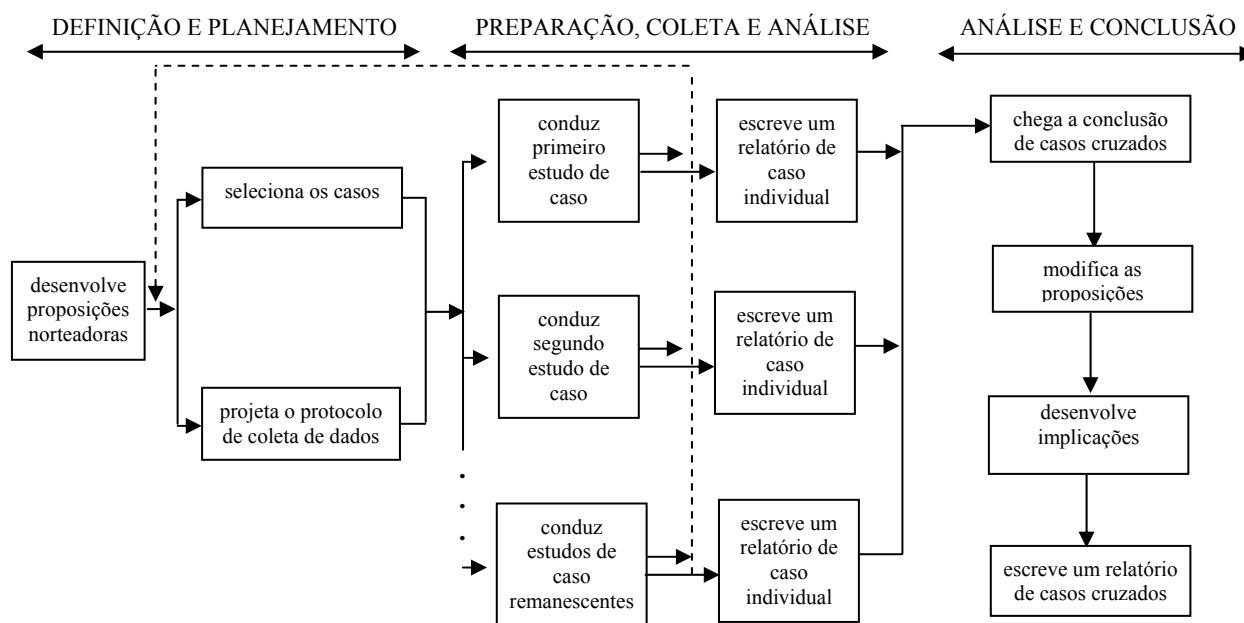


Figura 14 – Estratégia de estudo de casos múltiplos explanatórios segundo Yin (2005, p. 72). Na figura original consta proposições teóricas em vez de norteadoras.

Classificamos o segundo e o terceiro estudo realizado no âmbito desta tese como exploratórios e o quarto estudo do tipo explanatório de casos múltiplos (cada aluno constitui-se em um caso) conforme passamos a descrever nos próximos capítulos.

4.3 METODOLOGIA DIDÁTICA

Nessa seção damos destaque à nossa metodologia didática. Com o objetivo de conceber uma metodologia que se caracterize pela participação ativa dos alunos, utilizamos um método que denominamos de método colaborativo presencial²¹, ancorado nos princípios de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa propostos por Ausubel (2003) e na interação social, por Vigotski (Vygotsky, 2003; Vigotski, 2001). Inspirados na diferenciação progressiva, apresentamos na primeira parte de cada aula uma exposição inicial, de aproximadamente 30 min, sobre os conceitos físicos mais gerais envolvidos na matéria de ensino, para serem progressivamente diferenciados em termos de detalhes e especificidades durante o restante da aula, com a participação ativa dos alunos reunidos em pequenos grupos. A reconciliação integrativa é feita no início da aula seguinte, quando os resultados atingidos na aula anterior são comentados pelo professor e discutidos no grande grupo.

A fim de promover uma interação social que propicie aprendizagem, após a exposição inicial, nas aulas que envolvem o uso do computador os alunos recebem um guia impresso contendo questões dissertativas a serem respondidas em pequenos grupos. Nas demais aulas, após a exposição inicial do professor, os alunos resolvem em pequenos grupos problemas do livro-texto (Halliday, Resnick e Walker, 2003). Ao final de cada aula os alunos são solicitados a entregar uma única solução por grupo das questões respondidas para fins de avaliação formativa. Com a exigência de uma única solução por grupo esperamos promover a negociação de significados entre os alunos.

²¹ Esse método tem sido implementado ao longo do tempo nas aulas teóricas ministradas pelo Prof. Marco Antonio Moreira, co-orientador do presente trabalho.

Para promover o engajamento cognitivo e a interatividade dos alunos, entre si e com os recursos instrucionais, concebemos os guias segundo um método que denominamos de PIE – Predizer, Interagir e Explicar – adaptado do método POE – Predizer, Observar e Explicar – proposto por Tao e Gunstone, (1999). No PIE, inicialmente são apresentadas perguntas sobre a evolução de determinada situação física e os alunos são convidados a *predizer*, antes de qualquer interação com o recurso computacional, o que acontecerá. A seguir os alunos devem *interagir* com a simulação computacional para gerarem resultados e então avaliarem o que efetivamente ocorre e, finalmente, devem *explicar* as divergências e convergências de suas previsões em relação ao que foi observado. Por exemplo: inicialmente os alunos eram solicitados a *predizer* o que acontece com as intensidades dos brilhos das lâmpadas *L1*, *L2*, *L3* e *L4* ao fechar as chaves A-B e C-D no circuito mostrado na Figura 15. A seguir, os alunos tinham a possibilidade de *interagirem* com uma simulação computacional para gerar resultados e então avaliarem o que efetivamente ocorre e, finalmente, *explicarem* as divergências e convergências de suas previsões em relação ao que foi observado.

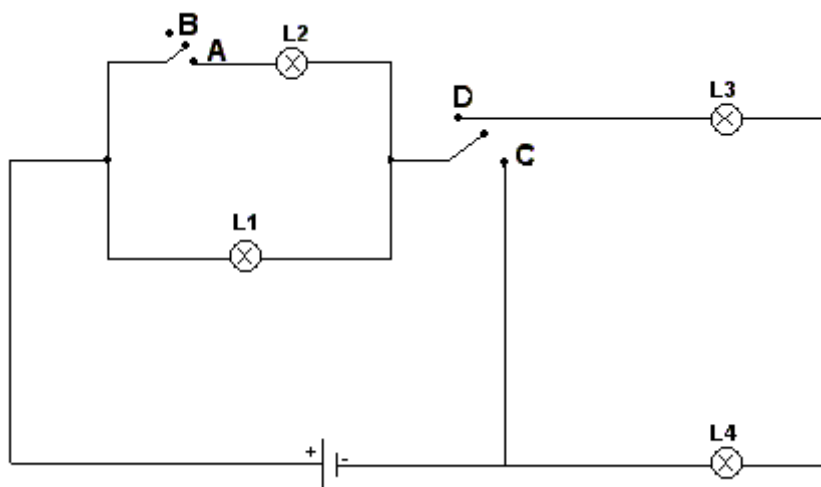


Figura 15: Diagrama de um circuito elétrico simples com associação mista de lâmpadas.

Em relação à integração entre as atividades computacionais e experimentais, nos estudos exploratórios 2 e 3, testamos diferentes possibilidades, que serão discutidas juntamente com os resultados de tais estudos. Aqui apresentamos a que consideramos a mais indicada e por isso usamos no último estudo. A dinâmica das aulas com AC e AE envolve dois momentos. No primeiro, como preparação para a parte experimental, os alunos trabalham somente com o computador, cuja finalidade é contribuir para que coloquem em teste suas concepções e recebam um *feedback* sobre os seus entendimentos acerca dos conceitos e procedimentos teóricos apresentados pelo professor durante a introdução inicial, ou seja, um complemento da aula teórica.

No segundo momento os alunos realizam um experimento real e exploram uma simulação sobre o experimento, para responderem questões conceituais presentes em guias impressos. As questões que os alunos respondem utilizando os materiais experimentais não são as mesmas respondidas no primeiro momento com o computador. Nesse momento propomos questões com um grau de dificuldade maior (e. g., encontre experimentalmente a resistência interna de uma fonte real; obtenha a constante de tempo capacitiva de um circuito RC). Dessa forma os alunos são desafiados, por exemplo, a manipularem objetos reais, delinearem procedimentos experimentais, proporem e testarem previsões. Atribuímos às AC o papel de propiciarem uma visualização mais geral e imediata dos experimentos para os alunos, o que favorece a proposição de “experimentos conceituais” – do tipo: se eu alterar aqui vai acontecer aquilo...; ... se eu medir isso vou conseguir obter o valor de... . Em alguns casos o computador também pode ser utilizado pelos alunos para analisarem os dados

experimentais simultaneamente à realização das experiências. Sempre que possível desejamos instigá-los a discriminarem sistemas reais e ideais.

Apresentamos um exemplo de uma das atividades desenvolvidas envolvendo associações de resistores em paralelo para ilustrar o tipo de integração que propomos. Inicialmente os alunos devem prever o comportamento das correntes elétricas I_1 , I_2 , I_2 e I_3 , ao fechar a chave A-B no circuito mostrado na Figura 16. A seguir, interagem com a simulação (Figura 17) para gerarem resultados que possibilitem perceber que I_1 , I_2 e I_3 permanecem constantes ao inserir ou retirar o quarto resistor do circuito. Na sequência os alunos devem montar um circuito elétrico real com duas lâmpadas associadas em paralelo e explicar porque neste caso ao inserir uma terceira lâmpada em paralelo a intensidade de corrente elétrica em todas as lâmpadas é alterada (Figura 18), enquanto que na simulação não ocorre alteração. Para auxiliá-los a perceberem o que interfere nos resultados experimentais, fornecemos uma simulação (Figura 19) que propicia uma visualização geral de um circuito com fonte real. À medida que eles interagem com a simulação têm a chance de perceber que quando a fonte do circuito é real, ao se inserir outro resistor em paralelo, a diferença de potencial em cada resistor se altera. Essa alteração é maior, quanto maior a intensidade de corrente elétrica no circuito, pois maior é a queda da diferença de potencial devido à resistência interna da fonte. Finalmente, devem captar que se a resistência interna da fonte for muito menor que a resistência equivalente, a influência da resistência interna será mínima e o modelo computacional com uma fonte ideal poderá representar com maior grau de precisão o circuito real.

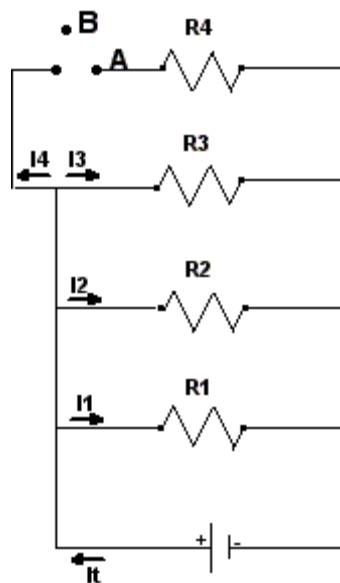


Figura 16 – Diagrama de um circuito elétrico simples com resistores associados em paralelo.

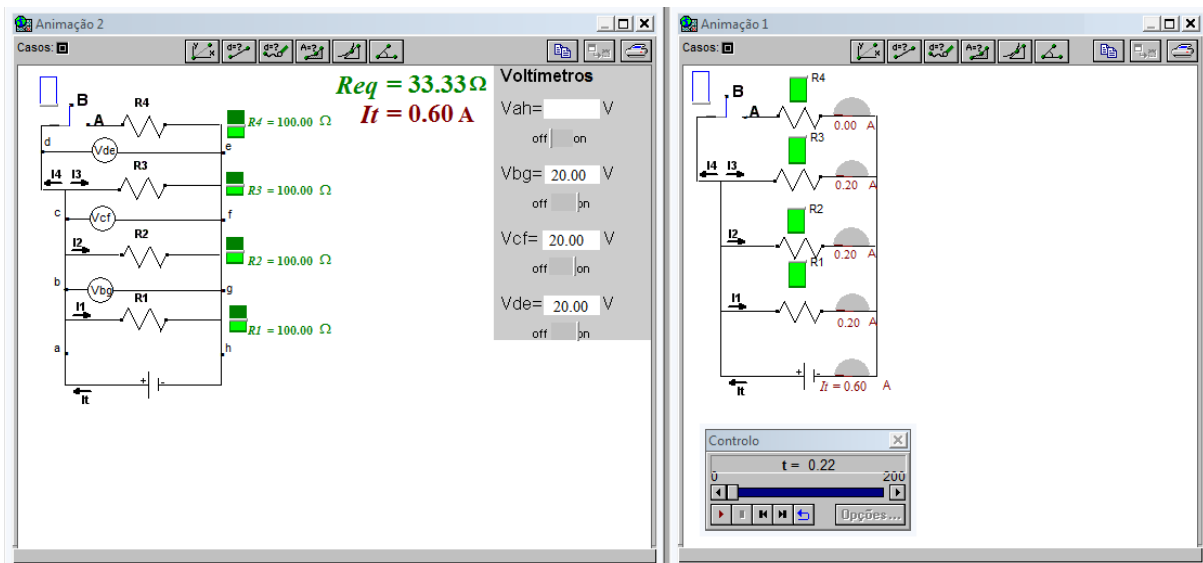


Figura 17 – Janelas animação 1 e 2 de uma simulação computacional sobre um circuito com fonte ideal e lâmpadas associadas em paralelo.

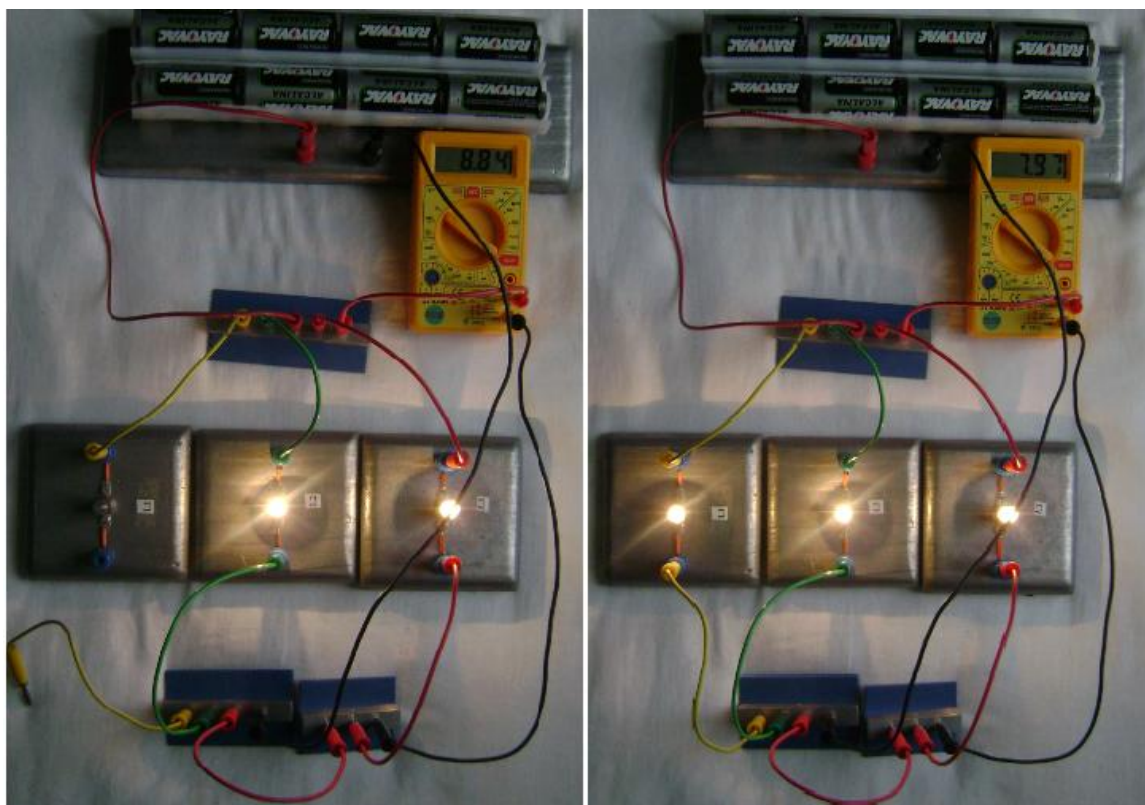


Figura 18 – Circuito elétrico real com lâmpadas associadas em paralelo. No multímetro é medida a diferença de potencial em cada lâmpada. Na foto da esquerda com duas lâmpadas conectadas a diferença de potencial no multímetro é igual a 8,84V e na da direita, com três lâmpadas, é igual a 7,97V.

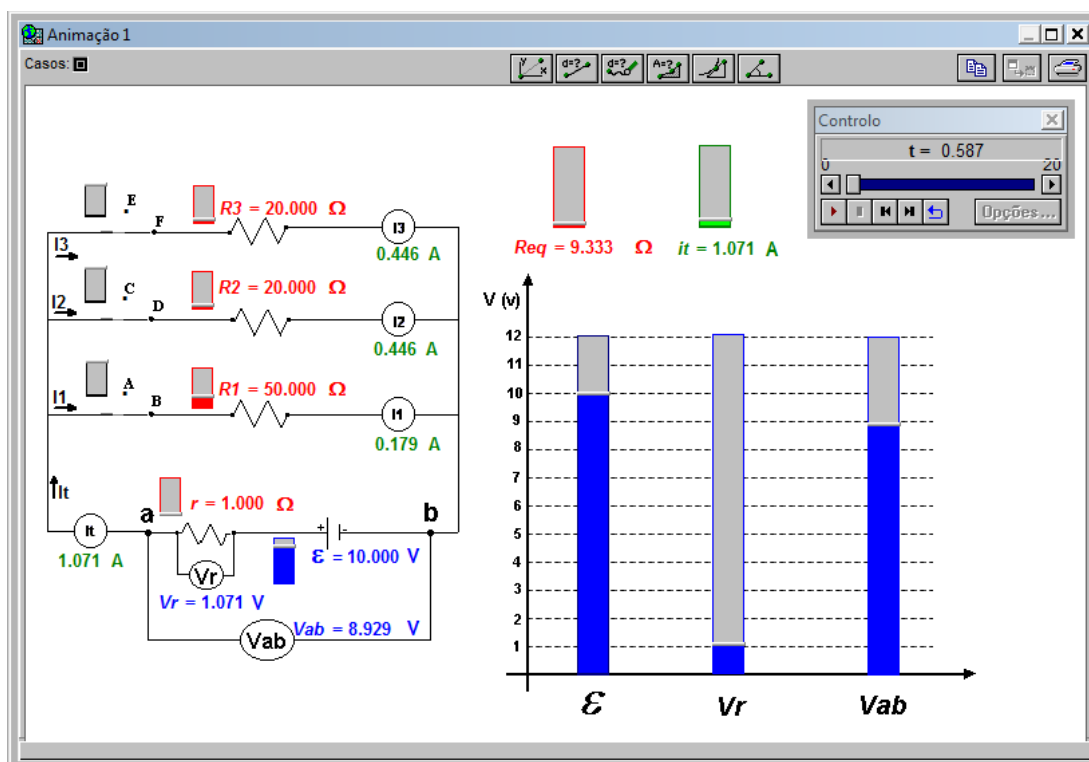


Figura 19 – Janela animação de uma simulação computacional sobre um circuito com fonte real.

O primeiro momento de nossa proposta se assemelha ao ambiente combinado proposto por Jaakkola e Nurmi (2008), pois compartilhamos da concepção de que o uso de atividades computacionais anterior ao uso de atividades experimentais pode auxiliar os alunos a utilizarem princípios teóricos ao interagirem com os recursos experimentais.

Concluimos essa seção esclarecendo a distinção que fazemos entre atividades de simulação e de modelagem computacionais, já que na literatura essa distinção não é consensual. Usamos como critério para distinguir esses dois tipos de atividades o nível de acesso que os estudantes têm aos elementos mais básicos que constituem o modelo computacional. Em nossa acepção, em atividades de simulação computacional o estudante tem autonomia para inserir valores iniciais para variáveis, alterar parâmetros, mas não tem autonomia para modificar o cerne do modelo computacional, ou seja, acesso aos elementos mais básicos, matemáticos ou icônicos, que o constituem. Em atividades de modelagem computacional, além de poder atuar sobre a variação de parâmetros e valores iniciais, o estudante tem acesso a esses elementos básicos. Quanto ao modo de utilização dos recursos computacionais, as atividades de modelagem computacional costumam ser classificadas em dois modos: exploratórias e expressivas (ou de criação). Nas atividades exploratórias, o sujeito trabalha com versões computacionais de modelos científicos e representações (gráficos, animações, tabelas, diagramas,...) elaborados por outros, explorando-os sob as mais diversas perspectivas, com o objetivo de se familiarizar com estas representações, de aguçar a percepção e compreensão das relações existentes entre as diversas variáveis

envolvidas, bem como entre a matemática, subjacente ao modelo, e o fenômeno físico em questão. Nas atividades expressivas, o sujeito constrói seus próprios modelos computacionais e cria formas para representá-los. Destacamos que no presente trabalho as atividades que concebemos e utilizamos são predominantemente atividades de simulação computacional.

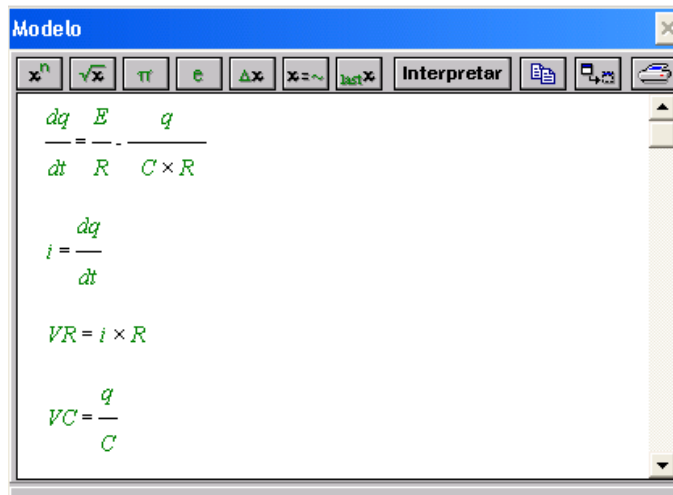
Nossa expectativa inicial era de utilizarmos tanto atividades no modo exploratório quanto no modo expressivo, mas já no primeiro estudo encontramos dificuldades na implementação das atividades expressivas. Como nossos estudos foram realizados em situações reais de sala de aula necessariamente tínhamos que seguir o plano de ensino da disciplina e assim cumprir o conteúdo programático e avaliar os alunos de forma padronizada. Em relação ao conteúdo observamos que os alunos necessitam de mais tempo para desenvolver atividades expressivas em comparação às exploratórias, o que compromete a abordagem de todo o conteúdo da disciplina. Outro fator que prejudica atividades no modo expressivo é que o tempo para os alunos completarem a tarefa é muito variável, dependendo consideravelmente da forma de trabalho de cada dupla. Em algumas circunstâncias observamos que uma dupla levou quase uma aula para concluir o que outras realizaram em 10 ou 15 minutos. Isto dificulta muito a dinâmica da aula, pois os alunos que já completaram a atividade acabam se distraindo com outras coisas e o restante da aula se torna improdutivo para esses alunos, enquanto que para os demais é fundamental o professor propiciar mais tempo e auxílio para não desmotivá-los. (Também costuma haver variação no tempo necessário para cada grupo terminar a tarefa no modo exploratório,

mas as variações são bem menores do que no modo expressivo.) Essa diversidade entre as duplas no modo expressivo nos colocou frente a outro problema: como avaliar os alunos, pois as atividades concebidas, frequentemente, são bastante distintas. Em alguns casos diferem, em parte, até de nossos modelos já construídos com o objetivo de utilizá-los como parâmetro para avaliação, tornando difícil a realização de uma avaliação padronizada.

Salientamos que encontramos essas dificuldades mesmo tendo escolhido um *software (Modellus)* que possui uma sintaxe de escrita muito simples, praticamente a mesma que se usa para escrever um modelo no papel, facilitando a construção de modelos computacionais pelos próprios alunos. Cientes de que no estudo de Eletromagnetismo os alunos poderiam apresentar dificuldades para identificar e escrever o modelo matemático subjacente à implementação da atividade computacional, principalmente nos casos que envolvem equações diferenciais, apresentávamos um modelo pronto de um sistema físico semelhante ao sistema específico proposto aos alunos para a construção da simulação. Por exemplo, apresentamos para os alunos um modelo pronto de um circuito RC (Figura 20), para que compreendessem e o modificassem de modo a torná-lo adequado para um circuito RL.

Concluimos essa discussão sobre o tipo de atividades computacionais destacando que não estamos aqui fazendo uma argumentação a favor das atividades de simulação computacional, mas um relato das principais dificuldades que encontramos

ao implementar a modelagem computacional em sala de aula. Consideramos que as atividades de criação são bastante úteis para promover um ambiente interativo e propício para aprendizagem significativa, mas que questões como tempo e avaliação dos alunos devem ser levadas em conta na proposição destas atividades.



The image shows a screenshot of a software window titled "Modelo". The window has a blue title bar and a toolbar with various mathematical symbols and functions. The main content area displays the following equations in green text:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{E}{R} - \frac{q}{C \times R}$$
$$i = \frac{dq}{dt}$$
$$VR = i \times R$$
$$VC = \frac{q}{C}$$

Figura 20 – Tela ilustrativa da janela Modelo de um modelo de um circuito RC.

Concluída a revisão da literatura e as fundamentações teóricas e metodológicas adotadas passamos nos próximos capítulos a descrever os quatro estudos realizados no âmbito desta tese.

CAPÍTULO 5

SÍNTESE DO PRIMEIRO ESTUDO

Neste capítulo apresentamos nosso primeiro estudo desenvolvido no âmbito da linha de pesquisa que investiga o uso de novas tecnologias no ensino de Física. A fundamentação teórica adotada esteve baseada na teoria de Ausubel (2003) sobre aprendizagem significativa e no referencial de trabalho de Halloun (1996) sobre modelagem esquemática. Este estudo constituiu-se na dissertação de mestrado do autor da presente tese (Dorneles, 2005). Por isso, será apresentado sucintamente neste capítulo; mais detalhes podem ser vistos nas seguintes publicações: Dorneles, Veit e Moreira (2009, 2008 – Anexo A) e Dorneles, Araujo e Veit (2006 e 2008).

5.1 OBJETO DE ESTUDO

Neste estudo investigamos a aprendizagem de alunos que trabalharam com atividades de simulação e modelagem computacionais, apresentadas como situações-problema e propostas com o *software Modellus*, no ensino de circuitos elétricos simples e do tipo RLC. As situações-problema consistem em uma particular situação física, sobre a qual são formuladas questões que visam instigar o aluno a pensar e interagir de modo consciente com os recursos computacionais e não meramente por tentativa e erro.

5.2 METODOLOGIA

Baseados em estudos relatados na literatura sintetizamos as principais dificuldades de aprendizagem em circuitos elétricos simples (tabelas 1 e 3, capítulo 2) e estabelecemos os objetivos que os alunos deveriam atingir ao final do estudo de circuitos elétricos simples e RLC (Tabela 10 e 11).

Tabela 10 – Objetivos gerais e específicos a serem alcançados pelos alunos ao final do ensino de circuitos elétricos simples.

	Dado(a) um(a)	O aluno deverá...
Objetivos Gerais	circuito elétrico simples	<p>... perceber:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. que é necessário tratar o circuito elétrico como um sistema; 2. a conservação da corrente elétrica no circuito elétrico; 3. a relação entre corrente elétrica total e as resistências associadas no circuito; 4. o comportamento da resistência equivalente para diferentes associações; 5. a corrente elétrica como consequência da diferença de potencial e da resistência elétrica;
Objetivos específicos	associação de resistores em série	<p>... perceber que:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) a corrente elétrica que circula pelos resistores é a mesma; b) a soma das diferenças de potencial entre as extremidades dos resistores é igual à diferença de potencial aplicada entre os extremos da fonte; c) a resistência equivalente aumenta (diminui) quando um resistor é inserido (retirado) em uma associação em série;
	associação de resistores em paralelo	<p>... perceber que:</p> <ol style="list-style-type: none"> d) a diferença de potencial entre os extremos dos resistores é a mesma; e) as divisões de correntes em uma junção do circuito (divisor de corrente) dependem do que existe no restante do circuito; f) a resistência equivalente diminui (aumenta) quando um resistor é inserido (retirado) em uma associado em paralelo;
	circuito com lâmpadas	<p>... ser capaz de:</p> <ol style="list-style-type: none"> g) identificar que uma lâmpada é um resistor e, portanto, os comportamentos observados em relação a resistores se manifestam também com lâmpadas; h) associar o brilho de uma lâmpada à corrente elétrica;
	fonte de tensão ideal	<ol style="list-style-type: none"> i) ... perceber que uma bateria ideal não é uma fonte de corrente elétrica constante, sim uma fonte de diferença de potencial constante.

Tabela 11 – Objetivos a serem alcançadas pelos alunos ao final do ensino de circuitos RLC.

Dado um:	O aluno deverá...
Circuito RC	<ol style="list-style-type: none"> 1. ... descrever o comportamento da quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor durante os processos de carga e descarga; 2. ... descrever o comportamento da intensidade da corrente elétrica no circuito durante os processos de carga e descarga do capacitor; 3. ... captar que a corrente elétrica não é consumida ao longo do circuito; 4. ... descrever o comportamento das diferenças de potencial ao longo do circuito;
Circuito RL	<ol style="list-style-type: none"> 5. ... ser capaz de perceber que a intensidade de corrente elétrica no circuito não atinge seu valor máximo imediatamente;
Circuito LC ou RLC	<p>... ser capaz de:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. interpretar o comportamento da quantidade de carga armazenada no capacitor em função do tempo; 7. interpretar o comportamento da intensidade da corrente elétrica em função do tempo; 8. relacionar o comportamento do campo magnético no indutor com a quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor em função do tempo; 9. relacionar o comportamento do campo elétrico entre as placas do capacitor com a intensidade de corrente elétrica do circuito em função do tempo;
	<ol style="list-style-type: none"> 10. ... ser capaz de perceber o comportamento das energias: elétrica, magnética e eletromagnética em função do tempo.

Com o propósito de auxiliar os alunos a atingirem os objetivos apresentados nas tabelas 10 e 11 concebemos uma série de atividades de simulação e modelagem computacionais²², com o software *Modellus*, que requerem constante interação do aluno com o recurso computacional para responder questões que lhe são formuladas em guias impressos. Muitas das questões visam gerar nos alunos reflexões sobre suas próprias concepções e raciocínios, proporcionando-lhes melhores condições para uma aprendizagem significativa, na acepção de Ausubel (2003).

²² Disponíveis em: <http://www.if.ufrgs.br/cref/netf/circuitos>.

As atividades computacionais concebidas foram implementadas em uma experiência didática em uma turma de alunos de Engenharia que cursou a disciplina de Física II-C (Eletricidade e Magnetismo para alunos de Engenharia da UFRGS), no 2º semestre de 2004. Participaram da investigação 193 alunos de cursos de Engenharia. Uma turma com 28 alunos formou o grupo experimental e 165 alunos de cinco turmas da disciplina em que a pesquisa foi realizada formaram o grupo de controle. Os alunos do grupo experimental trabalharam com um conjunto de atividades sobre circuitos elétricos simples durante cinco aulas e com um conjunto de atividades sobre circuitos RLC durante quatro aulas. Cada aula teve duração de 1h40min. Em relação à dinâmica das aulas no grupo experimental utilizamos o método colaborativo presencial e o método PIE, descritos no capítulo anterior. Os alunos do grupo de controle foram expostos apenas ao ensino tradicional.

Adotamos uma metodologia basicamente quantitativa, com um delineamento quase-experimental (Campbell e Stanley, 1963), no qual se tem um grupo de controle não-equivalente e um grupo experimental²³. Os resultados quantitativos foram triangulados com dados qualitativos coletados com o grupo experimental a partir: *i)* do levantamento de opiniões dos alunos sobre o procedimento didático, *ii)* das respostas às questões dissertativas presentes nos guias impressos trabalhados em grupos durante as aulas e *iii)* da resolução de uma questão conceitual inserida em uma prova.

²³ Como não havia outra possibilidade, os grupos experimental e de controle foram escolhidos de forma não-aleatória.

5.3 RESULTADOS

Os resultados quantitativos deste estudo, que podem ser vistos com mais detalhe no Anexo A, constituído pelas principais publicações, mostram que houve uma diferença estatisticamente significativa no desempenho dos alunos do grupo experimental, em comparação com os alunos do grupo de controle, nos levando a concluir que atividades de simulação e modelagem computacionais podem auxiliar os alunos a superarem as dificuldades de aprendizagem usualmente enfrentadas no estudo de circuitos elétricos. Os resultados da análise qualitativa mostram que as questões conceituais presentes nos guias requerem constante interação do aluno com os modelos computacionais, entre si e com o professor, o que promoveu a predisposição dos alunos para aprender – relacionando de forma substantiva à sua estrutura cognitiva os conceitos físicos envolvidos – possibilitando uma melhor compreensão conceitual. A predisposição para aprender é uma das condições da aprendizagem significativa. A outra é que o material seja potencialmente significativo. Acreditamos que neste estudo as duas foram alcançadas. Estes resultados estão de acordo com os estudos de Araujo, Veit e Moreira (2008), Ronen e Eliahu (2000) e Finkelstein et al. (2005), que sugerem que o uso de atividades computacionais pode melhorar a compreensão conceitual e constituir-se em um elemento motivador para a aprendizagem.

No entanto, percebemos que nosso procedimento didático não favoreceu que o aluno estabelecesse um vínculo entre teoria e realidade. A partir da observação de alguns alunos que se mostraram dispostos a relacionarem os conceitos trabalhados nas

atividades computacionais com sistemas reais, percebemos a necessidade de aprofundar nossa discussão sobre o contexto de validade dos modelos teóricos envolvidos nas atividades computacionais. Por exemplo, uma aluna ao interagir com uma simulação sobre um circuito com resistores em paralelo após concluir que a diferença de potencial em um resistor independe do número de resistores que se encontram associados no circuito, nos perguntou por que então na casa dela ao ligar um chuveiro elétrico ela notava uma diminuição no brilho das lâmpadas acesas. Essa pergunta para nós foi mais um indicativo de que deveríamos ter utilizado AE para propiciar aos alunos uma melhor contextualização das AC e estabelecer um vínculo entre teoria e realidade.

5.4 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES

Nos dias atuais, estudos que identificam dificuldades dos estudantes na aprendizagem de um determinado conteúdo de Física não têm se restringido à detecção das dificuldades, mas também apresentam alguma alternativa que auxilie os alunos a superá-las. Optamos por trabalhar com o ensino de circuitos elétricos, porque vários estudos mostram que mesmo após o ensino deste tópico, muitos alunos permanecem com concepções alternativas e raciocínios errôneos (e .g. McDermott e Shaffer, 1992; Duit e Rhöeneck, 2010; Engelhardt e Beichner, 2004). Para tanto, concebemos atividades de simulação e modelagem computacionais, levando em consideração as concepções alternativas, as dificuldades conceituais e os raciocínios errôneos que os alunos costumam apresentar na aprendizagem de circuitos elétricos, a serem

implementadas com base nos métodos PIE (Predizer, Interagir e Explicar) e colaborativo presencial.

Os resultados mostram que o procedimento didático adotado nesse estudo contribuiu para que muitos alunos do grupo experimental atingissem uma aprendizagem significativa no estudo de circuitos elétricos. Isto sugere que conseguimos atingir nossa expectativa inicial, que se constituía em utilizar atividades computacionais no ensino de circuitos elétricos para aumentar o espectro de possibilidades capazes de propiciar melhores condições para aprendizagem significativa. Porém, no decorrer do estudo muitos alunos apresentaram dificuldades em utilizar o entendimento adquirido sobre o comportamento das grandezas físicas envolvidas nas atividades computacionais ao relacionarem com situações reais. Por isso, passamos a ter como perspectiva futura de pesquisa, investigar a integração de atividades computacionais com o laboratório didático de Física.

CAPÍTULO 6

SÍNTESE DO SEGUNDO ESTUDO

Com base nas conclusões do primeiro estudo, descrito no capítulo 5, propusemos um segundo estudo visando contemplar não somente situações virtuais idealizadas, mas também atividades experimentais. Mais especificamente, buscamos avaliar as potencialidades da integração entre atividades experimentais e computacionais para ir além do que o uso isolado de uma ou outra abordagem permite, tendo em vista uma aprendizagem significativa dos conceitos físicos envolvidos. Também o conteúdo tratado foi ampliado, de modo a incluir, além de circuitos simples e do tipo RLC, circuitos de corrente alternada (CA). A fundamentação teórica adotada esteve baseada na teoria de Ausubel (2003) sobre aprendizagem significativa e na teoria sócio-interacionista de Vigotski (Vygotsky, 2003; Vigotski, 2001), especialmente quanto à dinâmica da sala de aula. Na proposição das atividades continuamos utilizando o referencial de trabalho de Halloun (1996), propondo situações-problema para os alunos.

6.1 OBJETO DE ESTUDO

Com o propósito de encontrar subsídios para uma pesquisa mais ampla sobre a integração entre atividades computacionais e experimentais, desenvolvemos este estudo exploratório que teve como objetivos:

- estudar as potencialidades do uso de atividades experimentais em conjunto com simulação e modelagem computacionais no ensino de circuitos elétricos do tipo corrente contínua (CC) e CA, de modo a proporcionar condições favoráveis à aprendizagem significativa de conceitos dessa área;
- buscar evidências de que as atividades concebidas neste estudo são capazes de promover interação dos alunos entre si, com o material didático, e com o professor, transformando a sala de aula em um espaço privilegiado para a externalização, reflexão e discussão de ideias e concepções relacionadas à Física em geral, e ao funcionamento de circuitos elétricos em particular.

6.2 METODOLOGIA

Trabalhamos com uma turma de 12 alunos matriculados na disciplina de Física Geral e Experimental III (Eletromagnetismo) do curso de Física – Licenciatura e Bacharelado da UFRGS, no segundo semestre de 2006. As aulas teóricas da disciplina foram ministradas pelo professor da turma na forma de exposição dialogada e resolução de exercícios e acompanhadas *in loco* pelo autor do presente relato. Durante o ensino de circuitos elétricos a metodologia foi alterada e as aulas passaram a ser ministradas pelo presente autor. Os alunos dessa turma também desenvolveram quatro atividades experimentais no laboratório de Física, ministradas por outro professor, responsável pelas aulas experimentais da turma.

O estudo foi realizado em um total de sete encontros de 1h e 40 min cada, com frequência semanal. Esses encontros ocorreram em um laboratório de informática com mesas para montagens experimentais próximas aos computadores. Os alunos trabalharam em trios para preencherem os guias propostos para cada aula (Apêndice A). Em relação à dinâmica das aulas utilizamos os métodos colaborativo presencial e PIE (predizer-interagir-explicar) descritos no Capítulo 4. Adotamos uma metodologia qualitativa do tipo estudo de caso, com o propósito exploratório (Yin, 2005).

Nosso procedimento didático envolveu, em três aulas, o ensino de circuitos elétricos simples. Em duas delas (lâmpadas em associação mista e representações de circuitos elétricos) os alunos tiveram à sua disposição um conjunto de materiais experimentais para a montagem e interação com os circuitos elétricos representados em cada simulação e na terceira aula (circuitos com fonte real) os alunos trabalharam somente com uma simulação computacional sobre um circuito elétrico com resistores associados em paralelo com uma fonte real ou ideal (dependendo do valor atribuído pelos alunos para a resistência interna da fonte).

As demais quatro aulas foram dedicadas aos circuitos RLC; em duas delas, no estudo de circuitos RL (quarta aula) e RC (quinta aula), os alunos inicialmente utilizaram uma simulação computacional para responderem questões conceituais presentes nos guias e na sequência foram desafiados a encontrarem experimentalmente as constantes de tempo capacitiva e indutiva para cada circuito correspondente. Na antepenúltima (sexta aula), trabalharam com circuitos RLC (capacitor inicialmente

carregado e associado em série com um resistor e um indutor). Nesta aula os alunos interagiram somente com uma simulação computacional para observarem principalmente os gráficos em função do tempo das seguintes grandezas: intensidade e corrente elétrica no circuito; carga elétrica armazenada no capacitor; energia elétrica armazenada no capacitor; energia magnética armazenada no indutor; energia eletromagnética armazenada no circuito. Nesses gráficos instigamos os alunos a fazerem uma análise predominante qualitativa, principalmente, sobre os pontos de inflexão da energia eletromagnética próximos aos instantes de tempo em que a corrente elétrica se anula (Figura 21). No trabalho apresentado no Anexo B (Dorneles, Veit e Araujo, 2008) discutimos em detalhes o comportamento da energia eletromagnética em circuitos RLC e destacamos que nos livros de Física Geral que localizamos abordando este tema, estes pontos de inflexão não são mencionados, provavelmente porque a discussão se limita a valores de resistência elétrica que produzem um amortecimento fraco, e neste caso a variação da energia, numa boa aproximação, decai exponencialmente.

Na sétima e última aula trabalhamos com circuitos RLC de CA (Circuito RLC em série, excitado senoidalmente por um gerador). Inicialmente os alunos interagiram com uma simulação computacional que permite que se observe o que acontece em um diagrama de fasores representando a intensidade de corrente elétrica e as diferenças de potencial no resistor, no capacitor e no indutor ao se alterar algum parâmetro do circuito (e. g. a capacitância do indutor; a frequência de excitação do gerador). No

final da aula os alunos foram desafiados a encontrarem experimentalmente a frequência de ressonância do circuito.

Na próxima seção, durante a apresentação e discussão dos resultados, para fins de ilustração apresentaremos duas atividades e comentaremos a implementação das atividades.

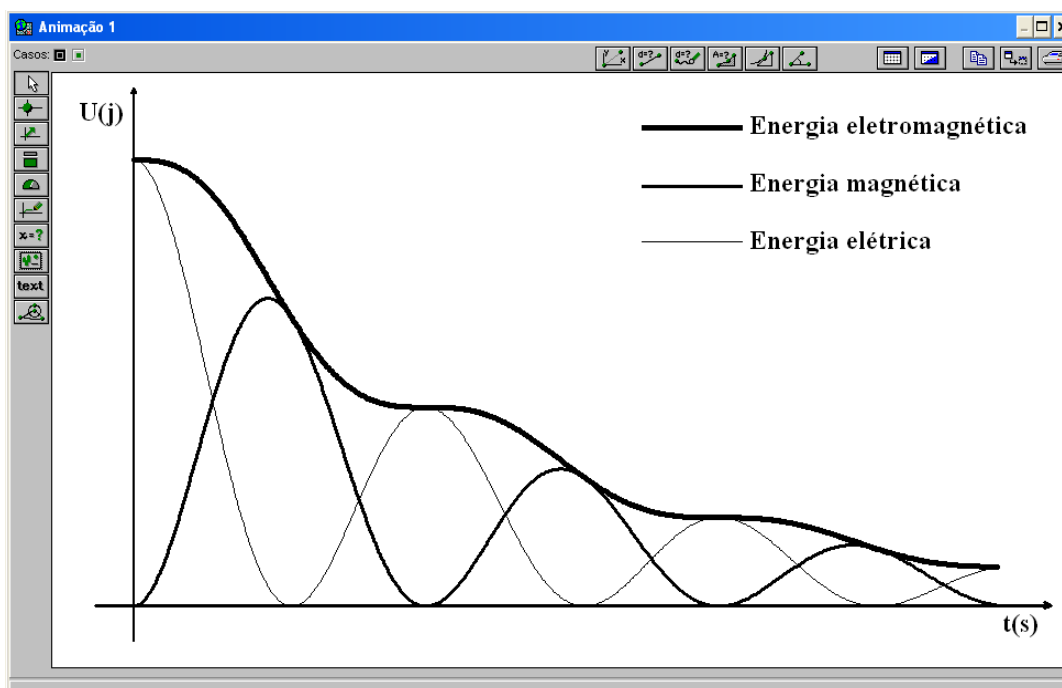


Figura 21 – Gráfico das energias eletromagnética, elétrica e magnética em função do tempo em um circuito RLC subamortecido com os seguintes valores para os parâmetros: $R = 100,00 \Omega$, $C = 1,50 \mu\text{F}$, $L = 150,00 \text{ mH}$ e $q_0 = 5,00 \mu\text{C}$.

Como fonte de dados, além de nossas notas de campo e das respostas apresentadas pelos alunos nos guias entregues, realizamos uma entrevista individual semi-estruturada (Apêndice B) com duração média de 25 min por aluno, em momento posterior à avaliação final da disciplina. Na primeira parte da entrevista, apresentamos aos alunos questões relacionadas ao trabalho em grupo, à interação com o professor, ao uso das simulações computacionais, à realização de experimentos e a integração

entre AC e AE. Na segunda, os alunos responderam uma questão conceitual voltada para a detecção de algumas concepções alternativas sobre corrente elétrica e fontes de tensão, levantadas por McDermott e Shaffer (1992); Duit e Rhöeneck (2010) e Engelhardt e Beichner (2004).

6.3 RESULTADOS

A partir dos dados coletados nesse estudo exploratório detectamos alguns elementos, importantes principalmente a respeito da integração entre as atividades experimentais e computacionais.

Em relação ao uso de atividades integradas todos os relatos dos alunos foram amplamente favoráveis. Em suas próprias palavras:

“... é uma combinação que funciona. O computador te dá uma visualização melhor de tudo que está acontecendo e o experimental te dá a questão de montar de como funciona o sistema na prática. Acho que são duas coisas diferentes e de extrema importância na minha concepção. Acho que é importante esta integração. (Aluno 11).

“Eu acho que uma coisa complementou a outra. Super válida essa integração da parte experimental em si com o uso do computador têm coisas que se vê melhor na prática têm coisas que ficam mais claro vendo no computador. Eu achei ótimo isto” (Aluno 8).

Dois alunos sugeriram, ainda, que haja maior integração:

“acho que elas complementam bastante uma à outra. Seria melhor se houvesse uma evolução nessa integração se fosse ainda mais integrada. Acho que as coisas ainda estão um pouco distintas a gente trabalha agora no computador e agora a gente trabalho no experimento, mas se a gente trabalhasse com as duas coisas ao mesmo tempo seria melhor” (Aluno 9).

“...me pareceu é que vocês tão começando a fazer isso agora. Eu acho que essa integração deve crescer.” (Aluno 12).

Percebemos que as simulações computacionais proporcionam uma visualização mais geral dos circuitos elétricos. Por exemplo, a simulação computacional sobre um circuito RLC em série de CA, trabalhada na sétima aula, propiciou aos alunos uma representação dinâmica e geral (Figura 22), ao permitir a variação da resistência elétrica do resistor R (barra em preto), da capacitância do capacitor C (barra em verde), da frequência de excitação f_d da fonte (barra em amarelo) e da indutância do indutor L (barra em azul). Ao interagirem com essa simulação percebemos que os grupos inicialmente apresentaram dificuldades para perceberem o significado do diagrama de fasores presente na simulação. Uma dupla chegou a pensar que as diferenças de potencial em circuitos de CA são grandezas vetoriais, não percebendo que estávamos apenas usando uma nova representação para facilitar a análise destes circuitos. À medida que os alunos trabalhavam foram sendo capazes de captarem o comportamento dinâmico das grandezas físicas presentes no circuito simulado, mas observamos que nenhum grupo foi capaz de apresentar uma argumentação conceitual significativa nas questões propostas no guia. As respostas foram fortemente baseadas em fórmulas matemáticas. Observamos algo que, como é comum acontecer com alunos em início de graduação e expostos ao ensino tradicional, os alunos não justificam as suas respostas com argumentação conceitual. Quando perguntávamos, por exemplo, o que significava dizer que um circuito é indutivo, esses alunos somente eram capazes de dizer que a reatância indutiva é maior que reatância capacitiva.

Nossa expectativa inicial era de que ao interagirem com a simulação os alunos percebessem que um circuito é mais indutivo porque a frequência de excitação da

fonte é muito maior que a frequência natural de oscilação do circuito e assim o tempo em que a intensidade de corrente elétrica permanece em um sentido no circuito não é suficiente para o capacitor ser carregado com uma quantidade de carga elétrica capaz de produzir uma diferença de potencial máxima próxima da diferença de potencial máxima no indutor. No indutor a diferença de potencial é maior porque o sentido da corrente elétrica no circuito muda a todo instante – quanto menor o período de oscilação da fonte mais rapidamente ocorrem variações no sentido da corrente elétrica e assim o efeito do indutor em se opor às variações no módulo da intensidade de corrente elétrica é predominante no circuito em comparação aos efeitos capacitivos. No entanto, os alunos ao medirem a frequência de ressonância do circuito demonstraram habilidade para montá-lo e utilizarem o osciloscópio (Figura 23), apesar de não demonstrarem um entendimento conceitual satisfatório sobre os conceitos físicos envolvidos no circuito trabalhado.

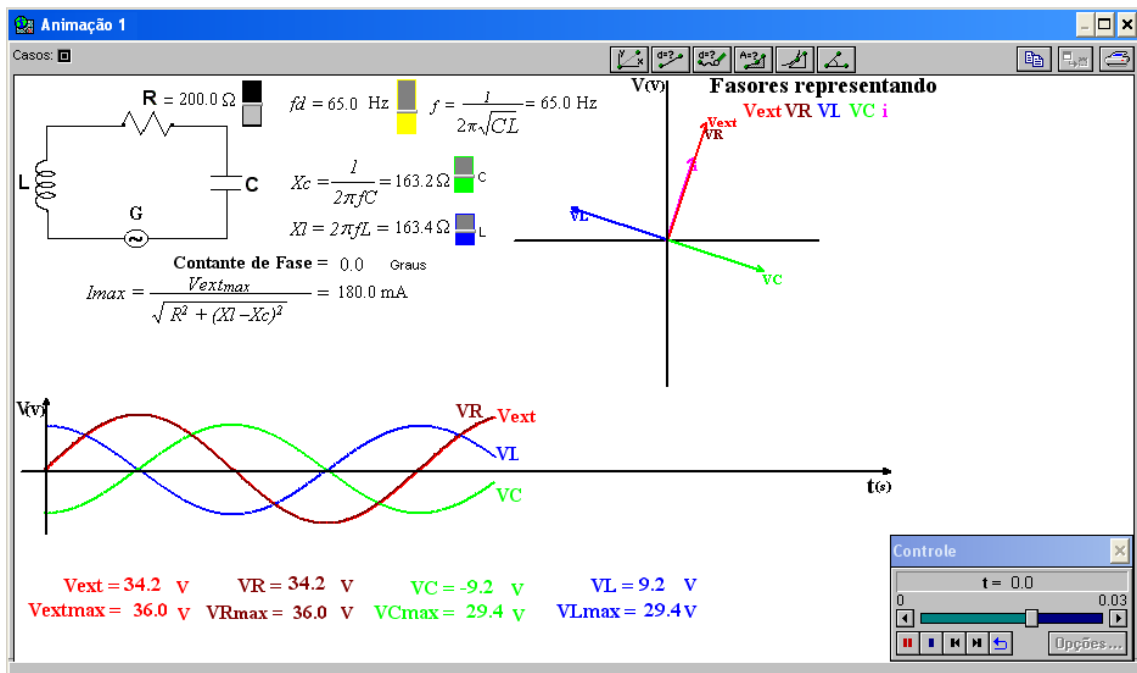


Figura 22: Janela Animação 1 de uma simulação computacional sobre um circuito elétrico de CA.

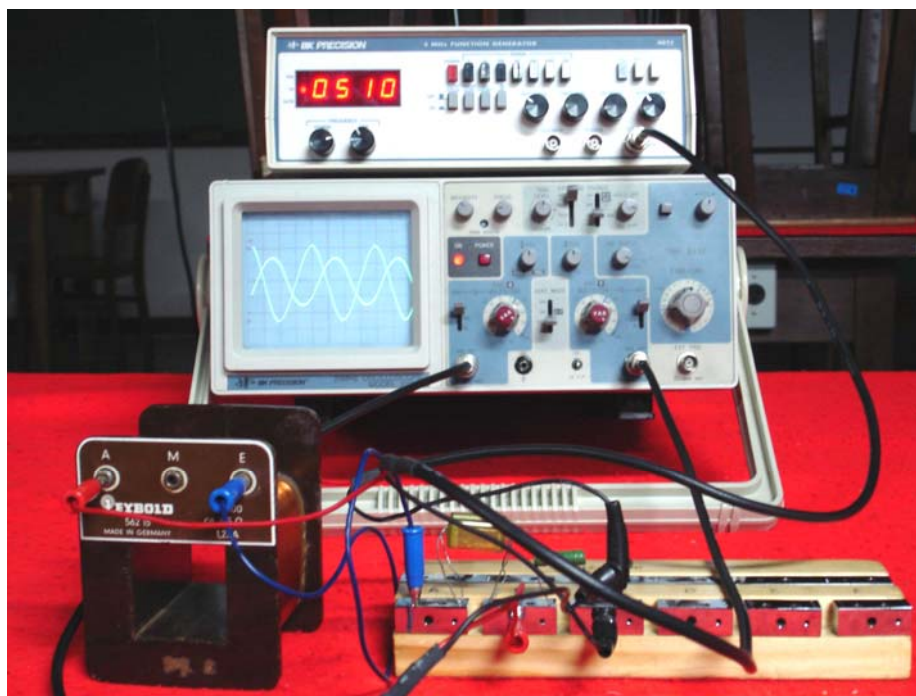


Figura 23: Foto da montagem experimental usada por um grupo de alunos para fazer medidas em um circuito CA por eles construído.

Um aspecto a destacar sobre as entrevistas é que ao perguntarmos sobre a integração entre atividades experimentais e computacionais vários alunos espontaneamente compararam com a forma que foi trabalhada as quatro atividades experimentais desenvolvidas no laboratório de Física com o outro professor da disciplina das aulas experimentais, destacando as dificuldades encontradas ao trabalharem com os tradicionais roteiros fortemente dirigidos. Em suas próprias palavras:

“Acho um pouco soltas as atividades feitas no laboratório de Física. Faz este procedimento, tira tais dados e calcula tais coisas; o porquê de fazer aquilo exatamente não é dito” (Aluno 6).

“...muito mecânico nada me surpreendeu nos resultados que vi nas atividades experimentais. Para meu aprendizado nada me acrescentou” (Aluno 11)

“As aulas de laboratório eram maçantes. Não gosto de roteiro. Lê o roteiro monta o que tem que montar e mede o que diz pra medir não pensa em cima daquilo e depois escreve um relatório copiando aquele roteiro” (Aluno 1).

Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Hodson (1994); Borges (2002) e Carrascosa *et al.* (2006), que sugerem que atividades experimentais propostas com roteiros fortemente dirigidos – “ao estilo de receita de bolo” – além de não serem relevantes do ponto de vista dos alunos, não contribuem satisfatoriamente para a aprendizagem.

Em relação ao uso do computador, vários alunos destacaram que as simulações propostas propiciam uma visualização mais geral dos circuitos elétricos, o que acaba facilitando o desenvolvimento de raciocínios sistêmicos. Vejamos três exemplos:

“Com o computador eu realmente consegui visualizar os gráficos e perceber como as coisas estão variando eu variava a resistência e percebia como variava a tensão, a corrente elétrica. No caso do circuito RLC nós conseguimos perceber muitas coisas relativas à potência também (Aluno 9).

“Para ter uma visão mais aprofundada o computador é excelente. Tu montas um equipamento tu vê fisicamente como funciona, mas o experimento te limita muitas variações, mas com o computador tu pode variar todas possíveis variáveis o que propicia uma visão mais abrangente e imediata” (Aluno 3).

“...aquilo que a gente vê em aula tu vê no computador com muito mais clareza. É aquilo que te digo se botar uma senóide no osciloscópio de repente tu não consegue vê onde está a amplitude, tu não consegue entender o que é frequência, pois o osciloscópio não é uma coisa do dia-dia, do computador somos mais íntimos” (Aluno 12).

Nosso objetivo ao utilizar o computador esteve em apresentar aos alunos uma ferramenta que os auxiliasse a desenvolver raciocínios sistêmicos ao analisarem um circuito elétrico, de modo a proporcionar uma melhor compreensão dos conceitos

físicos envolvidos nesta área. Os resultados deste estudo estão de acordo com os estudos de Dorneles, Veit e Moreira (2009; 2008), Araujo, Veit e Moreira (2008; 2007), Finkelstein *et al.* (2005) e Ronen e Eliahu (2000), que sugerem que o uso de atividades computacionais pode contribuir para uma melhor compreensão conceitual e constituir-se em um elemento motivador para aprendizagem dos alunos.

Em relação ao trabalho em sala de aula, um dos pontos mais destacados pelos alunos foi a possibilidade concreta de interação com o professor (autor do trabalho).

Em suas próprias palavras:

“...o professor tem muitas experiências para passar para a gente que a gente não consegue ver no livro. Eu acho que o professor se empenhou muito em querer fazer a gente aprender, entender e mostrar todos os detalhes de cada coisa. Por isso, eu acho muito importante a interação com professor” (Aluno 10).

“Quanto ao meu aprendizado o fator mais importante foi à interação com o professor. É preciso que tenha uma abertura para questionamentos e para que o desenvolvimento do meu raciocínio não esteja atrás nem à frente do professor. Quando ele está passando matéria ele tem que se colocar numa posição relativa à minha sem estar muito à frente nem muito atrás. Essa interação: ‘pessoal agora vocês percebem isto, percebem aquilo, ficaram ainda com alguma dificuldade?’. Isso realmente faz com que as coisas se organizem e fiquem claras quando a gente tá tendo uma aula” (Aluno 9).

De fato, uma de nossas maiores preocupações esteve em possibilitar um ambiente propício para a negociação de significados, fazendo também com que o aluno se engajasse em seu próprio aprendizado. Apesar de não terem sido todos os alunos (7 em 12) a citarem a interação com o professor como fator mais importante, mesmo assim acreditamos que neste estudo possibilitamos situações em sala de aula capazes de estimular a negociação de significados entre todos os participantes do episódio de ensino.

Com base nos guias preenchidos pelos alunos e na entrevista percebemos que a maior parte dos alunos após o ensino de circuitos elétricos simples não apresentou a concepção alternativa de consumo de corrente elétrica, por exemplo:

“A corrente elétrica se conserva ao longo de um circuito” (Aluno 6).

“Quando há uma associação em série a corrente elétrica é constante entre os resistores. Quando há uma associação em paralelo, a corrente se divide entre os resistores. No menor resistor há intensidade de corrente elétrica maior” (Aluno 10).

“No circuito em série a corrente será constante em todo o circuito e no circuito em paralelo ela irá dividir-se conforme a resistência das malhas” (Aluno 11).

“ L_1 e L_2 brilham com a mesma intensidade, pois estão associados em série. A corrente se conserva” (Aluno 5).

Em relação à concepção de que uma bateria ideal é uma fonte de corrente elétrica constante, cinco alunos persistiram com esta concepção alternativa, mas sete demonstraram ter compreendido que a intensidade da corrente elétrica em um circuito elétrico não depende somente das características da fonte, mas também da resistência equivalente do que foi acoplado entre seus terminais. A seguir apresentamos dois exemplos de cada caso.

Primeiro caso:

“Neste circuito com apenas L_1 e L_2 em paralelo, ao retirar L_1 o brilho de L_2 aumenta, pois a intensidade da corrente elétrica sobre L_2 aumentará” (Aluno 12).

“ L_1 e L_2 em paralelo, quando retira-se L_1 irá passar mais corrente por L_2 ” (Aluno 4)

Segundo caso:

“A corrente elétrica depende da resistência equivalente da malha, e para encontra-lá deve-se conhecer a fem e a resistência equivalente” (Aluno 9).

“A corrente elétrica total vai cair pela metade, pois a resistência resultante vai dobrar” (Aluno 1).

Para ilustrar as atividades propostas que consideramos que mais auxiliaram alguns alunos a superarem as duas concepções alternativas avaliadas apresentamos na Figura 24 a tela principal da simulação computacional sobre lâmpadas em associações mista abordada na primeira aula deste estudo. Nessa aula os alunos inicialmente fizeram previsões sobre o brilho das lâmpadas ao abrirem ou fecharem os dois interruptores. A seguir, tinham à disposição além da simulação materiais experimentais para gerarem resultados e então avaliarem as divergências e convergências de suas previsões. Ainda nesta aula os alunos trabalharam com questões sobre o conceito de resistência equivalente e de potência elétrica.

Observamos que praticamente todos os grupos apresentaram previsões iniciais sem nenhuma relação explícita com os conceitos de diferença de potencial, resistência elétrica e corrente elétrica (e.g. somente $L2$ não brilha; aumenta o brilho de $L1$). Para gerarem os resultados observamos que os alunos primeiramente preferiram montar circuitos reais e quando encontraram dificuldades para justificarem as divergências entre suas previsões e os resultados observados aos poucos foram interagindo com a simulação computacional (Figura 24) e, então, passaram a utilizar os conceitos físicos

envolvidos na atividade para justificarem as variações nos brilhos das lâmpadas ao alterarem a configuração do circuito.

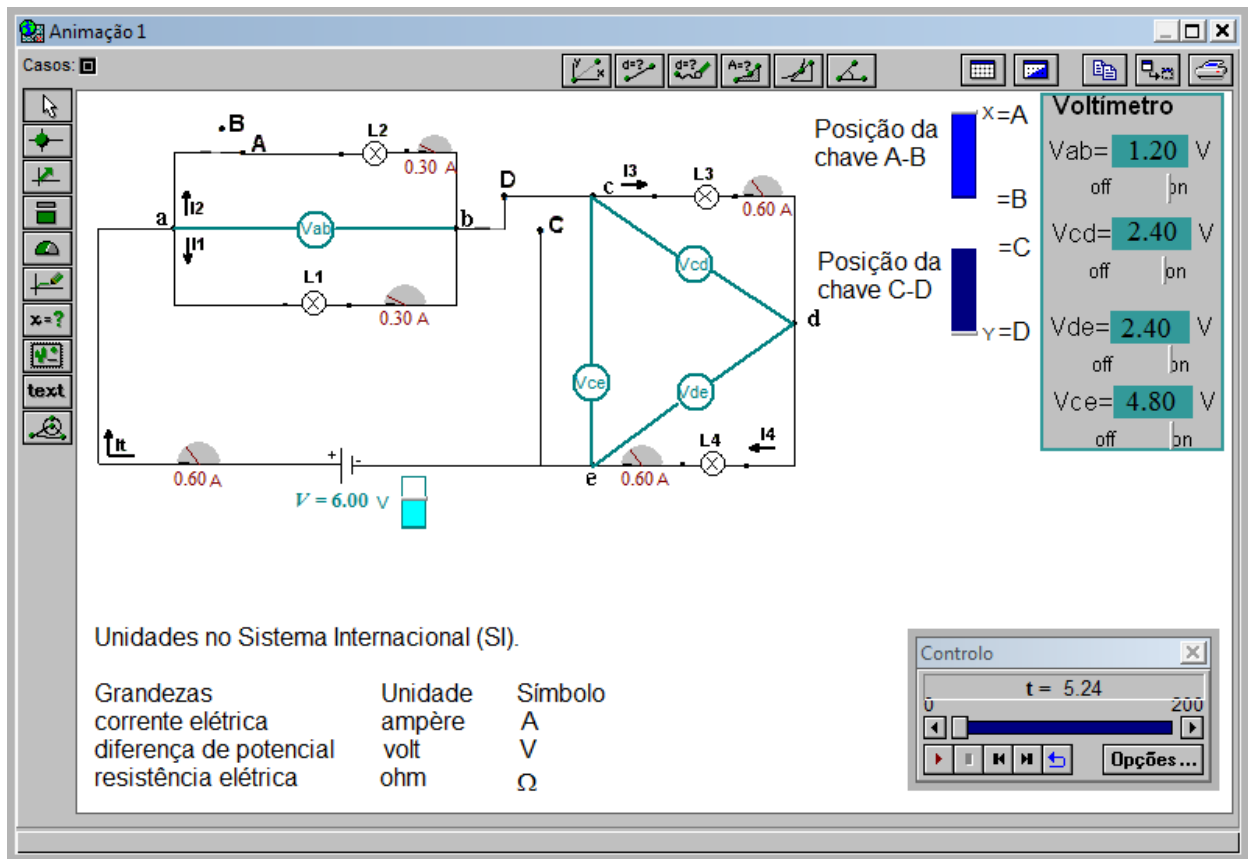


Figura 24: Janela Animação 1 de uma simulação computacional sobre um circuito elétrico simples.

6.4 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES

Para servir como base para nossa pesquisa, realizamos este estudo exploratório buscando estudar as potencialidades da integração entre atividades computacionais e experimentais no ensino de circuitos elétricos, de modo a proporcionar condições favoráveis à aprendizagem significativa de conceitos desta área. Além disso, buscamos indícios de que as atividades concebidas neste estudo são capazes de promover a interação dos alunos entre si, com o material instrucional, e com o professor,

transformando a sala de aula em um ambiente privilegiado para a externalização, reflexão e discussão de ideias, em particular sobre o funcionamento de circuitos elétricos.

Com base nos resultados concluímos que o uso de atividades experimentais em conjunto com as computacionais no ensino de circuitos elétricos *CC* e *CA* pode propiciar melhores condições para a aprendizagem significativa. Também observamos que os alunos, ao responderem questões conceituais presentes nos guias, interagiram constantemente entre si e com o professor, o que mostra que as atividades concebidas neste estudo propiciam situações capazes de promover a interação social defendida por Vygotsky (2003). Esse estudo foi apresentado no VI Enpec – Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (Dorneles, Araujo e Veit, 2007).

Porém várias questões não foram investigadas, por exemplo: quais os fatores positivos e negativos dessa integração? Como instigar os alunos a refletirem sobre os contextos de validade dos modelos teóricos subjacentes às simulações computacionais? E como potencializar a análise de possíveis fontes de incertezas nas medidas experimentais? Para investigar estas questões e outras relevantes planejamos mais um estudo exploratório que passamos a descrever no próximo capítulo.

Finalizamos essa discussão salientando que os alunos deste estudo (licenciandos em Física) apresentaram mais dificuldades para desenvolver as atividades em comparação aos alunos do estudo anterior (alunos de cursos de Engenharia). Esta

constatação confirmou nossa expectativa de encontrar algumas diferenças por tratar-se de um curso de licenciatura, em que a relação candidato vaga no exame de seleção é menor do que dois candidatos por vaga e também por ser um curso noturno, de modo que a grande maioria dos alunos trabalha durante o dia. E ainda percebemos por parte de alguns alunos (9 de 12) uma postura de priorizarem uma aprendizagem mecânica, a partir da simples memorização de fórmulas, sem demonstrarem a motivação para um entendimento qualitativo dos conceitos físicos envolvidos nas atividades. Diante desta situação passamos a ter como meta a concepção de uma proposta didática que envolvesse o uso integrado de AC e AE a fim de auxiliar os alunos a passarem a adotar uma postura mais reflexiva em relação ao seu próprio aprendizado, de modo a auxiliar a superarem suas dificuldades de aprendizagem.

CAPÍTULO 7

SÍNTESE DO TERCEIRO ESTUDO

Os resultados do estudo anterior nos motivaram a propor este estudo, no qual investimos em uma maior integração entre as atividades computacionais e experimentais, visando o levantamento de proposições norteadoras sobre a integração proposta para embasarem estudos futuros. Procuramos combinar de distintas formas atividades computacionais com experimentais para extrair dados que propiciem inferências sobre como tornar essas atividades complementares, em termos de propiciarem melhores condições para uma aprendizagem significativa dos alunos. Salientamos que não tivemos como objetivo identificar qual é a melhor combinação, pois existem inúmeras possibilidades, mas sim de levantar proposições a respeito de alguns pontos que ainda não nos eram claros. Como por exemplo: *i*) como instigar os alunos a fazerem a discriminação entre sistemas reais e ideais?; *ii*) qual(is) fator(es) devemos alterar em nossa proposta didática para os alunos passarem a apresentar respostas com mais argumentação conceitual?

Tal como nos estudos anteriores, a fundamentação teórica adotada esteve baseada na teoria de Ausubel (2003) sobre aprendizagem significativa, especialmente na proposição e implementação das atividades. Também adotamos a teoria sócio-interacionista de Vigotski (Vygotsky, 2003; Vigotski, 2001) para fundamentar a dinâmica de sala de aula. Na proposição de situações-problema através de atividades computacionais utilizamos, novamente, o referencial de trabalho de Halloun (1996).

Ao conceber o delineamento desse estudo tínhamos expectativas de realizar vários episódios de ensino. Porém, por razões de distribuição didática no Departamento de Física, não tivemos a oportunidade de trabalhar em aulas teóricas, nesse estudo. Três professores que ministravam as aulas experimentais (dez aulas ao total) nos propiciaram a possibilidade de implementação de atividades, em três aulas de quatro turmas distintas. Também foi possível, atuar nas demais sete aulas em duas turmas como monitor/observador, o que foi muito proveitoso, principalmente, em termos de mais vivência com situações reais do ensino de laboratório e assim compreender melhor as dinâmicas de trabalho dos alunos no ambiente de laboratório.

7.1 OBJETO DE ESTUDO

Nesse estudo exploratório tivemos como objetivo colher indícios sobre como a integração entre atividades computacionais e experimentais pode:

- instigar os alunos a refletirem sobre os contextos de validade dos modelos teóricos subjacentes às simulações computacionais?
- atenuar os fatores negativos das atividades computacionais e experimentais?
- potencializar a análise de possíveis fontes de erro nas medidas experimentais?

7.2 METODOLOGIA

Trabalhamos com 32 alunos de quatro turmas (A, B, C e D) distintas que cursaram a disciplina de Física III (Eletromagnetismo) oferecida pelo Departamento de Física da UFRGS para alunos do curso de Física (Licenciatura e Bacharelado), no primeiro semestre de 2008. As turmas A e B foram alvo de nossas observações em sete aulas e em mais três aulas concebemos e implementamos atividades²⁴ levando em consideração os fatores positivos e negativos apresentados nas tabelas 7 e 8, capítulo 2. Nas demais turmas (C e D) apenas observamos as três aulas, em que implementamos as atividades concebidas. Adotamos uma metodologia qualitativa do tipo estudo de caso, com o propósito exploratório (Yin, 2005). Cada turma constituiu um caso único e as conclusões que obtivemos de cada turma individual foram comparadas com as demais turmas de modo a obtermos conclusões cruzadas. Utilizamos como fontes de dados os guias preenchidos pelos alunos, nossas observações e uma entrevista individual semi-estruturada realizada ao final disciplina (Apêndice C).

Como já fora observado em estudos anteriores (Dorneles, Veit e Moreira, 2009, 2008; Araujo, Veit e Moreira, 2007) que o método colaborativo presencial é propício para promover melhores condições para a aprendizagem significativa e o engajamento dos alunos em seu próprio aprendizado, passamos a adotar esse método de forma definitiva. Assim, em todas as aulas inicialmente apresentávamos uma introdução

²⁴ Disponíveis em: www.if.ufrgs.br/cref/ntef/circuitos/estudo_III.zip.

teórica ou revisávamos os principais conceitos físicos trabalhados na aula anterior para posteriormente os alunos trabalharem com os recursos computacionais e experimentais.

Os guias das atividades (Apêndice D) foram propostos com base nos métodos colaborativo presencial e PIE e estruturados em duas partes, uma contendo somente AC ou AE e a outra contendo uma atividade experimental integrada com uma simulação (AI). Combinamos essas atividades formando quatro dinâmicas diferentes apresentadas na Tabela 12, em que usamos a seguinte nomenclatura: AC-AI significa que primeiramente os alunos trabalharam com uma atividade computacional para posteriormente trabalharem com um experimento integrado com uma simulação; AI-AC significa que a ordem foi invertida e AE-AI os alunos trabalharam inicialmente com uma atividade experimental da forma tradicional (AE) e a seguir com uma atividade AI. Esta dinâmica também foi implementada na forma invertida (AI-AE).

Tabela 12 – Estrutura dos guias usados em cada turma. AC significa atividade computacional, AE atividade experimental tradicional e AI atividade integrada.

Turmas	Aula 1	Aula 2	Aula 3
A	AC-AI	AI-AC	AC-AI
B	AI-AC	AC-AI	AC-AI
C	AE-AI	AC-AI	AC-AI
D	AI-AE	AC-AI	AC-AI

A primeira aula ocorreu na oitava semana de aula da disciplina; as demais, na décima sexta e décima sétima semana. Cada aula teve a duração de 2h40min. Nas turmas C e D as aulas foram ministradas e observadas apenas pelo autor deste trabalho; nas turmas A e B contamos com a participação da professora titular das

turmas. A seguir descrevemos detalhes da implementação das atividades propostas em cada aula.

Aula 1

Nessa aula trabalhamos com circuitos RC (resistor e capacitor associados em série com uma fonte de tensão contínua). Nas turmas C e D, em parte da aula os alunos trabalharam com uma atividade tradicional de laboratório, já que esse se constituía no nosso primeiro contato com essas turmas e queríamos observar como os alunos trabalhavam com as práticas experimentais.

AE da Aula 1: determinação do valor experimental da constante de tempo capacitiva de um circuito RC a partir da obtenção de gráficos da diferença de potencial no capacitor em função do tempo para os processos de carga e descarga do capacitor. Nessa atividade os alunos receberam o roteiro usual da disciplina apresentado no Anexo C.

AC da Aula 1: análise do comportamento da quantidade de carga elétrica armazenada em um capacitor em função do tempo em um circuito RC (Figura 25) ao variar a resistência elétrica do resistor (barra em azul), a diferença de potencial fornecida pela fonte (barra em verde) e a capacitância do capacitor alterando a área A (barra em amarelo).

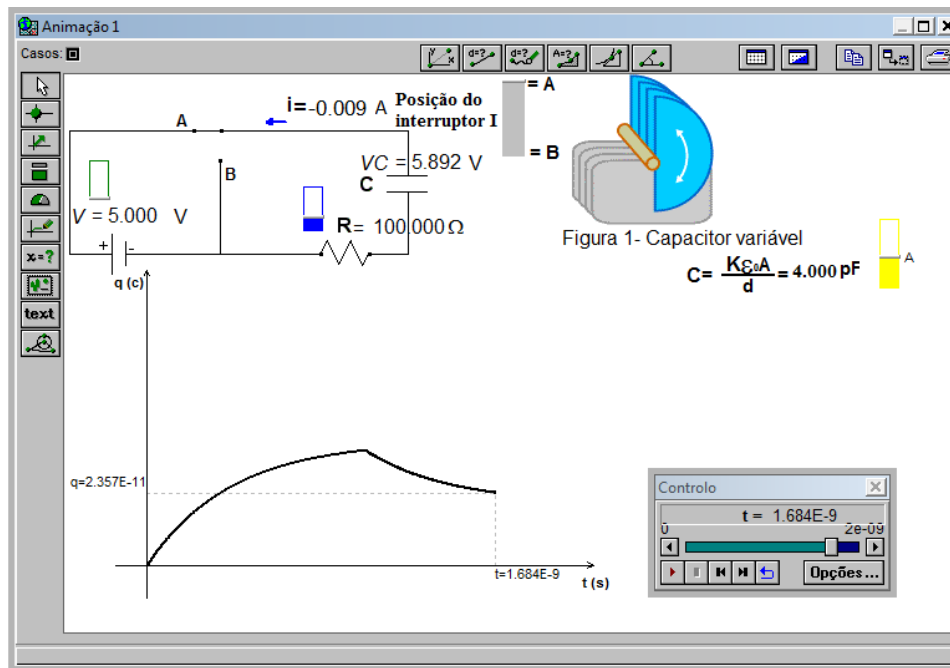


Figura 25: Janela Animação 1 de uma simulação computacional sobre um circuito RC com uma fonte de tensão contínua.

Atividade da Aula 1: inicialmente os alunos esboçaram o gráfico das diferenças de potencial no resistor (V_R) e no capacitor (V_C) em função do tempo para um circuito RC alimentado por um gerador de função, que fornece uma onda quadrada de 4 a 0 volts, com um período de oscilação de 2 ms. Na sequência eles foram solicitados a montarem um circuito com essas mesmas características e obterem as curvas de diferença de potencial V_R e V_C no osciloscópio e compararem com as previstas anteriormente e também com as apresentadas em uma simulação (Figura 26). Finalmente os alunos mediram experimentalmente a constante de tempo capacitiva e compararam com o valor teórico, apontando as possíveis fontes de erro e descrevendo detalhadamente os procedimentos experimentais realizados para obtenção da constante de tempo.

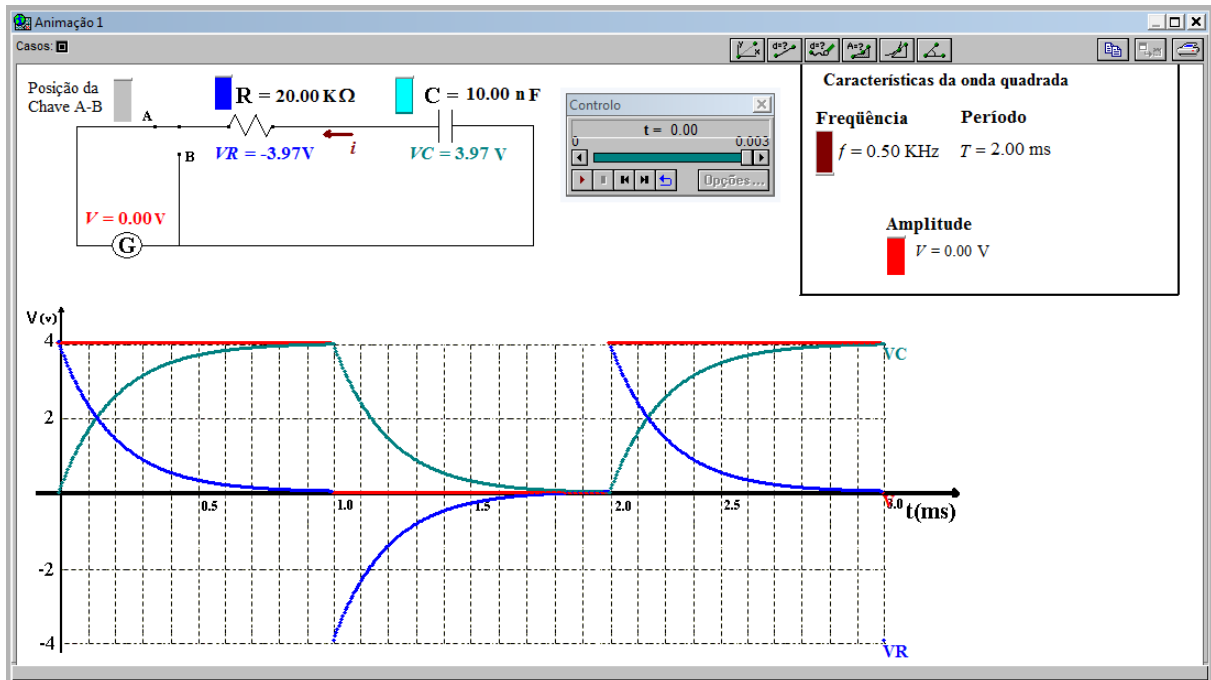


Figura 26: Janela Animação 1 de uma simulação computacional sobre um circuito RC com uma fonte de tensão alternada.

Aula 2

Nessa aula trabalhamos com circuitos contendo apenas um indutor ou um capacitor associado com um gerador de função.

AC da Aula 2: estudo do diagrama de fase para circuitos indutivos e capacitivos a partir de duas simulações sobre circuitos puramente capacitivo e puramente indutivo de corrente alternada. Essas simulações permitem alterar a frequência de excitação do gerador e a capacitância do capacitor para o caso do circuito puramente capacitivo (Figura 27), assim como a indutância para o puramente indutivo (Figura 28).

Atividade da Aula 2: os alunos inicialmente montaram um circuito real contendo somente um capacitor e um gerador para encontrarem experimentalmente a capacitância do capacitor e compararam o valor medido diretamente com o multímetro. Em continuidade os alunos substituíram o capacitor por um indutor para encontrarem experimentalmente a indutância do indutor. Nesse item instigamos os alunos a explorarem a partir de uma simulação (Figura 29) as diferenças entre um indutor real e um ideal (com resistência elétrica desprezível).

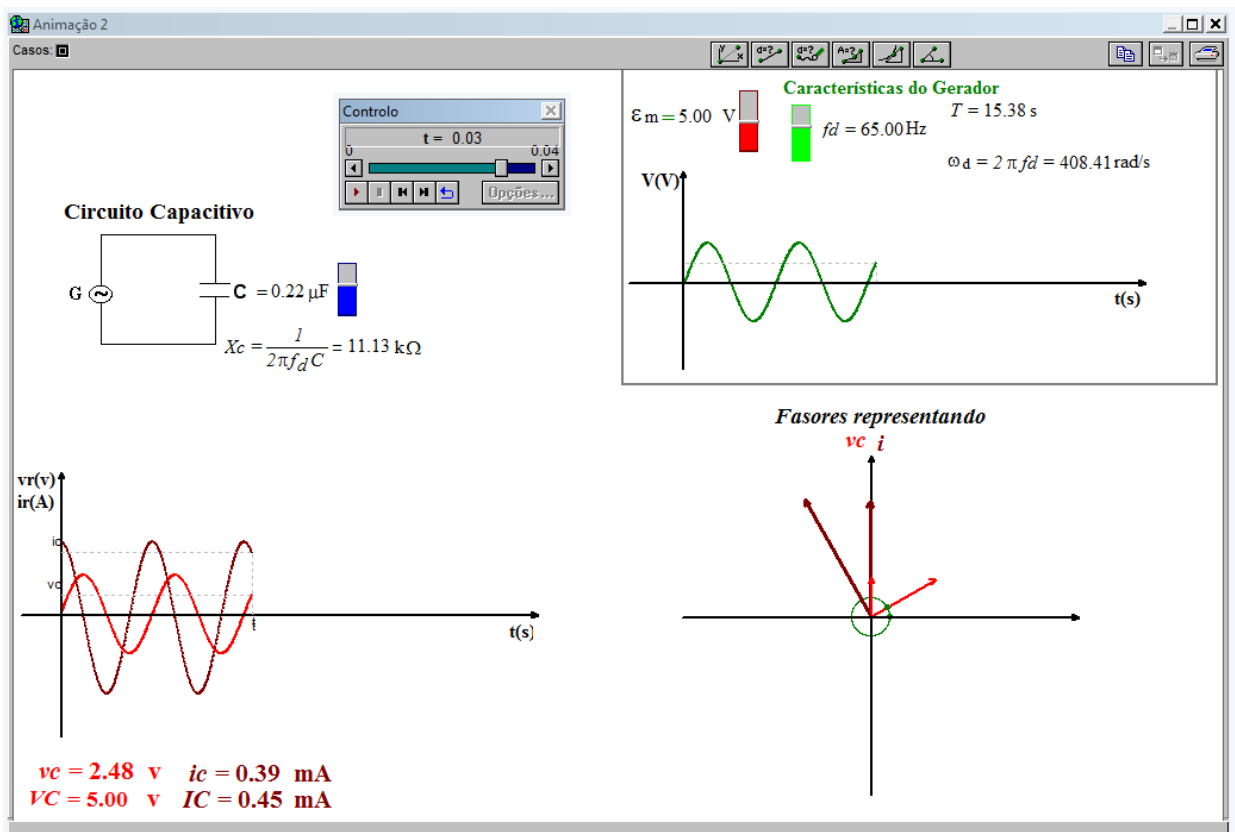


Figura 27: Janela Animação 2 de uma simulação computacional sobre um circuito de CA puramente capacitivo.

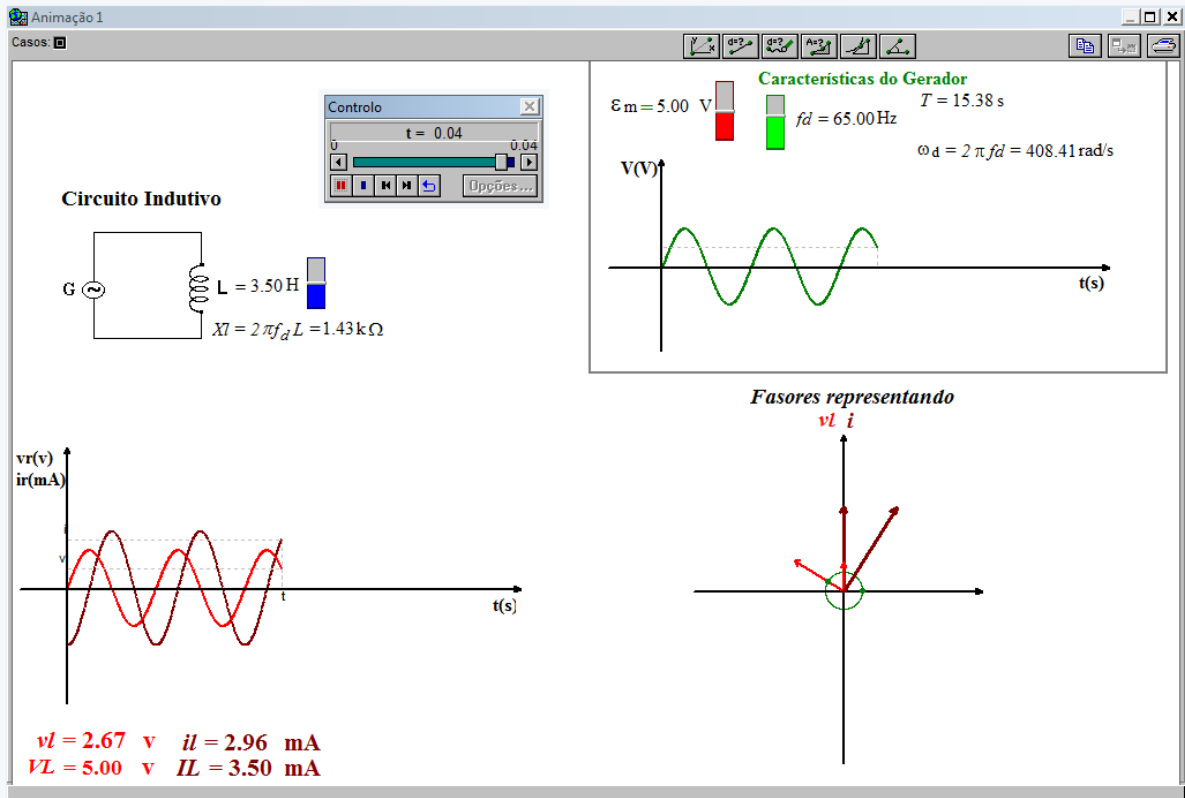


Figura 28: Janela Animação 1 de uma simulação computacional sobre um circuito de CA puramente indutivo.

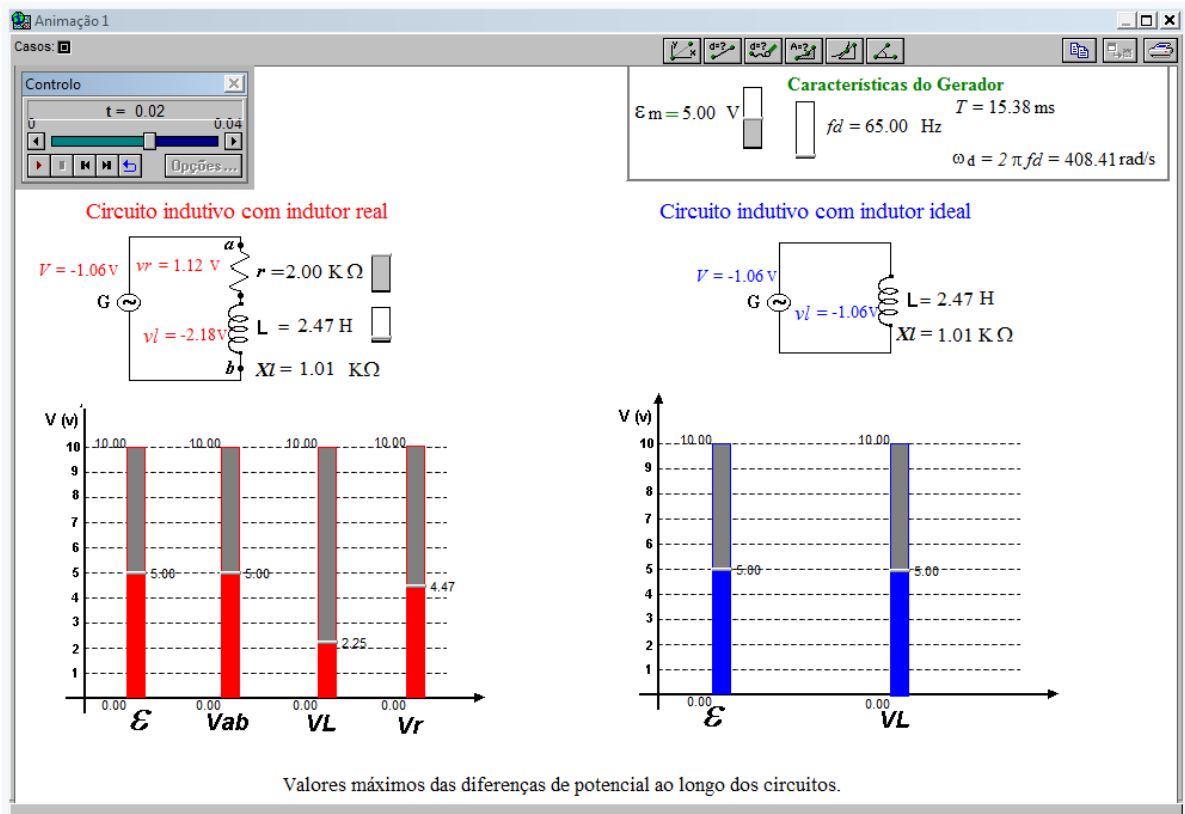


Figura 29: Janela animação de uma simulação computacional sobre um circuito de CA com indutor real e ideal.

Aula 3

Na aula em questão trabalhamos com um circuito elétrico RLC em série excitado senoidalmente por um gerador de função.

AC da Aula 3: análise de um diagrama de fasores de um circuito RLC de CA a partir da simulação proposta no estudo anterior (Figura 22).

AI da Aula 3: em relação ao estudo anterior, inserimos questões repletas de questionamentos, exigindo dos alunos um bom domínio conceitual. Como por exemplo: *i)* ajuste o gerador para frequência de 150 Hz e obtenha no osciloscópio as curvas de diferença de potencial v_R e \mathcal{E} (força eletromotriz fornecida pelo gerador). Neste caso o circuito pode ser considerado mais capacitivo, indutivo ou resistivo? Justifique sua resposta; *ii)* o que acontece com a diferença de potencial no resistor se a frequência do gerador for ajustada para 350 Hz; *iii)* com o gerador ajustado na frequência de ressonância do circuito, obtenha a curva de diferença de potencial v_R no osciloscópio e compare com a curva apresentada na Janela Animação 1 da simulação sobre CA (Figura 22). Explique a principal diferença entre estas curvas? *iv)* substitua o resistor de 2 k Ω por um de 20 k Ω . Por que neste caso praticamente não há diferenças entre o sistema real e o simulado?

7.3 RESULTADOS

Em nossas observações percebemos que os alunos das turmas A e B (dinâmicas AC-AI e AI-AC, respectivamente) na Aula 1 participaram mais ativamente da aula em comparação com as turmas C e D (dinâmicas AE-AI e AI-AE), principalmente em discussões sobre questões conceituais, no auxílio a seus parceiros de grupo e na formulação de respostas consensuais entregues no guia para avaliação. Adicionalmente, observamos que os alunos da Turma A se mostraram confiantes nas suas atitudes, sugerindo que sabiam o que estavam realizando e o que estavam aprendendo. Já os da Turma B evidenciaram alguma insegurança em relação ao entendimento dos conceitos físicos, sendo necessário em todos os grupos explicar detalhadamente os procedimentos experimentais requeridos para a realização das medidas experimentais e em alguns casos os alunos não foram capazes de relacionar a teoria com experimento.

Observamos novamente nas aulas 2 e 3 que os alunos que trabalharam com a dinâmica AC-AI se mostraram mais capazes para integrar teoria e experimentos. Ao manipularem os experimentos reais os alunos das turmas B, C e D (na Aula 3) trabalharam de forma consciente, demonstraram saber o que estava sendo proposto e o que estavam fazendo e não por tentativa-e-erro. Essas observações estão de acordo com os estudos de Zacharia e Anderson (2003) e Ronen e Eliahu (2000), que sugerem que o uso de AC constitui-se em uma preparação inicial para o ensino de laboratório. Isto ocorreu particularmente no estudo de circuitos elétricos, mas possivelmente não

tenha a ver com o conteúdo abordado. Este ponto ainda será alvo de nossas atenções. Também foi observado que a simulação integrada com o experimento auxiliou os alunos a refletirem mais sobre os procedimentos e as medidas realizadas por eles.

Cabe ainda ressaltar que na segunda e terceira aulas propusemos situações que exploram diferenças entre um sistema real e um sistema ideal. Por exemplo, na Aula 2 quando os alunos trabalhavam com uma atividade integrada sobre um circuito indutivo de corrente alternada foi proposto que eles encontrassem experimentalmente a indutância do indutor que se encontrava conectado com um gerador de função. Todos os alunos inicialmente desprezaram a resistência interna do indutor, encontrando um valor não muito preciso comparado com o teórico. Para auxiliar a perceberem o que estava interferindo nos resultados experimentais fornecemos uma simulação (Figura 29), que propiciou aos alunos uma visualização geral do circuito. À medida que eles foram interagindo com a simulação, gradualmente perceberam que com uma frequência baixa a reatância indutiva do indutor é da mesma ordem de grandeza da resistência interna, mas que com uma frequência alta a reatância indutiva se torna muito maior que a resistência interna. Então eles aumentaram a frequência de modo a obter uma reatância indutiva muito maior que a resistência interna do indutor e realizaram novas medidas, encontrando um valor para indutância dentro da margem de erro. Percebemos que a simulação foi muito útil para os alunos visualizarem a situação proposta e encontrarem uma solução para poderem distinguir um sistema ideal de um real. A seguir transcrevemos três exemplos de respostas dos alunos nos guias:

“A diferença se dá porque um indutor real tem resistência elétrica. Para tornar esta resistência desprezível, aumenta-se muito a frequência do circuito. A reatância indutiva tem uma função de resistência à corrente no circuito, e ela depende da frequência. Então quando aumentamos f , a reatância indutiva fica muito grande e a resistência interna desprezível” (Aluno 20).

“Medindo a indutância do indutor com uma frequência baixa obtemos um erro consideravelmente grande. Se a frequência for alta a reatância indutiva é alta e podemos desprezar a resistência interna do indutor. Feito isso obtivemos um erro de 0,27%, com baixa frequência o erro foi de 24%” (Aluno 10).

“Primeiro, muito inocentemente, calculamos a corrente e a tensão no indutor com uma frequência baixa. Neste caso, a resistência interna do indutor é da mesma ordem de grandeza da reatância indutiva, dando uma grande diferença para a indutância. Depois calculamos com uma frequência maior, o que nos deu um valor mais preciso” (Aluno 24).

Nas aulas 2 e 3, em que exploramos as idealizações presentes nos modelos teóricos os alunos se mostraram mais motivados e ativos, em comparação aos alunos do estudo anterior, para apresentarem respostas com alguma justificativa conceitual. **Todos** na entrevista responderam que a discriminação entre sistemas reais e ideais foi o que mais chamou-lhes a atenção durante todo o semestre. Em suas próprias palavras:

“O que eu mais tenho a destacar é o confronto entre o que a gente vê no computador e o que a gente vê na prática ali do lado, essa diferença entre o teórico e o prático é muito interessante” (Aluno 7).

“Aprendi muitas coisas úteis. Se me perguntassem as diferenças entre um indutor real e um ideal eu encontraria dificuldades em explicar, mas agora com a interação com o computador, em que vi os gráficos tenho tudo mais claro” (Aluno 4).

7.4 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES

Com o propósito de levantar proposições norteadoras sobre como integrar atividades experimentais e computacionais inicialmente buscamos na literatura estudos que fazem uma reflexão sobre o uso de atividades experimentais e computacionais (tabelas 7 e 8) e posteriormente reelaboramos três atividades concebidas em estudos anteriores e implementamos nesse estudo usando os métodos colaborativo presencial e PIE.

Apesar de que o tempo de nossa investigação (três aulas) foi muito reduzido e não se possa tirar conclusões definitivas, constatamos que nas aulas em que os alunos interagiram inicialmente com AC durante a realização das AI eles se mostraram mais capazes de utilizar os conceitos físicos trabalhados nas nossas exposições teóricas ao realizarem medidas experimentais. Ao final dos guias quando solicitamos o detalhamento dos procedimentos experimentais adotados os alunos explicitaram elementos que evidenciam que as atividades propostas instigaram-los a pensar, explorar, testar hipóteses, propor possíveis delineamentos experimentais para realizarem medidas. Também constatamos que as AE auxiliaram os alunos na análise sobre o contexto de validade dos modelos teóricos envolvidos nas AC. Esse estudo foi apresentado no VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias (Dorneles, Veit e Araujo, 2009).

Com base nos dados coletados nesta implementação estabelecemos as seguintes proposições norteadoras de um novo estudo:

1. a integração entre atividades computacionais e experimentais pode:
 1. promover a interatividade e o engajamento dos alunos em seu próprio aprendizado, transformando a sala de aula em um ambiente propício para uma aprendizagem significativa dos conceitos físicos envolvidos;
 2. proporcionar aos alunos uma visão epistemológica sobre os papéis do laboratório, do computador e de modelos teóricos;
 3. dinamizar a comparação entre dados experimentais e previsões teóricas, o que facilita a análise do contexto de validade dos modelos teóricos e a validade dos dados experimentais;
2. atividades computacionais podem fornecer uma visualização mais geral e imediata de sistemas físicos idealizados, constituindo-se em uma preparação inicial para o ensino de laboratório;
3. atividades experimentais que exijam dos alunos a proposição de delineamentos experimentais podem favorecer o aprendizado de técnicas de laboratório.

Tais proposições nortearam o quarto e último estudo desta tese, de cunho explanatório, descrito no próximo capítulo.

CAPÍTULO 8

SÍNTESE DO QUARTO ESTUDO

Os resultados do terceiro estudo, além de gerarem um conjunto de proposições norteadoras, indicaram a possibilidade de que a integração proposta propicie aos alunos um adequado vínculo entre teoria e realidade, tornando viável a proposição de atividades que explorem em sala de aula o contexto de validade de modelos teóricos e a confiabilidade de dados experimentais. Isso nos motivou a utilizar como marco teórico nesse estudo, além da teoria de Ausubel (2003) e de Vigotski (Vygotsky, 2003; Vigotski, 2001), a visão epistemológica de Bunge (1974).

8.1 OBJETO DE ESTUDO

Partimos de duas das proposições norteadoras geradas no terceiro estudo, quais sejam, a integração entre AC e AE pode:

- 1) proporcionar aos alunos uma visão epistemológica sobre os papéis do laboratório, do computador e de modelos teóricos e
- 2) promover a interatividade e o engajamento dos alunos em seu próprio aprendizado, transformando a sala de aula em um ambiente propício para uma aprendizagem significativa dos conceitos físicos envolvidos.

8.2 METODOLOGIA

O presente estudo de caso é do tipo explanatório de casos múltiplos (cada aluno constitui-se em um caso), segundo a aceção de Yin (2005), em que visamos explicar relações de causa e efeito a partir de proposições norteadoras. Na Tabela 13 vinculamos tais proposições com as variáveis a serem medidas ao longo do estudo e os instrumentos de medidas utilizados para medir tais variáveis.

Tabela 13 – Relação entre proposições norteadoras, variáveis medidas e instrumentos de medidas.

Proposições norteadoras	Variáveis medidas	Instrumentos de medida
1	Visão do papel de modelos teóricos Visão do papel do laboratório Visão do papel do computador	Entrevista semi-estruturada Questões dissertativas Notas de campo Guias preenchidos Teste sobre a natureza da Ciência
2	Motivação Significância do material	Guias preenchidos Entrevista semi-estruturada
	Desempenho conceitual	Questões de prova Guias preenchidos

A Figura 30 ilustra o esquema de avaliação empregado. Para analisar a aprendizagem significativa, por parte dos alunos, do conteúdo de Eletromagnetismo em nível de Física Geral, levando em conta as condições para ocorrência da aprendizagem significativa (apresentadas na seção 3.1.3), realizamos medidas sobre a aprendizagem conceitual, a motivação e a significância para cada aluno do material instrucional proposto. Consideramos que nosso material possui estrutura lógica, pois foi validado por dois especialistas no assunto (físicos professores das aulas teóricas e experimentais). Em relação aos alunos possuírem conhecimento prévio em sua estrutura cognitiva para acompanharem as explicações e os raciocínios propostos no material, buscamos indicadores sobre o desempenho dos alunos nas tarefas e opiniões sobre o material.

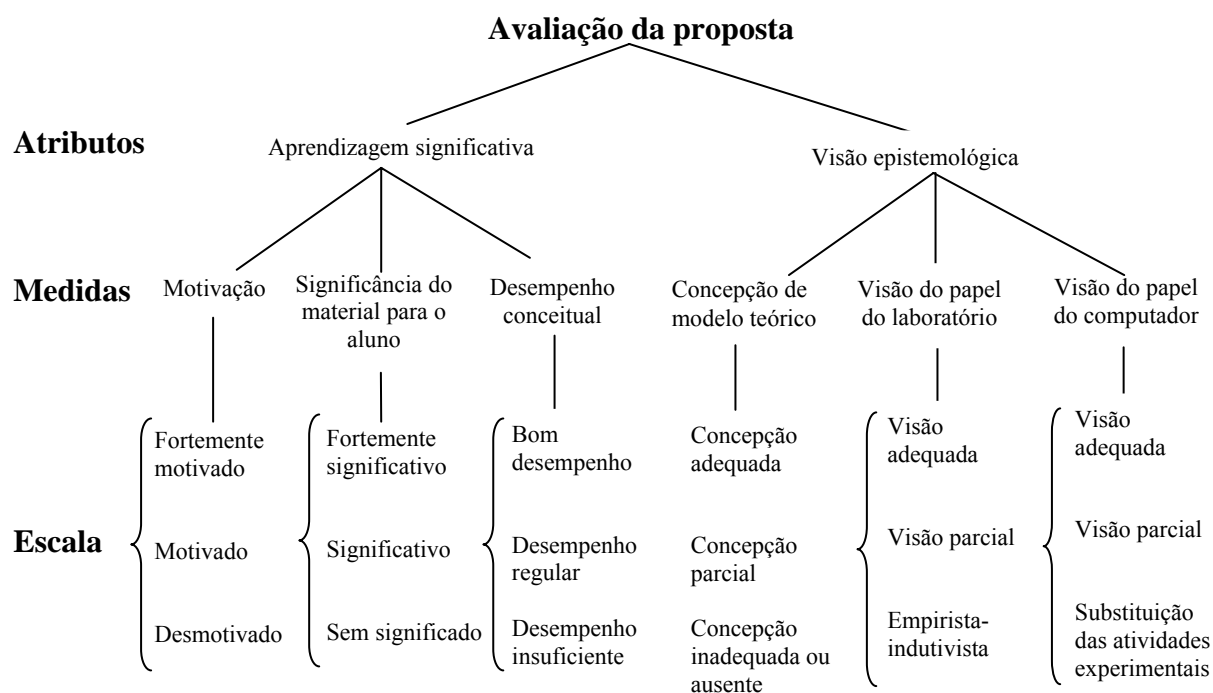


Figura 30 – Esquema de avaliação de nossa proposta didática.

Em relação ao desenvolvimento de uma concepção adequada sobre Ciência buscamos medir a compreensão dos alunos a respeito dos modelos teóricos empregados e do papel do laboratório e do uso do computador em Física. Nossa expectativa é que, ao concluir o procedimento didático, os alunos percebessem os modelos teóricos como construtos físicos que são desenvolvidos com o objetivo de representarem parcialmente sistemas reais. Deveriam, ainda, perceber que: *i)* os referentes diretos dos modelos teóricos são sistemas ideais e não sistemas reais; *ii)* que hipóteses teóricas são corroboradas com dados experimentais somente se os parâmetros considerados desprezíveis nos modelos teóricos não influenciarem significativamente as medidas experimentais; *iii)* que, nesse caso, o modelo teórico é capaz de representar com certo grau de precisão o comportamento de grandezas físicas presentes no sistema real e, *iv)* caso contrário, faz-se necessário incluir outros efeitos para aperfeiçoar o modelo ou construir outro completamente diferente. Para isso não

planejamos introduzir, em sala de aula conceitos básicos da epistemologia de Bunge, como são os conceitos de objeto-concreto, de objeto-modelo (modelo conceitual), de modelo teórico (teoria específica), mas simplesmente levar em conta tais conceitos na readaptação das atividades propostas nos estudos anteriores para que as atividades integradas promovessem a reflexão dos alunos sobre as idealizações e o domínio de validade dos modelos teóricos.

Em relação ao papel do laboratório desejávamos que os alunos percebessem a prática experimental como um recurso capaz de: *i)* intensificar a aprendizagem de conceitos científicos; *ii)* propiciar a exploração do contexto de validade de modelos teóricos; *iii)* proporcionar a integração entre teoria e realidade; *iv)* estimular a geração e teste de hipóteses; Enfim, adquirissem “*uma visão de que a ciência contemporânea não é apenas experimentação e sim teoria mais experiência, executada e interpretada à luz de teorias* (Bunge, 1974, p. 10)”. Em outras palavras, que modelos teóricos versam sobre sistemas físicos que geram previsões teóricas, confrontadas com evidências encontradas a partir de dados experimentais obtidos e interpretados à luz de teorias instrumentais já consolidadas.

Sobre o papel do computador esperamos que os alunos o considerassem como um recurso instrumental capaz de: *i)* intensificar a aprendizagem de conceitos científicos; *ii)* propiciar uma visualização mais geral e imediata de sistemas idealizados comparada com representações estáticas; *iii)* tornar mais dinâmica a

comparação entre sistemas ideais e reais; *iv*) facilitar o entendimento sobre o papel de modelos teóricos e *v*) estimular a geração e teste de hipóteses.

No presente estudo trabalhamos uma turma da disciplina de Física Geral e Experimental III (Eletromagnetismo) oferecida pelo Departamento de Física da UFRGS em 2008, para alunos da licenciatura noturna. Trabalhamos com todo o conteúdo da disciplina, abarcando todas as aulas experimentais (18) e sete aulas originariamente teóricas. Cada aula teórica teve a duração de 1h40min e as experimentais de 2h30min cada. Em quase metade das aulas (12/25) AC foram seguidas de atividades integradas (AC-AI); em 4, trabalhamos somente com teoria (T); em 5, com AC e em 4 aulas com AE. Para cada aula estabelecemos quais as variáveis a serem medidas (primeira coluna da Tabela 14). Todas as aulas foram planejadas de acordo com os métodos colaborativo presencial e PIE, descritos na seção 4.3. A seguir apresentamos as principais características dessas aulas e na seção de discussão dos resultados faremos uma reflexão sobre a forma de implementação das atividades.

Aula 1(T) – Apresentação

Após a apresentação da professora responsável pelas aulas experimentais dessa turma e do presente autor, os alunos responderam um pré-teste (Anexo D) e duas questões dissertativas (Apêndice E) sobre a natureza da Ciência. Em continuidade discutimos alguns elementos sobre o ensino de laboratório e apresentamos a nossa síntese sobre os fatores positivos das AE e os fatores negativos das tradicionais aulas de laboratório (Tabela 7).

Tabela 14 – Cronograma de implementação das atividades concebidas e variáveis a serem medidas.

Variáveis medidas	T*	AC	AE	AC	AE	T	T	ACAI				T	AC-AI	AE		AC			AC-AI							
	Aula 1	Aula 2	Aula 3	Aula 4	Aula 5	Aula 6	Aula 7	Aula 8	Aula 9	Aula 10	Aula 11	Aula 12	Aula 13	Aula 14	Aula 15	Aula 16	Aula 17	Aula 18	Aula 19	Aula 20	Aula 21	Aula 22	Aula 23	Aula 24	Aula 25	
	Apresentação	Linhas de campo	Medidas elétricas	Lei de Gauss	Campo eletrostático (Cuba)	Circuitos simples						Circuitos RC			Campo magnético terrestre	Lei de Ampère	Força magnética	Faraday-Lenz	Circuitos RL		Circuitos LC e RLC		Corrente alternada			
						Teoria sobre i, J, R	Teoria sobre circuitos simples	Associação em:			Fonte Real	Teoria sobre capacitância	Circuitos RC	Circuitos RC diferenciador integrador												
								Série	Paralelo	Misto																
Aprendizagem de conceitos de Física		F_E, E		Φ_E, E	E	i, R	i, v, R	I, v, R	i, v, R	i, v, R	i, v, r, ε, R	C	v, i, C, τ_C	v, i, C, τ_C	B	B, i	F_B, B	$\varepsilon_{ind}, \Phi_B$	v, i, L, τ_L	v, i, L, τ_L	q, i, f_N, U_E, U_B, U	X_L, X_C, f	$V_R, V_C, V_L, i, f, f_N, \theta$			
Motivação		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Significância do material		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Visão de modelos teóricos	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X			X	X	X	X	X	X	X	X
Visão do papel do laboratório	X		X		X			X	X	X	X		X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X
Visão do papel do computador	X	X		X				X	X	X	X		X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

*T – Introdução teórica, AE – Atividade experimental, AC – Atividade computacional, AI – Atividade integrada.

Nessa aula também procuramos instigar os alunos a pensarem sobre o domínio de validade de modelos teóricos a partir da resolução do seguinte problema proposto por Brandão, Araujo e Veit (2008, p. 12 e 13): Um caminhão de 20 m de comprimento atravessa uma ponte de 60 m de comprimento com velocidade constante de 72 km/h. Determine: a) o intervalo de tempo gasto para o caminhão atravessar completamente esta ponte; b) qual deve ser o intervalo de tempo gasto para o caminhão atravessar completamente uma ponte de 2000 m de comprimento; c) em qual das situações anteriores é possível considerar o caminhão como uma partícula pontual: justifique sua resposta estimando o erro percentual no intervalo de tempo gasto para a travessia em ambos os casos; d) que implicações físicas decorrem de considerar o caminhão uma partícula pontual.

Aula 2 (AC) – Força elétrica e campo elétrico

Para familiarizar os alunos com atividades computacionais traduzimos e adaptamos nove Physlets (aplicações em Java com conteúdo de Física) propostas por Belloni e Christian (2010) sobre os conceitos de força elétrica e campo elétrico (Anexo E, que contém guias para os alunos desenvolverem as AC deste estudo). Na Figura 31 ilustramos um dos Physlets utilizados, no qual ao “clique” sobre as cargas elétricas e arrastá-las para qualquer posição os alunos deveriam identificar quantas cargas possuem mesmo sinal.

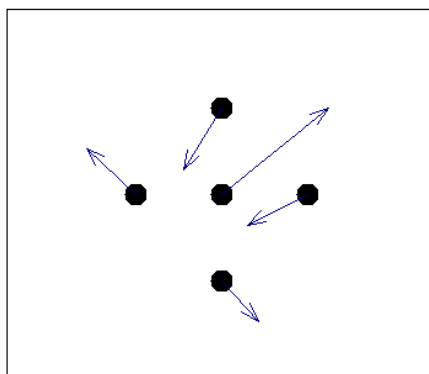


Figura 31 – Tela ilustrativa de um Physlets proposto por Belloni e Christian (2010) sobre os conceitos de carga e força elétrica.

Aula 3 (AE) – Medidas elétricas

Utilizamos o roteiro usual da disciplina sobre medidas elétricas com o objetivo de familiarizar os alunos com instrumentos de medida (multímetros e osciloscópios), visando o aprendizado e utilização destes equipamentos na realização de medidas de grandezas elétricas (Figura 32). O Anexo F contém os quatro roteiros utilizados ao longo deste estudo.



Figura 32 – Foto ilustrativa da aula experimental sobre medidas elétricas.

Aula 4 (AC) – Lei de Gauss

Nessa aula usamos três simulações sobre a Lei de Gauss (Anexo E) concebidas por Araujo (2005), que também foram traduzidas e adaptadas dos Physlets propostos por Belloni e Christian (2010). Na Figura 33 exemplificamos uma das AC desenvolvidas pelos alunos, na qual pode ser calculado o fluxo elétrico através de três superfícies gaussianas (verde, azul e vermelha), sendo necessário imaginar que os círculos são esferas, pois a simulação mostra somente duas dimensões de um mundo tridimensional.

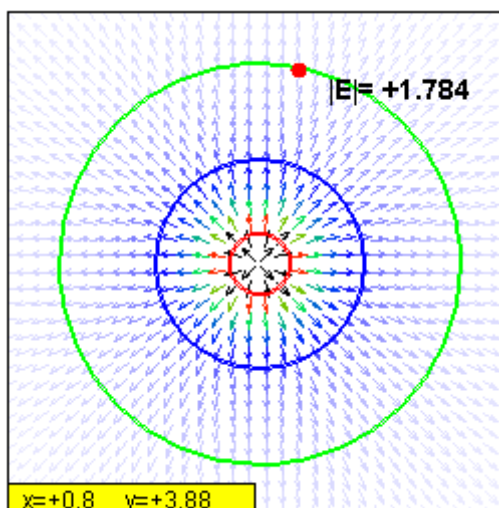


Figura 33 – Figura ilustrativa de uma simulação computacional sobre a Lei de Gauss.

Aula 5 (AE) – Campo Eletrostático

Utilizando um roteiro tradicional da disciplina (Anexo E) os alunos obtiveram as superfícies equipotenciais de um dipolo elétrico em uma cuba com água e traçaram em um papel milimetrado as superfícies encontradas para obterem a configuração do campo elétrico do dipolo elétrico e obtiveram o módulo do campo em quatro pontos a

partir das variações do potencial nos eixos x e y . Também analisaram as alterações na configuração das linhas de campo elétrico ao inserir um cilindro condutor no centro do dipolo elétrico.

Aula 6 e 7(T) – Circuitos simples

Nessas duas aulas puramente teóricas abordamos os conteúdos dos capítulos 27 (corrente elétrica) e 28 (circuitos simples) do livro texto da disciplina (Halliday, Resnick e Walker, 2003). Inicialmente fizemos uma exposição teórica envolvendo os conceitos mais gerais, no restante das aulas os alunos resolverem problemas extraídos do livro texto. Por exemplo, na Aula 7, realizamos uma exposição teórica no quadro com o objetivo de relacionar os conceitos de diferença de potencial, resistência elétrica e corrente elétrica e contextualizar com situações do cotidiano. Em prosseguimento trabalhamos com associações de resistores em série e paralelo. No restante da aula os alunos em duplas resolveram quatro problemas. Na aula seguinte entregamos para as duplas os problemas corrigidos e fizemos uma breve discussão com todos os alunos comentando as principais dificuldades enfrentadas pelos alunos na resolução dos problemas.

Aula 8 (AC-AI) – Associação de resistores em série

Conforme já relatamos na seção 4.3, a nossa dinâmica de integração constitui-se na seguinte sequência: após uma breve introdução teórica os alunos desenvolvem atividades computacionais e, na última etapa, manipulam materiais experimentais para

medir algum parâmetro significativo do sistema físico abordado na AC. Nessa etapa, sempre que possível, disponibilizamos uma simulação mais realista em comparação à utilizada pelos alunos no início da aula, para auxiliá-los durante a realização das medidas experimentais. O Apêndice F contém os guias de todas as atividades integradas concebidas nesse estudo. A título de ilustração sobre as introduções teóricas apresentamos no Apêndice G a exposição inicial sobre circuitos RC.

AC da Aula 8

Os alunos trabalharam com uma simulação sobre associação de resistores em série. Inicialmente fizeram previsões sobre o comportamento das grandezas físicas envolvidas nesses circuitos e na sequência interagiram com a simulação. Na janela Animação 2 (Figura 34), com o auxílio dos amperímetros, é possível observar o comportamento da corrente elétrica ao longo do circuito e na Animação 1 (Figura 34), com o auxílio dos voltímetros, é possível observar a diferença de potencial para os vários pares de pontos ao longo do circuito.

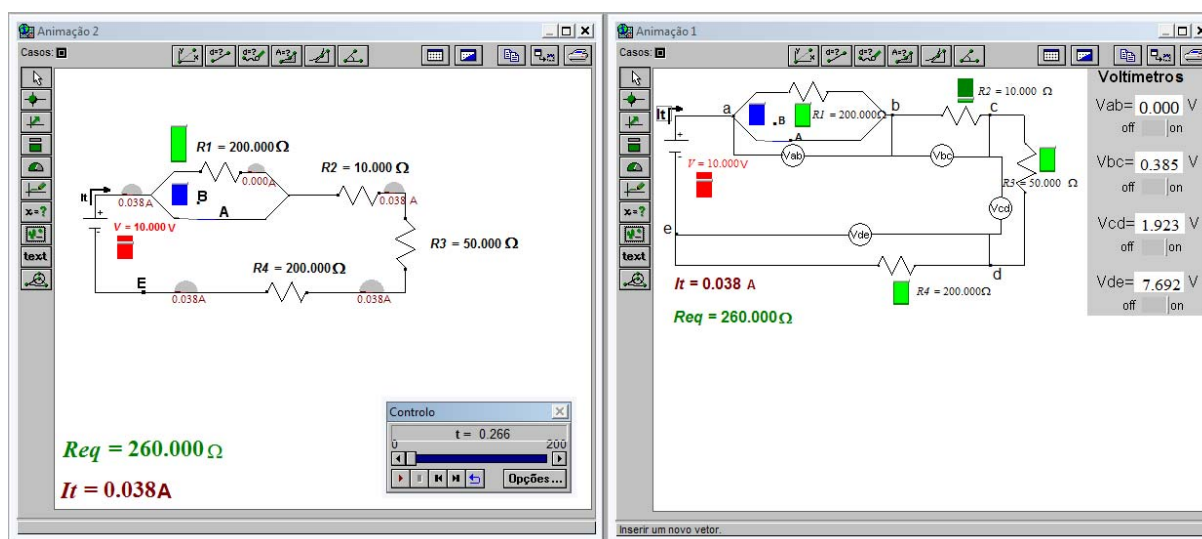


Figura 34 – Janelas Animação 1 e 2 de uma simulação computacional sobre um circuito com resistores associadas em série.

AI da Aula 8

Em um segundo momento os alunos montaram um circuito real com as mesmas características do representado na simulação e encontraram experimentalmente a potência dissipada em cada resistor e a potência da fonte. Ao final, compararam os dados experimentais com os obtidos a partir da interação com a simulação e apontaram as possíveis fontes de erro.

Aula 9 (AI) – Associação de resistores em paralelo

Nessa aula trabalhamos com associações de resistores em paralelo. As atividades computacional e integrada foram apresentadas como exemplo de nossa dinâmica de integração na seção 4.3 (figuras 16-19). Damos destaque para essas atividades, pois em relação aos estudos anteriores nessa aula aprofundamos a abordagem com fonte real.

Aula 10 (AI) – Lâmpadas elétricas em associação mista

Concluída nossa abordagem sobre associações em série e em paralelo concebemos uma AI sobre associação mista que constitui-se em um circuito elétrico montado dentro de uma caixa (Figura 35), ficando visível no lado externo da caixa somente quatro lâmpadas e as pilhas. Solicitamos para os alunos desenharem um diagrama que represente o circuito elétrico, sem abrir a caixa. Eles podiam testar o circuito girando as lâmpadas de modo a acendê-las ou apagá-las. Ainda com a caixa

fechada os alunos utilizaram um multímetro e uma simulação computacional (Figura 36) para testarem suas predições sobre o diagrama desenhado e finalmente abriram a caixa para ver se o diagrama proposto era capaz de representar o circuito real.

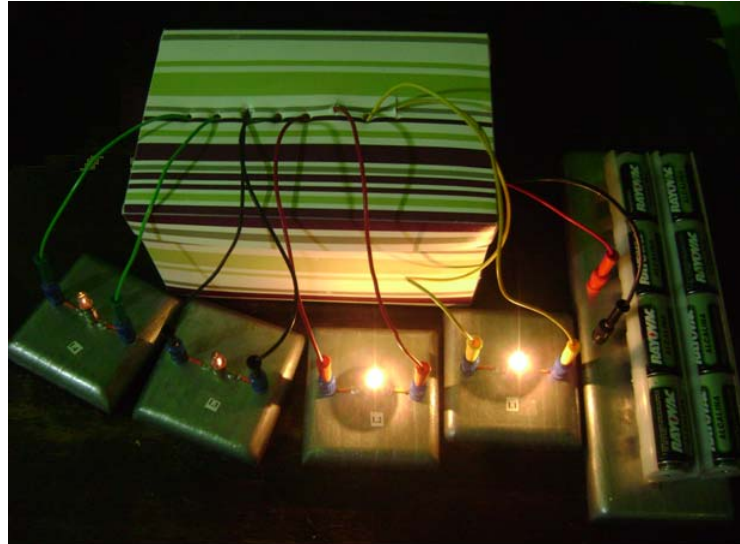


Figura 35 – Figura ilustrativa da atividade sobre um circuito elétrico montado dentro de uma caixa.

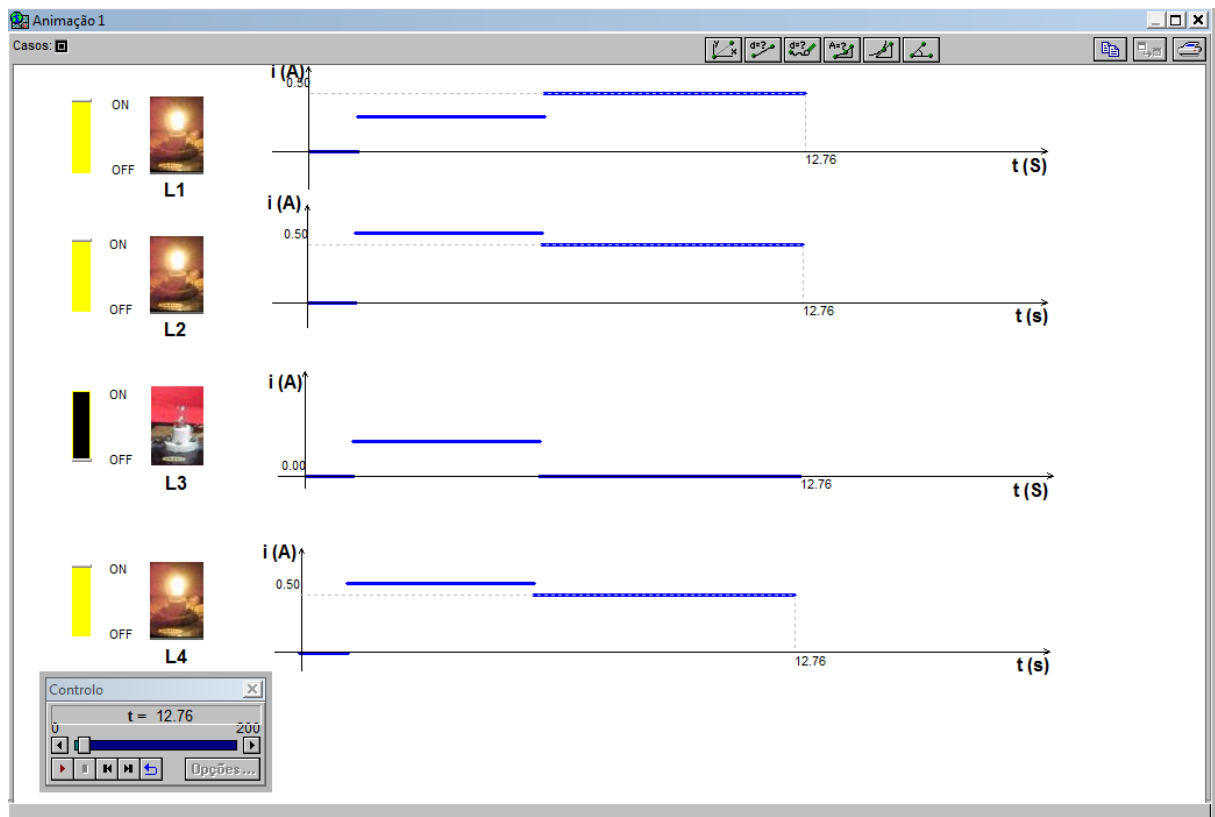


Figura 36: Janela Animação 1 de uma simulação computacional sobre um circuito elétrico simples contendo lâmpadas associadas.

Aula 11 (AC-AI) – Fonte real

AC da Aula 11

A AC constitui-se na construção de um modelo computacional capaz de representar o comportamento da potência dissipada em um resistor elétrico (ôhmico e de resistência elétrica variável) associado com uma fonte real (Figura 37). A Figura 38 ilustra um modelo construído pelos alunos.

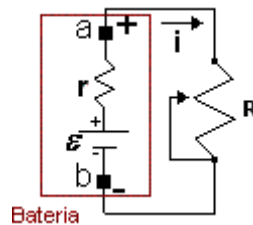


Figura 37 – Representação de um circuito elétrico simples com fonte real.

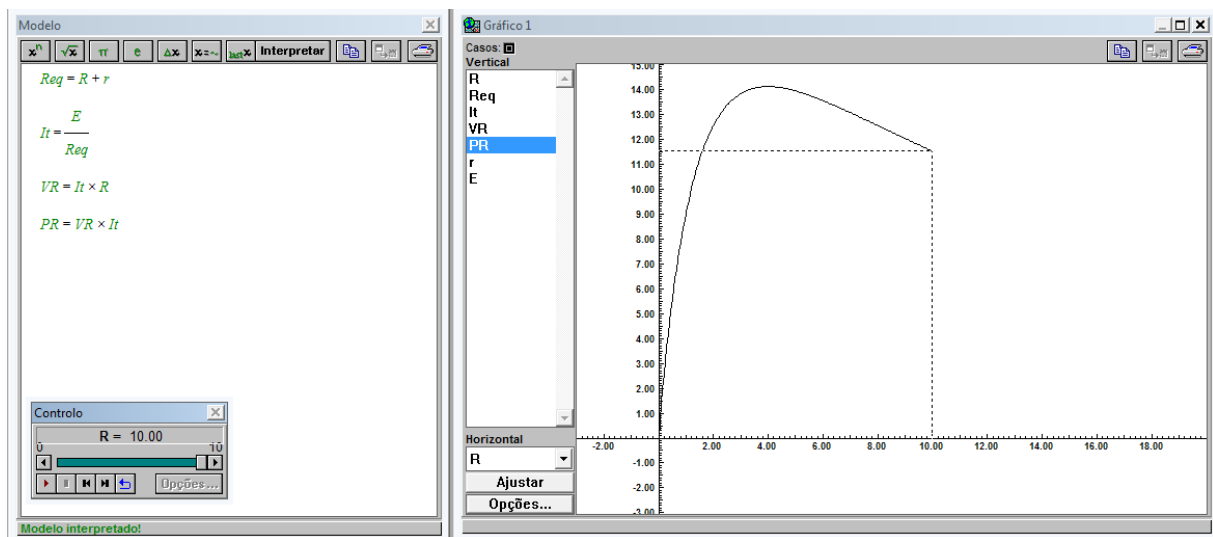


Figura 38 – Janela Modelo e Janela Gráfico de um modelo desenvolvido pelos alunos.

AI da Aula 11

Na parte integrada os alunos foram solicitados a encontrarem experimentalmente a resistência interna de uma fonte real e calcularem a incerteza

total da medida. Para isso, quando necessário eles interagiram com o modelo computacional construído e utilizaram o computador na análise e tratamento dos dados experimentais.

Aula 12 (T) – Teoria sobre capacitância

Essa foi a nossa última aula puramente teórica. Abordamos a teoria sobre capacitores com base no capítulo 26 do livro texto. Durante a aula os alunos resolveram seis problemas teóricos, em duplas.

Aula 13 (AC-IA) – Circuitos RC

Começamos a aula com uma discussão sobre os problemas trabalhados na aula anterior.

AC da Aula 13

Os alunos trabalharem com uma simulação, implementada em todos os estudos anteriores, sobre o comportamento da quantidade de carga elétrica armazenada em um capacitor durante os processos de carga e descarga (Figura 25).

AI da Aula 13

Nessa parte da aula os alunos mediram experimentalmente a constante capacitiva de um circuito RC, com o auxílio de outra simulação (Figura 26), que também foi implementada no estudo anterior.

Aulas 14 e 15 (AE) – Circuito RC como diferenciador e integrador e determinação do campo magnético terrestre local, respectivamente

Nessas aulas usamos novamente um roteiro usual da disciplina. Na aula 14 os alunos trabalharam com um circuito RC alimentado por um gerador que fornece uma onda quadrada ao circuito, em que foram desafiados a encontrarem os diferentes comportamentos do circuito RC (diferenciador ou integrador) ao alterar os valores da capacitância do capacitor, da resistência elétrica do resistor ou da frequência do gerador.

A Aula 15 constitui-se em nossa última aula puramente experimental. Os alunos obtiveram a componente horizontal do campo magnético terrestre local, utilizando uma bobina de Helmholtz, uma fonte, um amperímetro e uma bússola.

Aula 16 (AC) – Lei de Ampère

Para facilitar o entendimento fenomenológico da Lei de Ampère usamos três simulações propostas por Araujo (2005). Na Figura 39 ilustramos uma das atividades desenvolvidas pelos alunos, que envolve quatro fios condutores conduzindo corrente elétrica para “dentro” ou para “fora” da tela do computador (a posição é dada em mm e a intensidade do campo magnético em mT). Ao ativar a integral (o cursor se transformará em um lápis) pode-se desenhar um caminho fechado para o qual será calculada a integral do campo magnético na direção do percurso adotado $\left(\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}\right)$.

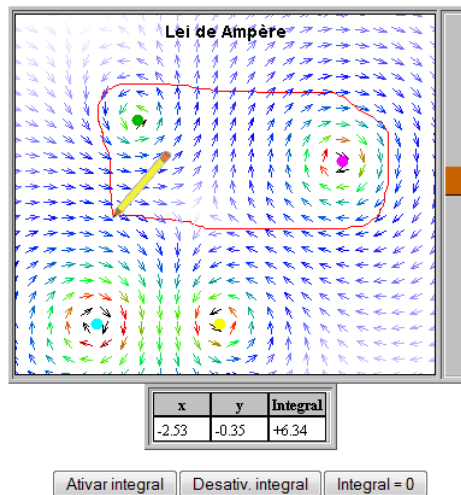


Figura 39 – Figura ilustrativa de uma simulação computacional sobre a Lei de Ampère.

Nessa aula também realizamos um entrevista individual semi-estruturada (Apêndice H), com o objetivo de colher indícios sobre a avaliação da nossa proposta didática e se necessário realizar alguns ajustes no delineamento do presente estudo.

Aula 17 (AC) – Força magnética

Para procurar superar a concepção inadequada dos alunos de que os resultados gerados pelo computador estão sempre corretos usamos como estratégia, na Aula 17 (Apêndice I), a inserção de um “erro” nas equações do modelo computacional de uma atividade sobre força magnética entre fios paralelos transportando correntes elétricas (Figura 40). Sem alertar os alunos o módulo da força elétrica em um dos fios foi colocado proporcional ao quadrado da distância, em vez de ser inversamente proporcional (Figura 41).

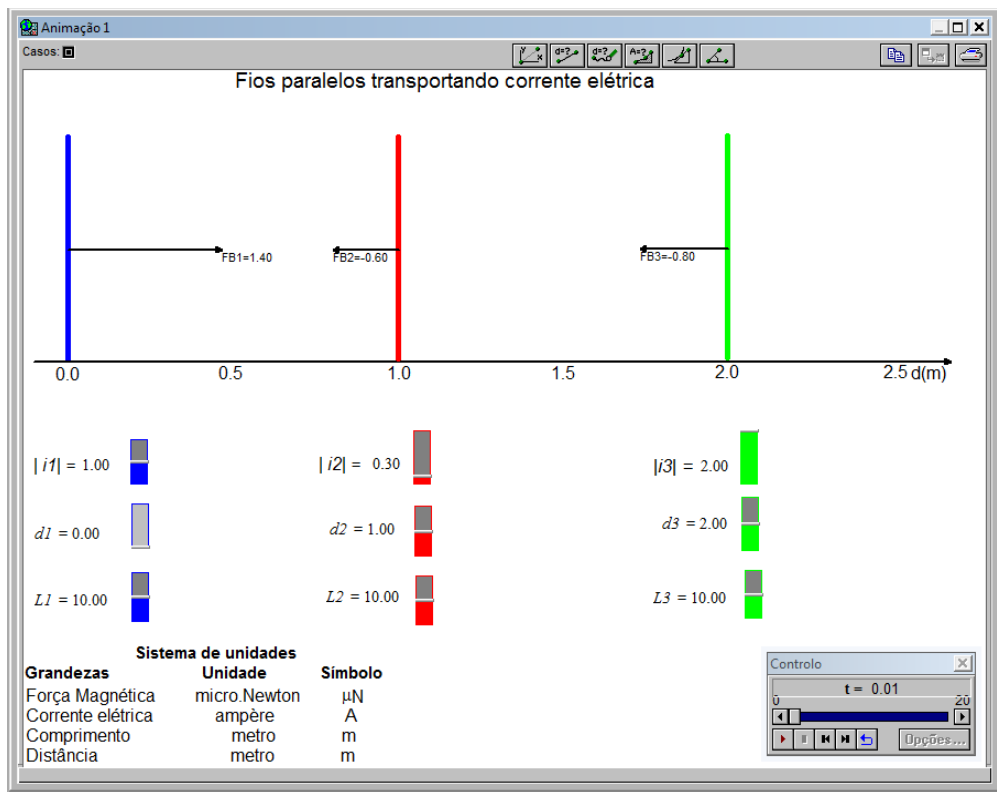


Figura 40: Janela Animação 1 de uma simulação computacional sobre força magnética em fios paralelos transportando corrente elétrica.

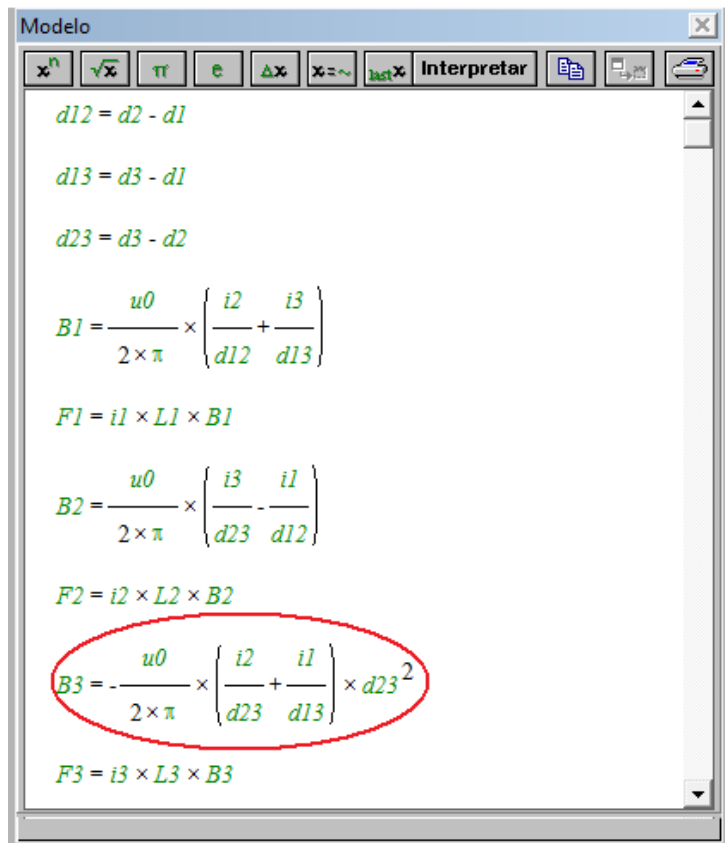


Figura 41 – Tela ilustrativa da janela Modelo do modelo computacional ilustrado na Figura 40.

Aula 18 (AC) – Lei de Faraday-Lenz

Nessa aula demos destaque para a força eletromotriz induzida em uma espira condutora, para facilitar além do entendimento fenomenológico da Lei de Faraday-Lenz a aquisição de ideias prévias por parte dos alunos sobre os efeitos de elementos indutivos em circuitos elétricos. Para isso, utilizamos três Physlets propostos por Belloni e Christian (2010) e traduzidos e adaptados por Ives Solano Araujo. Na Figura 42 ilustramos uma das atividades desenvolvidas pelos alunos, na qual uma espira está próxima a um fio condutor vertical conduzindo corrente de cima para baixo. Ao mover a espira o fluxo através da espira e a fem induzida são mostradas no gráfico.

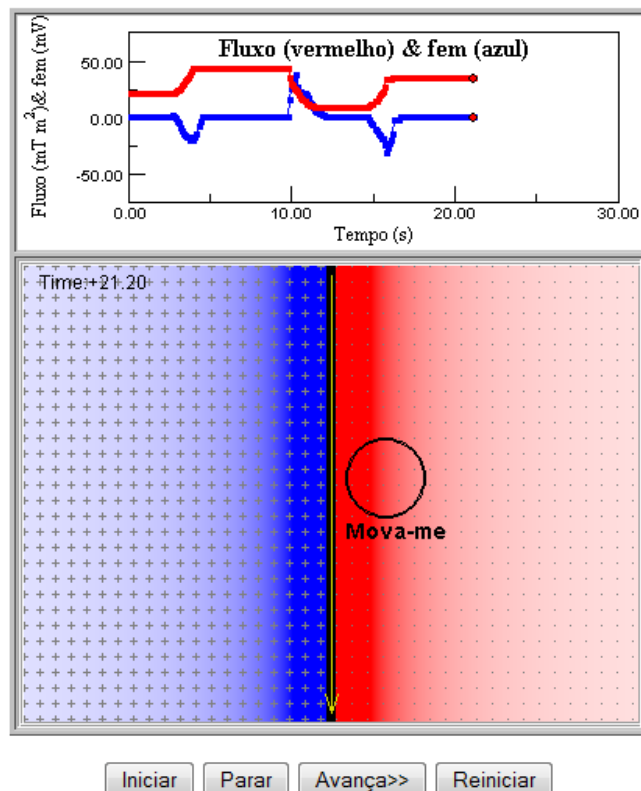


Figura 42 – Figura ilustrativa de uma simulação computacional sobre a Lei de Faraday-Lenz.

Aulas 19 e 20 (AC-AI) – Circuitos RL

Dedicamos duas aulas para o circuito RL, porque a AC constituiu-se em uma atividade de modelagem computacional, e assim possibilitamos aos alunos mais tempo para desenvolverem o modelo computacional.

AC das aulas 19 e 20

Conforme mencionamos na seção 4.3 fornecemos aos alunos a Janela Modelo do *Modellus* de um circuito RC (Figura 20) para servir como base para os alunos desenvolverem uma atividade de modelagem computacional sobre circuitos RL. Na Figura 43 ilustramos um modelo computacional construído pelos alunos. Destacamos que os alunos tiveram a possibilidade de trabalharem com dois casos. No primeiro (curva em preto) os alunos consideraram o indutor ideal e no segundo (curva em verde) trabalharam com um indutor real (com resistência elétrica).

AI das aulas 19 e 20

Após a construção do modelo computacional e de responderem algumas questões presentes no guia os alunos mediram a constante de tempo indutiva de um circuito RL. Também foram solicitados a estimarem a resistência elétrica interna do indutor com base nos resultados experimentais e teóricos obtidos com o modelo computacional.

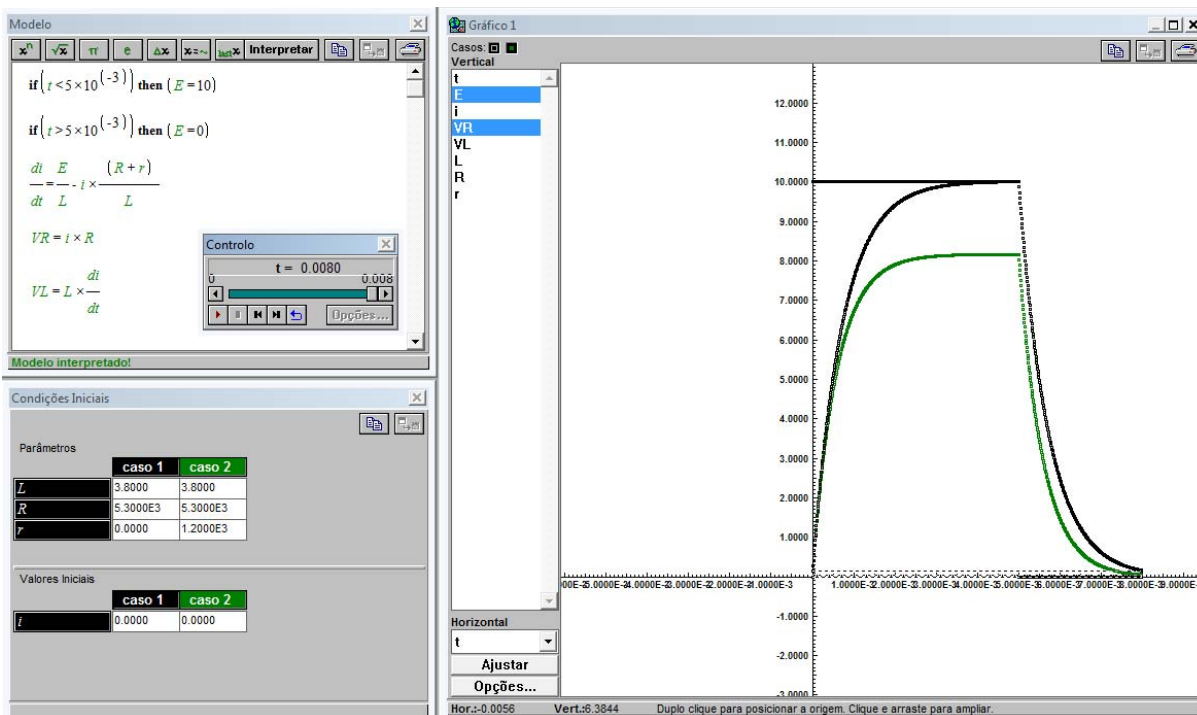


Figura 43 – Janela Modelo e Janela Gráfico de um modelo desenvolvido pelos alunos.

Aulas 21 e 22 (AC-AI) – Circuitos RLC

AC das aulas 21 e 22

A AC constitui-se em uma simulação computacional sobre circuitos LC ou RLC, na qual exploramos o comportamento dinâmico das principais grandezas físicas presentes nestes circuitos a partir de gráficos em função do tempo das seguintes grandezas: intensidade da corrente elétrica no circuito; carga elétrica armazenada no capacitor; energia elétrica armazenada no capacitor; energia magnética armazenada no indutor; energia eletromagnética armazenada no circuito (Figura 44, o circuito simulado pode ser resistivo ou não).

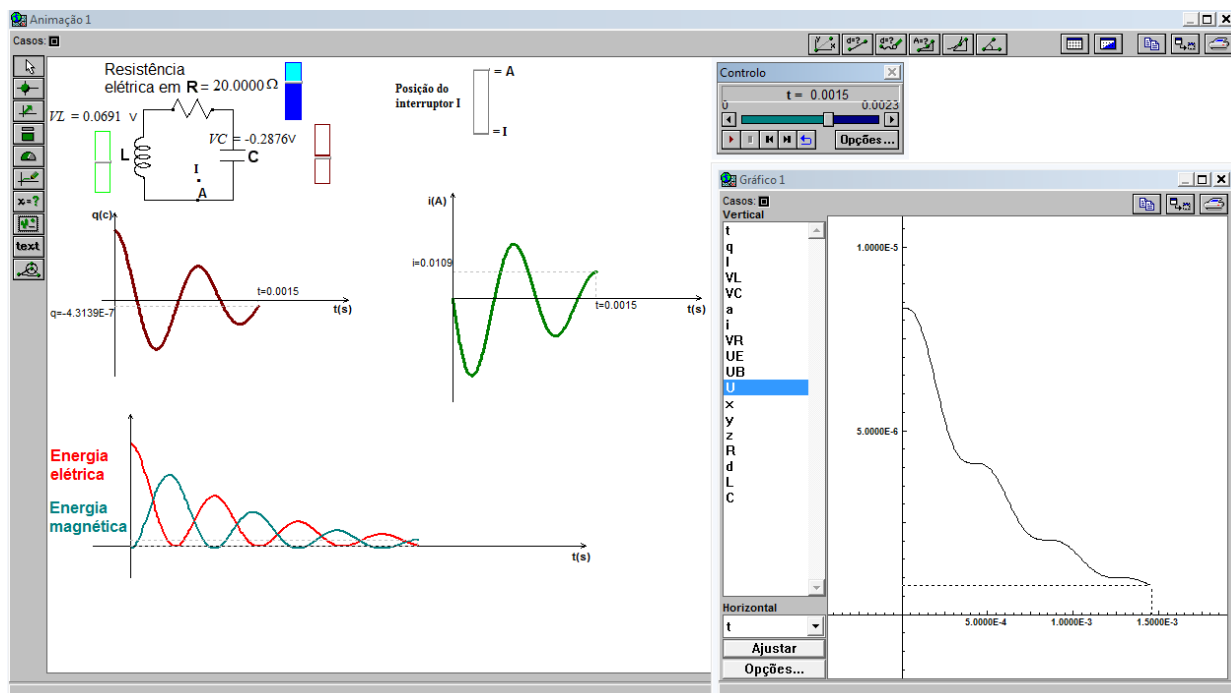


Figura 44: Janela Animação 1 de uma simulação computacional sobre circuitos LC e RLC.

AI das aulas 21 e 22

Após a interação com a simulação propusemos como desafio para os alunos a obtenção experimental da curva que descreve o comportamento da energia eletromagnética em função do tempo para no mínimo duas oscilações completas e compararem com o apresentado no modelo computacional (Janela Gráfico 1 mostrada na Figura 44).

Aula 23, 24 e 25 (AI) – Corrente alternada

Nessas últimas três aulas desse estudo implementamos atividades integradas sobre circuitos de CA. Na aula 23 usamos as mesmas atividades implementadas na Aula 2 do estudo anterior, em que exploramos circuitos puramente capacitivos e

indutivos (figuras 27 a 29). Nas aulas 24 e 25, os alunos interagiram com a atividade sobre circuitos RLC de CA implementada no segundo e terceiro estudo (Figura 22), com o diferencial que nesta oportunidade dedicamos mais uma aula, visando propiciar mais tempo para os alunos se habituarem com a notação de fasores para proporcionar melhores condições para um entendimento qualitativo sobre os conceitos envolvidos em circuitos de CA.

8.3 RESULTADOS

Os seis alunos envolvidos nesse estudo foram caracterizados na Tabela 15 a partir da idade, se trabalha ou não, escola que frequentou durante o ensino médio e de dados sobre o seu desempenho acadêmico.

Tabela 15 – Caracterização de todos os alunos da turma de Física Geral em estudo.

Dados	Aluno 1	Aluno 2*	Aluno 3	Aluno 4	Aluno 5	Aluno 6
Idade	20 anos	26 anos	29 anos	34 anos	26 anos	20 anos
Trabalha	Iniciação científica	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Ensino Médio e/ou Técnico/rede pública ou privada	Médio/privado	Médio/público	Médio/privado Técnico/público	Médio/público	Médio/público	Médio/público
Reprovação em alguma disciplina da Física	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Cursa outra graduação	Não	Não	Não	Não	Sim	Não
* Este aluno é do curso diurno de Bacharelado em Física.						

Para avaliar a visão epistemológica dos alunos na primeira aula foi aplicado um teste sobre a natureza da Ciência, com 10 questões de escolha múltipla (Anexo D) e 2

dissertativas, constantes no Apêndice E. Ao final da disciplina as questões de escolha múltipla foram reaplicadas como pós-teste. O teste foi validado com uma população de 67 alunos do curso de Física, resultando em um coeficiente alfa de Cronbach de 0,72. Cada item do teste contém uma afirmativa coerente ou incoerente com uma visão contemporânea de ciências. Às afirmativas coerentes (2, 5, 6, 9 e 10), atribuímos a pontuação 5, 4, 3, 2 e 1 às alternativas concordo fortemente (CF), concordo (C), indeciso (I), discordo (D) e discordo fortemente (DF), respectivamente. As demais afirmativas (1, 3, 4, 7, 8) foram pontuadas de modo inverso, ou seja, 1, 2, 3, 4 e 5. Salientamos que aplicamos esse teste com o objetivo de ter uma visão inicial sobre as concepções dos alunos e para triangular com nossas inferências oriundas dos dados qualitativos, não para fazer qualquer inferência estatística. A evolução dos alunos do pré para o pós-teste pode ser visualizada nas Figuras 45 e 46.

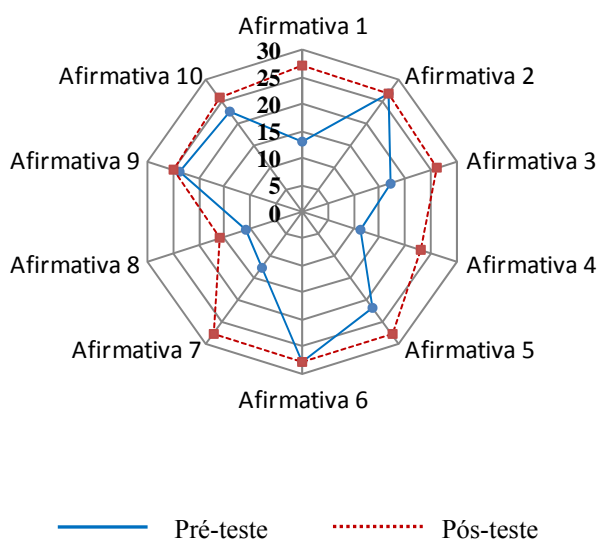


Figura 45 – Resultados do pré e pós-teste mostrando a evolução dos escores totais dos 6 alunos em cada afirmativa (escore máximo = 30).

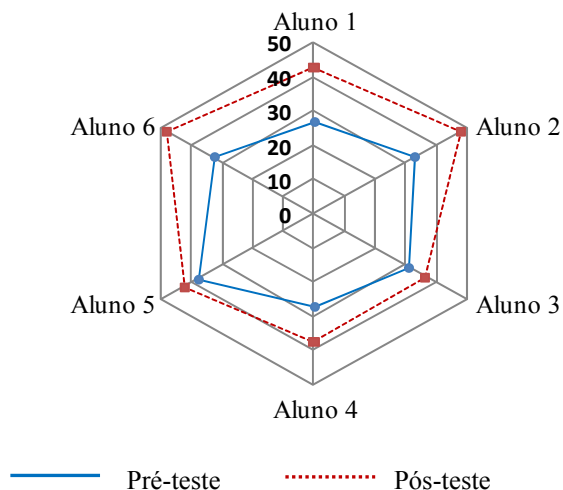


Figura 46 – Resultados do pré e pós-teste mostrando a evolução dos escores de cada aluno nos 10 itens do teste (escore máximo = 50).

Observa-se no gráfico da Figura 45 escores baixos no pré-teste na afirmativa 1, que está relacionada ao contexto de validade das teorias científicas, e nas afirmativas 4 e 8, relacionadas à visão empirista-indutivista da Ciência. No pós-teste apenas a afirmativa 8 permaneceu com escore baixo, passando de 11 para 16 pontos. Observa-se na Figura 46, que dos alunos que obtiveram um escore baixo no pré-teste, apenas os alunos 3 e 4 não atingiram um escore próximo do máximo no pós-teste. Para triangular com esses dados levamos em conta as diversas fontes de dados qualitativos (Tabela 14), e como ilustração apresentamos as tabela 15 a 26 com resultados para cada um dos alunos sobre os atributos visão epistemológica e aprendizagem significativa. Conforme a Figura 30, para avaliar a visão epistemológica foram feitas medidas sobre concepção de modelos teóricos, visão do papel do laboratório didático e do computador. Para isso utilizamos dados das entrevistas semi-estruturadas (Apêndice H), realizadas na aula 16 (quando já tínhamos 60% do estudo concluído) e de questões dissertativas respondidas ao final da disciplina (Apêndice J). Em relação à aprendizagem significativa realizamos medidas da motivação, significância do

material para o aluno e desempenho conceitual. Nessa avaliação consideramos que o material é composto pelos modelos computacionais, pelos experimentos montados, pelos guias de atividades e trechos do livro texto (Halliday, Resnick e Walker, 2003). Para as medidas de motivação e significância do material transcrevemos na quarta coluna das tabelas 15-20 trechos da entrevista semi-estruturada e das gravações realizadas enquanto os alunos desenvolviam as atividades. Em relação ao desempenho conceitual nos restringimos aos conceitos de força eletromotriz (fem) induzida, resistência elétrica em circuitos simples, potência de saída de uma fonte e frequência de ressonância em circuitos CA²⁵ e analisamos separadamente nas tabelas 21-26. A última coluna das tabelas 15 a 20 contém um comentário interpretativo a respeito do aluno ao qual a tabela se refere em relação à medida considerada, ancorado em todos os dados coletados ao longo do estudo, não somente nos dados apresentados na própria tabela, Também o nível em que classificamos o aluno na escala considerada para cada medida (terceira coluna) leva em conta todos os dados coletados.

Construímos as tabelas 15 a 26 com o objetivo de mostrar alguns dos elementos e regularidades que consideramos na análise da corroboração ou não das proposições norteadoras que embasaram o desenvolvimento e a coleta de dados. A título de esclarecimento, salientamos que a análise que segue está ancorada em todos os dados que coletamos ao longo do estudo (Tabela 4) e não apenas no fragmento utilizado para ilustrar a argumentação/opinião dos alunos em cada tópico.

²⁵ Não avaliamos outros conceitos relevantes como os conceitos de campo elétrico e magnético, força elétrica e magnética e energia eletromagnética, porque esses foram trabalhados com mais ênfase nas aulas teóricas, que não fizeram parte de nosso procedimento didático.

Tabela 15 – Resultados e classificação do Aluno 1.

Aluno 1		Nível	Depoimento	Comentário interpretativo
Visão epistemológica	Concepção de modelos teóricos	Concepção adequada	<i>“Eu acho que é ótimo essa diferenciação entre um sistema real e um sistema ideal, porque estamos acostumados com uma situação ideal Pensei assim já várias vezes até que ponto a gente pode dizer que a situação é ideal, não só nos circuitos. No laboratório a gente faz limpeza dos substratos, mas logo depois da limpeza ele já está exposto, aí já tem a contaminação e tal. Até que ponto esse erro não interfere?”</i>	Ao fazer a discriminação entre sistemas reais e ideais esse aluno além de se mostrar motivado foi capaz de estabelecer um vínculo entre os modelos teóricos e os sistemas reais.
	Papel do laboratório	Visão parcial	<i>“Fazer e visualizar experimentalmente o que é visto na teoria. Mostrar principalmente o que é real e o que é o ideal na hora da experimentação”.</i>	Apesar de ele ter praticamente restringido o laboratório em um recurso instrucional que serve para ilustrar as teorias apresentadas nas aulas expositivas, em outros momentos apresentou indícios que superam essa concepção. Por exemplo, destacou de forma positiva que nas aulas experimentais teve muita interpretação física diferentemente dos laboratórios anteriores onde se priorizava procedimentos fortemente dirigidos.
	Papel do computador	Visão adequada	<i>“Ajudar na visualização de experimentos, dando muitas vezes ideias de como se dá alguns funcionamentos físicos que na verdade não são vistos, são abstratos”.</i>	Ele destacou a reificação de conceitos abstratos e a diferenciação entre sistemas ideais e reais como os principais pontos positivos das AC.
Aprendizagem significativa	Motivação	Fortemente motivado	<i>“Eu acho ótimo isso. Na Física 2 e Física 1 no laboratório o professor dava a “receitinha” ali e tal, estava tudo explicado. Era só fazer aquilo lá, não tinha muita idéia física. Era muita conta, mas não era muita interpretação que nem agora. Não tinha tanta interpretação física como agora.”</i>	Ao longo do semestre observamos seu entusiasmo nas discussões com seu colega de grupo, sempre interagindo de forma consciente e motivado pelo aprendizado dos conceitos físicos.
	Significância do material para este aluno	Fortemente significativo	<i>“A gente fez no computador, claro que ajudou com certeza. É que primeiro era para dar ideias se a gente achava que dava e depois a gente ia para a simulação para ver se era isso mesmo. E depois para o experimento. Até nesse sentido o computador, nessa aula, ajudou muito mais que o experimento, eu acho.”</i>	Nesse trecho o aluno se refere à aula em que trabalhou com circuito integrador e diferenciador. Ele e seu colega de grupo (Aluno2) não foram capazes de perceberem o significado físico das curvas mostradas no osciloscópio. Essa era a segunda vez que utilizavam o osciloscópio e observamos que estavam inibidos e inseguros com seu manuseio. Mas isso não passou de uma dificuldade inicial. Por exemplo, na última aula sobre corrente alternada esse aluno foi capaz de acompanhar os procedimentos e raciocínios presentes no guia para encontrar, com o uso do osciloscópio, a frequência de ressonância de um circuito RLC em série excitado por uma fonte de corrente alternada.

Tabela 16 – Resultados e classificação do Aluno 2.

Aluno 2		Nível	Depoimento	Comentário interpretativo
Visão epistemológica	Concepção de modelos teóricos	Concepção parcial	<p><i>“Elucidar o comportamento de sistemas idealizados.”</i></p> <p><i>“Eu gostei bastante porque tu pega um sistema idealizado no computador ali tudo dá certo daí depois tu bota uma prática ali e vê se acontece aquilo mesmo se é válido aquilo ali.”</i></p>	Ele demonstrou ter refletido sobre os contextos de validade dos modelos teóricos envolvidos nas atividades propostas ao longo do semestre, mas não explicitou e nem deu exemplos durante a entrevista.
	Papel do laboratório	Visão adequada	<p><i>“A teoria que tu vê no livro é baseada em idealizações tu vai para o laboratório e começa a fazer os experimentos, coletar dados, e percebe o que está fechando com aquela fórmula com aquela teoria e tal.”</i></p>	Apresentou indícios de que o ensino de laboratório não é só experimentação e sim teoria mais experiência. Também destacou que as AE devem privilegiar a reflexão e a criatividade.
	Papel do computador	Visão adequada	<p><i>“O computador dá uma base para compreender o que está acontecendo na parte real do experimento. Tu vê no computador. Ai vai olhar no livro por que está acontecendo assim? Ai já se tem uma base sobre o que está acontecendo para montar na prática o experimento.”</i></p>	Destacou que o computador pode propiciar uma visão mais geral dos sistemas físicos e pode constituir-se em uma preparação para o desenvolvimento de AE.
Aprendizagem significativa	Motivação	Fortemente motivado	<p><i>“Eu não cheguei a terminar as aulas de laboratório no semestre passado, mas esse laboratório eu achei bem mais interessante. A interação com o grupo também foi bem mais interessante. O computador ali também.”</i></p>	Essa manifestação tanto pode ser devida a uma efetiva evolução de nossa proposta didática do estudo anterior para o presente, quanto devida ao fato que da primeira vez, participando de uma única aula, não lhe foi suficiente para captar o espírito da proposta.
	Significância do material para este aluno	Fortemente significativo	<p><i>“Ah, eu acho importante cara, eu acho que algumas idealizações que tem nos problemas, ali pelo computador tu pode ver bem direitinho tu não precisa fazer um experimento todo montar um experimento todo para resolver um problema ou para ter uma opinião sobre um problema... . Eu gostei bastante, esse último laboratório eu gostei mais por que não tinha tantos dados, era um negócio mais intuitivo chegava rápido ao objetivo do laboratório.”</i></p>	Sua característica marcante foi a atitude de buscar entender os procedimentos necessários para preencher os guias. Sua opinião sobre as AC e AE evidenciam que ele foi capaz de perceber os objetivos das atividades propostas, o que propiciou uma forte interação com os recursos instrucionais e a apresentação de respostas nos guias com justificativas Física, em praticamente todas as aulas.

Tabela 17 – Resultados e classificação do Aluno 3.

Aluno 3		Nível	Depoimento	Comentário interpretativo
Visão epistemológica	Concepção de modelos teóricos	Concepção adequada	<i>“Serve como base para inícios de experiências para saber como vai iniciar a prática. Mas muitas vezes a teoria é bem diferente da prática, pois na teoria existe muitas vezes uma aproximação para que os valores fiquem “elegantes”. O modelo teórico despreza alguns dados”.</i>	Esse aluno, também, apresentou argumentos que sugerem que ele percebeu que os modelos teóricos possuem idealizações e assim um contexto de validade. Nas questões dissertativas ele respondeu que o progresso do conhecimento científico se dá através de estudos teóricos e práticos, hipóteses e modelos.
	Papel do laboratório	Visão adequada	<i>“Poder comparar os resultados teóricos com os práticos. Muitas vezes para se chegar numa teoria e em outros casos para verificar a teoria.”</i>	Destacou as potencialidades do laboratório em estabelecer um vínculo entre teoria e realidade e de propiciar a exploração do contexto de validade de modelos teóricos.
	Papel do computador	Visão adequada	<i>“Dava para você visualizar bem ali no computador, você variava o que tinha que variar e percebia o que acontecia”.</i>	Em relação ao computador ele considerou que é uma ferramenta que auxilia na visualização. No entanto, também destacou que em algumas atividades o computador foi desnecessário. Segundo ele nas aulas sobre circuitos RL o uso do osciloscópio foi suficiente para atingir os objetivos das experiências.
Aprendizagem significativa	Motivação	Fortemente motivado	<i>“O laboratório talvez até desmotive algumas pessoas porque às vezes vamos para o laboratório sem conhecer o assunto, então a experiência fica um negócio mecanizado, sem entender o que está acontecendo, preocupado só em coletar dados para fazer o relatório”</i>	Na entrevista, ele destacou o vínculo entre teoria e experimento como um elemento que o motivou para o desenvolvimento das atividades práticas.
	Significância do material para este aluno	Significativo	<i>“No princípio eu estava anotando o ângulo porque cada vez que eu variava a corrente o ângulo variava. Eu não sabia a relação até o momento, depois que você falou sobre as duas componentes aí é que eu me liguei no significado do ângulo”.</i>	Em quase todas as aulas esse aluno demonstrou ter interagido de maneira significativa com os recursos instrucionais. No entanto, em algumas aulas, mesmo já tendo visto a parte teórica, ele começou a interagir com os experimentos mecanicamente, sem, inicialmente, refletir sobre os procedimentos e pressupostos teóricos envolvidos nas atividades.

Tabela 18 – Resultados e classificação do Aluno 4.

Aluno 4		Nível	Depoimento	Comentário interpretativo
Visão epistemológica	Concepção de modelos teóricos	Concepção adequada	<i>“Modelos teóricos possuem o papel de apresentar uma explicação plausível de alguma investigação científica. No entanto, um modelo teórico pode ser alterado; principalmente quando este modelo ainda não está bem aceito no meio científico”.</i>	Apresentou argumentos de ter captado que modelos teóricos são construtos físicos desenvolvidos com o objetivo de representarem parcialmente sistemas reais.
	Papel do laboratório	Visão Empirista-indutivista	<i>“O papel da experimentação é validar a teoria, levando em conta uma situação real; não idealizada.”</i>	Resumiu o papel do laboratório em um recurso de validação de teorias. Isso possivelmente pode ser atribuído à forma como ele desenvolveu as atividades experimentais, pois em vez de refletir sobre os procedimentos teóricos e experimentais a serem realizados, frequentemente, trabalhou de forma mecânica.
	Papel do computador	Visão adequada	<i>“Com o computador pode-se analisar situações idealizadas e basicamente não idealizadas. Com ele é possível uma visão mais apurada do que está se estudando, pois é possível analisar fenômenos concomitantemente com análises gráficas (instantaneamente) e variações nas situações cujo estudo está dirigido. Ou seja seu papel facilita muito o aprendizado”.</i>	Os fatores transcritos ao lado possivelmente devem ter influenciado para esse aluno utilizar mais o computador do que o material experimental ao longo do semestre. Cabe destacar que ele não explicitou que o laboratório deve ser substituído pelo computador.
Aprendizagem significativa	Motivação	Fortemente Motivado	<i>“Sempre tem uns que sabem mais e uns que sabem menos. Eu fazendo em dupla, um auxiliando o outro, eu acho interessante. Muitas coisas tenho certeza que se eu fosse fazer sozinho, se não tivesse uma “canja”, eu ia trancar”.</i>	Esse aluno iniciou o semestre bastante desmotivado, faltou em algumas aulas iniciais e nas que esteve presente, frequentemente, trabalhou de forma mecânica. Ao longo do semestre, com o trabalho em grupo e com as nossas tentativas de criar melhores condições para aprendizagem significativa, se mostrou bastante motivado.
	Significância do material para este aluno	Sem significado	<i>“Teve dois laboratórios que eu fiquei meio perdido, aquele que a gente teve que mexer no osciloscópio, aí tinha que calcular lá. Eu não consegui mexer direito naquilo. Mas acho bem interessante, apesar de não ter muita familiaridade”.</i>	Na entrevista ele salientou sua deficiência em conceitos básicos de Física e que enfrentou, também, dificuldades ao trabalhar com as atividades práticas. Em várias aulas observamos que ele buscou preencher os guias apenas fazendo aplicação direta de fórmulas, ou seja, de forma mecânica.

Tabela 19 – Resultados e classificação do Aluno 5.

Aluno 5		Nível	Depoimento	Comentário interpretativo
Visão epistemológica	Concepção de modelos teóricos	Concepção inadequada	<i>“O produto acabado da elaboração intelectual que consiste em observação, hipótese, experimento e teoria. Este modelo, quando testado por diversos pesquisadores independentes e aceito por grande parte do meio científico tornam-se “leis”, ou seja, a aplicação vigente para um fenômeno em uma determinada época”.</i>	No depoimento transcrito ao lado esse aluno apresentou indícios de uma visão empirista, mas explicitou o caráter provisório dos modelos científicos. Tanto no teste inicial quanto no final, sobre a natureza da ciência (Anexo D), ele novamente apresentou uma visão empirista concordando com as afirmativas 4 e 8. Essa visão inadequada pode estar impregnada de ideias sobre o conhecimento científico do curso que ele fazia paralelamente (Medicina).
	Papel do laboratório	Visão adequada	<i>“O ideal é o aluno escolher o que fazer para desenvolver a cognição e a capacidade de resolver problemas práticos de laboratório, pois sempre dá um erro e tem que achar uma solução”.</i>	Classificou como uma atividade de laboratório ideal a atividade em que escondemos dentro de uma caixa as ligações de um circuito elétrico e os alunos tiveram que inferir qual tipo de associação tinha na caixa.
	Papel do computador	Visão adequada	<i>“A idealização dos fios e dos resistores não estava diferenciando praticamente nada da teoria com os valores apurados na prática e só foi possível ver isso com uso do computador para corrigir o nosso erro – era um erro de cálculo.”</i>	Esse aluno em várias atividades interagiu com as simulações para verificar o quanto as idealizações adotadas nos modelos teóricos, que orientam as medidas experimentais, influenciam nos dados experimentais.
Aprendizagem significativa	Motivação	Fortemente motivado	<i>“A presença de um projeto de pesquisa de ensino, acaba aprimorando a qualidade das aulas porque nunca vai ser deixado de lado a parte didática; Às vezes em outras disciplinas a parte didática é deixada de lado e o professor cumpre a tarefa de demonstrar teoremas pela matemática”.</i>	Já na primeira aula ele se mostrou motivado pela Física e não encontrou dificuldades para desenvolver as atividades propostas, apresentou um raciocínio rápido e coerente.
	Significância do material para este aluno	Fortemente significativo	<i>“Eu acho bastante interessantefazer a atividade prática e depois, via o modelo ideal, ver a diferença. Depois simular já colocando a resistência interna no modelo para ter três modelos: o real, o totalmente idealizado e o idealizado com nível de realidade que é a resistência interna da fonte, daí pode se observar o quanto da diferença entre o real e o idealizado se deve a resistência interna e quanto se deve a outros fatores.”</i>	Nas aulas, este aluno fazia perguntas que mostravam que estava acompanhando o que era proposto nos guias. Não se satisfazia com qualquer resposta. Em muitos casos, era necessário apresentar exemplos para convencê-lo sobre os significados dos conceitos e das relações entre grandezas físicas envolvidas nas atividades.

Tabela 20 – Resultados e classificação do Aluno 6.

Aluno 6		Nível	Depoimento	Comentário interpretativo
Visão epistemológica	Concepção de modelos teóricos	Concepção parcial	<i>“A força deve diminuir ao aumentarmos a distância, porém existe um erro na programação do Modells. Existia um termo a mais multiplicando a equação de B_3”.</i>	Esse aluno apresentou indícios de ter refletido sobre o domínio de validade dos modelos teóricos. Em uma atividade em que inserimos propositalmente um erro ele foi um dos primeiros alunos a perceber que tinha algo de errado no modelo teórico subjacente a implementação da simulação computacional.
	Papel do laboratório	Visão adequada	<i>“Eu aprendi muito, a gente montava o circuito e tinha o osciloscópio aquilo foi muito bom, mais que o computador... ..o osciloscópio ta ligado diretamente ao circuito. Entre a teoria e o experimento”.</i>	Observamos que esse aluno ao longo do semestre apresentou uma evolução em termos de manipulação com os materiais experimentais, propiciando uma maior reflexão sobre os procedimentos práticos e teóricos adotados para preencher os guias.
	Papel do computador	Visão adequada	<i>“O computador ajuda a entender como as coisas funcionam no experimento, a visualização”.</i>	Apesar disso, de forma semelhante ao Aluno 3, ele comentou, na entrevista, que em algumas atividades preferiu interagir somente com o osciloscópio, pois as curvas apresentadas foram suficientes para desenvolverem as atividades.
Aprendizagem significativa	Motivação	Fortemente motivado	<i>“O trabalho em grupo e a interação com os professores juntos formam uma coisa forte, não sei dizer qual seria o mais importante. Até comentamos quando estávamos indo embora que a gente anda pensando muito, esse trabalho é diferente, dinâmico faz a gente, pensar”.</i>	Durante as aulas se mostrou motivado para preencher os guias e ao interagir com os professores, frequentemente, suas dúvidas eram expostas aos professores a partir das reflexões em grupo, com o intuito de explicitar os procedimentos realizados e assim encontrar as respostas para suas dúvidas.
	Significância do material para este aluno	Fortemente significativo	<i>“A maior dificuldade que encontrei foi o uso do computador, pois sempre que eu colocava alguma coisa o computador mostrava outra, depois estudei mais porque deu tudo errado aí fiquei mais motivado. É bom a gente não ter visão errada. É bem esclarecedor”.</i>	Essa dificuldade apresentada inicialmente pelo aluno não evidência uma dificuldade de interação com o computador e sim divergências entre o que ele esperaria que o computador mostrasse e o que realmente era mostrado na simulação. Também, evidência a potencialidade dos guias propostos com base no método PIE propiciar uma reflexão dos alunos sobre suas próprias concepções.

De forma semelhante às tabelas anteriores, nas tabelas 21 a 26 analisamos a medida desempenho conceitual dos alunos referente ao atributo aprendizagem significativa. Na terceira coluna das tabelas utilizamos alguns trechos de respostas para ilustrar a argumentação dos alunos e na quarta apresentamos a nossa interpretação a respeito do aluno, ancorado em todos os dados coletados no estudo (e não apenas no depoimento da terceira coluna). Os dados apresentados sobre os conceitos de a) *resistência elétrica em circuitos simples* e b) *força eletromotriz induzida* foram extraídos de trechos de questões de provas (Apêndice K), enquanto que os referentes aos conceitos de c) *potência de saída de uma fonte* e d) *frequência de ressonância em CA* foram extraído dos guias preenchidos nas aulas, sendo apresentados por grupos.

Tabela 21 – Desempenho conceitual do aluno 1.

Nível	Conceito	Depoimento	Comentário interpretativo
Bom desempenho	a)	<i>“Quando fechamos a chave A-B, temos duas lâmpadas em paralelo. A resistência equivalente vale a metade da inicial. Logo, a corrente dobra de valor. Como a corrente se divide, cada lâmpada recebe a mesma quantidade de corrente, como no caso da chave A-B aberta, a potência, ou seja, o brilho da lâmpada L_1 não muda ($P=i^2R$).”</i>	Ao longo do semestre seu grupo preencheu completamente o guia proposto, apresentando respostas com argumentação física consistente que nos levam a supor que ele percebeu o significado dos conceitos físicos em discussão. Apesar de não ter levado em consideração a resistência interna da fonte (conceito a), foi capaz de relacionar de forma adequada os conceitos de corrente elétrica e resistência equivalente para uma associação de resistores em paralelo.
	b)	<i>[Lei de Faraday-Lenz] “Esta equação nos diz que um fluxo magnético variável produz um campo elétrico induzido, ou seja, temos uma fem gerada numa espira ou até mesmo no espaço. O sinal negativo no lado direito da equação nos diz que o campo induzido de opõem a variação do campo.”</i>	
	c)	Dado extraído do guia dos alunos 1 e 2 na aula 11: <i>“Podemos provar que existe um máximo em $R=r$. Derivando P em relação a variável independente R temos: $(R+r)=2R$), ou seja: o valor máximo da potência ocorre quando $R=r$”.</i>	
	d)	Dado extraído do guia dos Alunos 1, 2 e 6* nas aulas 24 e 25: <i>“Sobrepondo \mathcal{E}_m e V_R vemos que V_R esta atrasado em relação a \mathcal{E}_m, logo o circuito é mais capacitivo... . Ajustamos no osciloscópio a frequência para termos uma sobreposição exata e assim encontramos a frequência de ressonância.”</i>	
*Ao longo do semestre os alunos trabalharam em duplas (alunos 1 e 2, alunos 3 e 4 e alunos 5 e 6). Nas últimas aulas formaram dois trios (1, 2, 6 e 3, 4, 5).			

Tabela 22 – Desempenho conceitual do aluno 2.

Nível	Conceito	Depoimento	Comentário interpretativo
Bom desempenho	a)	“Quando fechamos a chave A-B, temos duas lâmpadas em paralelo. A resistência equivalente vale a metade da inicial. Logo, a corrente dobra de valor. Como a corrente se divide, cada lâmpada recebe a mesma quantidade de corrente, como no caso da chave A-B aberta, a potência, ou seja, o brilho da lâmpada L_1 não muda ($P=i^2R$).”	Esse aluno de forma semelhante ao Aluno 1, seu parceiro de dupla, apresentou ao longo do semestre vários indícios de ter atingido uma aprendizagem significativa. O trecho transcrito ao lado, sobre o conceito a), é um exemplo de que ele foi capaz de relacionar significativamente o comportamento das grandezas físicas presentes em circuitos simples. As transcrições sobre o conceito b) evidenciam que ele foi capaz de perceber o significado fenomenológico da Lei de Faraday-Lenz.
	b)	“A variação do fluxo magnético gera fem induzida. O campo induzido se opõe a variação do campo magnético externo. Variação da corrente elétrica gera fem induzida”. Dado complementar extraído do guia dos alunos 1 e 2 na aula 18: “A corrente induzida está no sentido horário agora. O campo induzido está se somando agora com o campo externo, pois o fluxo começa a diminuir e para compensar esta redução no fluxo, a corrente induzida gera um campo no mesmo sentido para se opor a essa variação”.	
	c)	Dados apresentados na tabela sobre o aluno 1.	
	d)		

Tabela 23 – Desempenho conceitual do aluno 3.

Nível	Conceito	Depoimento	Comentário interpretativo
Bom desempenho	a)	“Se considerarmos $R_L \gg r$, haverá uma pequena variação no brilho da L_1 (diminuindo sua intensidade) ao fechar a chave A-B.”	Ao longo do semestre ele apresentou diversos indícios de ter evoluído no sentido da aprendizagem significativa. Esse aluno apresentou na prova uma resposta correta, mas sem justificativa convincente para o conceito a). Mas sobre o conceito c) seu grupo demonstrou ter entendido qualitativamente a influência da resistência interna no circuito. Durante as aulas esse aluno sempre buscou resolver as tarefas de forma significativa, o que sugere que as respostas dos guias explicitam o seu entendimento sobre os conceitos em questão.
	b)	“A integral de linha do campo elétrico vezes o comprimento é igual a menos a variação do fluxo magnético com o tempo. Isto quer dizer que variando o fluxo magnético cria um campo elétrico induzido, que gera uma fem induzida”.	
	c)	Dado extraído do guia dos alunos 3 e 4 na aula 11: “A potência aumenta proporcionalmente com R até quando $R=r$, assim a potência é máxima neste caso. A potência dissipada em R e a dissipada na fonte são iguais. Desconsidera a potência dissipada na fonte quando $r \ll R$.”	
	d)	Dado extraído do guia dos alunos 3, 4 e 5 nas aulas 24 e 25: “para encontrar a frequência de ressonância montamos o circuito proposto, colocamos o osciloscópio no resistor e no gerador. Depois variamos o gerador (frequência) até chegarmos na frequência de ressonância. Até que as curvas de V_R e \mathcal{E} fiquem em fase.”	

Tabela 24 – Desempenho conceitual do aluno 4.

Nível	Conceito	Depoimento	Comentário interpretativo
Desempenho Insuficiente	a)	<i>“No momento em que a chave A-B fecha-se, o brilho de L_1 permanece o mesmo, tendo em vista que se formará um circuito em paralelo no qual a diferença de potencial é a mesma para L_1 e L_2.”</i>	Esse aluno, de forma semelhante ao Aluno 1, foi capaz apenas de apresentar uma justificativa coerente para uma associação em paralelo com fonte ideal. Nos demais dados apresentou um desempenho insatisfatório. Sobre a Lei de Faraday-Lenz ele considerou que qual quer campo magnético gera um campo elétrico em vez de argumentar que é a variação de um campo magnético que gera um campo elétrico. Não foi capaz de apresentar uma argumentação conceitual significativa para o conceito b). Diferentemente do seu colega de grupo (Aluno 3) em várias aulas não interagiu de forma significativa com os recursos instrucionais.
	b)	<i>[Lei de Faraday-Lenz] “Com esta equação pode-se calcular o campo elétrico provocado pelo campo magnético... . Esta Lei elucida o fenômeno sobre a fem induzida.”</i>	
	c)	Dados apresentados na tabela sobre o aluno 3.	
	d)		

Tabela 25 – Desempenho conceitual do aluno 5.

Nível	Conceito	Depoimento	Comentário interpretativo
Bom desempenho	a)	<i>Diminui, ao fechar A-B produz um circuito em paralelo com uma resistência elétrica menor que a original. Isto aumenta a energia dissipada pela resistência interna. Caso na bateria não houvesse resistência a associação de outra lâmpada diminuiria a resistência equivalente pela metade dobrando a corrente, que se dividiria entre as lâmpadas igualmente, mantendo a mesma corrente em L_1, que manteria seu mesmo brilho.”</i>	Ao longo do semestre esse aluno sempre buscou apresentar respostas com argumentação física, apresentando elementos que mostram que foi capaz de relacionar de forma significativa os conceitos físicos envolvidos nas atividades com suas ideias e conceitos prévios. Observa-se que esse aluno percebeu o significado do conceito de resistência elétrica e apresentou uma argumentação que sugere que captou o significado fenomenológico da Lei de Faraday-Lenz.
	b)	<i>“Esta lei afirma que quando o fluxo do campo magnético varia com o tempo, aparece um campo elétrico devido a essa variação. No caso de existir um condutor elétrico na região onde se gera o campo elétrico surge uma fem induzida. O sinal negativo da equação foi introduzido por Lenz e significa que o campo gerado opõe-se à variação do campo magnético que o está gerando”.</i>	
	c)	<i>Dado extraído do guia dos alunos 5 e 6 na aula 11: “Sabemos que quando a potência é máxima, a resistência interna r é igual a resistência externa R. Realizamos medidas de R e da corrente para obtermos um gráfico da potência versus R. O valor máximo da potência está relacionado com um valor de R que é igual a r e assim encontramos um valor para r dentro da margem de erro.”</i>	
	d)	Dado apresentado na tabela sobre o aluno 3.	

Tabela 26 – Desempenho conceitual do aluno 6.

Nível	Conceito	Depoimento	Comentário interpretativo
Bom desempenho	a)	<i>“Nesta situação o brilho de L1 diminui, pois a corrente que passava inteira em L1 agora se divide em duas para acender, também L2.”</i>	A resposta inicial evidência uma concepção alternativa de que uma bateria é uma fonte de corrente contínua. No entanto, o seu grupo foi capaz de explicar os procedimentos realizados para encontrarem experimentalmente a resistência interna de uma fonte. Nessa aula eles encontraram alguns dados experimentais que não estavam de acordo com o esperado. Então solicitamos que refizessem as medidas e realizassem em casa, individualmente, uma análise sobre a confiabilidade dos dados experimentais. A argumentação transcrita ao lado, evidência que ele trabalhou ativamente, não simplesmente acompanhou os raciocínios e procedimentos do seu colega. Nos demais dados ele demonstrou ter captado os significados dos conceitos presentes nas atividades e não apresentou mais concepções alternativas.
	b)	<i>[Lei de Faraday-Lenz] “Podemos interpretar fisicamente observando que ela indica que uma variação no fluxo do campo magnético gera um campo elétrico”.</i>	
	c)	Dado apresentado na tabela sobre o aluno 1. Dado complementar extraído de uma análise individual que ele realizou sobre dados experimentais encontrados na Aula xxx: <i>“insatisfeitos com o primeiro gráfico que plotamos (devido a erros grosseiros), fizemos nossas medidas e obtivemos resultados satisfatórios, pois a curva saiu como esperávamos e encontra-se dentro das barras de erros.”</i>	
	d)	Dado apresentado na tabela sobre o aluno 1.	

Sobre a *proposição 1*, que diz respeito à concepção de modelos teóricos e os papéis do laboratório e do computador:

- em relação à **concepção de modelos teóricos** constatamos que todos os alunos em algumas circunstâncias refletiram sobre os contextos de validade dos modelos teóricos envolvidos nas atividades propostas ao longo do semestre. Consideramos que os alunos 1, 3 e 4 apresentaram uma concepção adequada, pois explicitaram e deram exemplos, na entrevista, de que modelos teóricos possuem idealizações e buscam representar sistemas reais. Parece-nos que os alunos 2 e 6 perceberam as diferenças entre os sistemas ideais e reais, mas não explicitaram mais elementos. Então, supomos que eles atingiram uma concepção parcial acerca de

modelos teóricos, enquanto que o Aluno 5 apresentou uma concepção inadequada . Para ele: *“modelos teóricos são o produto acabado da elaboração intelectual que consiste em observação, hipótese, experimento e teoria”*;

- no que diz respeito ao **papel do laboratório didático** de Física todos os alunos, ao final do semestre, se mostraram insatisfeitos com atividades fortemente dirigidas e que tenham como principal objetivo o de “determinar a lei” física subjacente aos fenômenos investigados. Conforme relatamos nas análises individuais apenas o Aluno 4 não atingiu uma visão adequada ou parcial acerca do papel do laboratório; os demais alunos apresentaram argumentos que mostram que perceberam as atividades experimentais, propostas nesse estudo como um recurso capaz de propiciar vários dos fatores positivos apresentados na Tabela 1;

- quanto ao **papel do computador** todos os alunos destacaram que a visualização é a principal característica positiva e deram indícios de que as atividades computacionais auxiliaram: i) a terem uma visão geral do experimento, ii) a analisarem o domínio de validade dos modelos teóricos, iii) no entendimento fenomenológico das equações de Maxwell e iv) na reificação de conceitos abstratos. Com isso entendemos que todos tenham atingido uma visão adequada. Cabe salientar que nenhum aluno explicitou espontaneamente que prefere a substituição das atividades de laboratório pelas computacionais.

Ainda em relação à proposição 1, aprofundamos a análise dos dados quantitativos apresentados na Figura 45 destacando que o escore baixo na afirmativa 8 no pós-teste se deve ao fraco desempenho dos alunos 1, 3, 4 e 5. Destes, apenas o Aluno 5 apresentou nas questões dissertativas respondidas ao final do semestre (Apêndice J), claras evidências de ter persistido com uma visão empirista-indutivista, conforme descrito na primeira linha da Tabela 19. Conforme pode-se ver na Figura 46, os alunos 3 e 4 foram os que obtiveram menor escore no pós-teste e em nossas observações percebemos que trabalharam em muitas aulas de forma mecânica, o que pode ter dificultado que captassem um dos objetivos de nossa proposta didática, que é o de possibilitar uma visão de que a ciência contemporânea não é apenas experimentação, e sim teoria mais experiência. Porém, esses alunos não explicitaram nos dados qualitativos qualquer indício empirista-indutivista. O Aluno 1 também não apresentou uma visão empirista-indutivista nos demais dados e a afirmativa 8 foi a única em que ele se posicionou de forma equivocada, na nossa concepção. O desempenho dos alunos no pós-teste, comparado ao pré-teste, e suas manifestações na entrevista final, comparada às suas respostas às questões dissertativas respondidas na primeira aula, nos levam a considerar que a proposta didática adotada se mostrou capaz de auxiliar os alunos a terem uma visão mais adequada sobre a natureza da Ciência.

Quanto à proposição 2, que diz respeito à transformação das aulas de Física em um ambiente propício para a aprendizagem significativa, podemos dizer que:

- em relação à **motivação**: todos os alunos atingiram o nível máximo na escala de medida, inclusive o Aluno 3, que não apresentou, de forma espontânea na entrevista, argumentos positivos sobre nossa metodologia didática, mas durante o desenvolvimento das atividades interagiu fortemente com seus colegas. Em algumas aulas não somente ele interagiu com seu colega de grupo, mas, com dúvidas, procurou algum outro grupo para discutir suas dificuldades. Outro dado importante sobre a pré-disposição dos alunos em aprender é que, com frequência, eles continuavam de forma espontânea trabalhando nas atividades após o horário de término da aula;

- a respeito da **significância do material instrucional** para os alunos, observamos que os guias preenchidos em grupo, em sua ampla maioria, mostram respostas corretas e com boa argumentação física, no entanto, esses dados podem também ser atribuídos ao auxílio dos professores, pois como tínhamos poucos grupos (três) identificávamos sistematicamente erros dos alunos, durante as aulas, e auxiliávamo-los a corrigi-los. Por isso, também, buscamos outras fontes de dados (entrevista semi-estruturada e gravações enquanto os alunos trabalhavam) com o objetivo de avaliar os procedimentos e opinião dos alunos sobre o material. Os dados sugerem que apenas o Aluno 4 não foi capaz de relacionar, de maneira não-arbitrária e não-literal, o conteúdo presente nos materiais com suas ideias prévias, em várias aulas. Os demais alunos apresentaram depoimentos de que foram capazes de relacionar satisfatoriamente os procedimentos e raciocínios desenvolvidos durante as aulas com elementos de sua estrutura cognitiva;

- em relação ao **desempenho conceitual** dos alunos com base nos dados qualitativos encontramos indícios que nos levam a considerar que os alunos 1, 2, 3, 5 e 6 atingiram um desempenho bom. O Aluno 4 apresentou um rendimento insuficiente tanto para suprir nossas expectativas quanto para ser aprovado na disciplina. Esse aluno foi o que, em várias aulas, não foi capaz de perceber a significância do material instrucional e assim trabalhou de forma mecanizada. Isso sugere que apenas o Aluno 4 não evoluiu para uma aprendizagem significativa dos conceitos físicos envolvidos no ensino de Eletromagnetismo, pois nossas avaliações foram formuladas de maneira nova e não-familiar, requerendo máxima transformação do conhecimento adquirido, tal como propõe Ausubel, um dos nossos referenciais teóricos.

Em síntese, encontramos fortes indícios de que as proposições 1 e 2 foram corroboradas no presente estudo, pois as medidas de motivação, significância do material e papel do computador se situaram em um nível elevado; desempenho conceitual e papel do laboratório em um nível bom, exceto no caso de um aluno; e concepção de modelo teórico, também em um nível bom, exceto no caso de um outro aluno.

A seguir destacaremos alguns aspectos que julgamos relevantes sobre a forma de interação dos alunos com as atividades integradas, as AC e AE.

Atividades integradas

Analisando principalmente nossas notas de campo e as gravações de áudio pudemos observar que a interação dos alunos com os recursos computacionais, na maior parte das vezes, ocorreu de duas distintas maneiras: *i)* trabalharam de maneira integrada com o experimento e o computador ou *ii)* priorizaram interagir com os experimentos. Observamos que nas atividades em que os alunos interagiram significativamente com as AC e AE eles foram capazes de terem uma visão mais geral dos experimentos, sugerindo o entendimento do comportamento das grandezas físicas relevantes nas situações em estudo. Isso aconteceu principalmente nas atividades sobre fenômenos dinâmicos com várias grandezas físicas envolvidas, como por exemplo, nas aulas sobre circuitos de CA, sobre circuitos RLC subamortecidos e em atividades em que explorávamos a discriminação entre sistemas ideais e reais. Nessas atividades percebemos que as atividades do tipo AC e AE se complementaram. Na atividade sobre circuitos RLC subamortecido a simulação auxiliou os alunos a entenderem os pontos de inflexão da energia eletromagnética próximos aos instantes em que a corrente elétrica se anula (Dorneles, Veit e Moreira, 2008). Os alunos foram capazes de propor um procedimento para detectar tais pontos experimentalmente e usaram o computador para organizar e tratar os dados durante a realização das medidas experimentais.

Em relação às aulas sobre circuitos de CA os alunos deste estudo apresentaram respostas com argumentações conceituais mais significativas em comparação aos estudos anteriores. Por exemplo: o grupo formado pelos alunos 3, 4 e 5 apresentou a seguinte argumentação sobre o comportamento da diferença de potencial máxima no

capacitor quando um circuito de CA está em ressonância e a frequência de excitação do gerador é repentinamente diminuída; *“VC diminui em relação ao seu valor inicial, pois apesar de o circuito ficar mais capacitivo (período de oscilação maior) a intensidade de corrente elétrica cai mais significativamente devido ao aumento na diferença das reatâncias”*.

No entanto, em outras atividades com sistemas físicos dinâmicos mais simples como é o caso dos circuitos RC e RL o computador se mostrou dispensável para os alunos, especialmente, para os alunos 3 e 6 que explicitaram na entrevista que as curvas encontradas nos osciloscópios digitais foram suficientes e mais atraentes do que as mostradas nas simulações para atingir o entendimento do comportamento das grandezas físicas. Isso também sugere que os alunos ao longo do semestre adquiriram habilidades para utilizar os osciloscópios.

A respeito das atividades envolvendo circuitos simples destacamos a atividade sobre lâmpadas em associação mista, em que os alunos desenharam um diagrama do circuito, cujas conexões encontravam-se dentro de uma caixa fechada (Figura 35). Todos os alunos, durante a aula ou na própria entrevista, destacaram que esta foi uma das atividades que mais gostaram, ficaram bastante curiosos em desvendar o tipo de associação de cada lâmpada somente ligando e desligando as lâmpadas. Nessa aula observamos que os alunos não levaram mais de que quinze minutos para conseguirem desenhar um diagrama capaz de representar o circuito real e durante o tempo que interagiram com o circuito real percebemos que utilizaram os conceitos físicos

envolvidos em circuitos simples para fundamentarem suas hipóteses. A seguir apresentamos a argumentação de um grupo (alunos 1 e 2) sobre a configuração do circuito.

“Temos as lâmpadas L_1 e L_3 com menor luminosidade em relação a L_2 e L_4 . L_1 e L_3 estão em paralelo, temos a corrente se dividindo em i_1 e i_3 . L_2 e L_4 estão em série e a corrente é i_t . Tirando uma das lâmpadas em paralelo aumentamos a resistência equivalente e diminuí i_t , ou seja, diminuimos um pouco o brilho das lâmpadas em série e aumentamos da outra em paralelo, pois a diferença de potencial aumenta.”

Ainda em relação à atividade contendo a caixa salientamos que concebemos uma simulação (Figura 36) com objetivo de auxiliar os alunos a observarem a intensidade da corrente elétrica em cada lâmpada. Porém, os alunos ficaram motivados em manipular o circuito real para testarem suas hipóteses e deixaram de lado a simulação computacional. Consideramos que os alunos não se motivaram a usar o computador por se sentirem capaz de utilizarem os conceitos envolvidos em circuitos simples na atividade proposta. Podemos constatar ao longo das aulas integradas que quando os alunos não são capazes de propor e testarem hipóteses somente com a interação com os recursos experimentais eles buscam na interação com o computador um entendimento conceitual e uma visualização mais geral e imediata dos sistemas físicos em questão. E à medida que passam a ter um entendimento conceitual capaz de lhes propiciar uma interação consciente com os recursos experimentais os alunos passam a priorizar as atividades experimentais em comparação às computacionais.

Atividades computacionais

Nas aulas que utilizamos somente atividades computacionais envolvendo os conceitos de campo elétrico e força elétrica e as leis de Gauss, Ampère e Faraday-Lenz constatamos que as atividades auxiliaram de forma significativa o aprendizado dos alunos. Ao longo do semestre o principal benefício apontado pelos alunos sobre o uso do computador foi à visualização. Os alunos apresentaram indícios de que as simulações sobre as leis de Gauss, Ampère e Faraday-Lenz são capazes de propiciar melhores condições para o entendimento fenomenológico dessas leis, corroborando os resultados de Araujo, Veit e Moreira (2007).

No entanto, na entrevista, realizada na décima sexta aula, detectamos um obstáculo²⁶ a ser vencido quando se usam recursos computacionais: a crença inabalável dos alunos em que “o computador está certo”. “Nas palavras de alguns dos nossos alunos: *“No computador tudo dá certo. Daí depois tu fazes uma prática e vê se acontece aquilo mesmo. Se é válido aquilo ali.”* (Aluno 2); *“... acho que é a simulação, daí tu tens um resultado certo do que acontece”* (Aluno 1). Ainda que sistematicamente estimulássemos os alunos para que refletissem sobre os resultados gerados pelas simulações, isso raramente ocorria, e eles continuavam considerando os resultados das simulações inquestionáveis. Para diminuir a chance de que isso ocorresse, depois dessa entrevista, usamos como estratégia a introdução de um “erro” nas equações de um dos modelos computacionais, sem que os alunos fossem alertados para esse fato. Especificamente, na atividade sobre força magnética entre fios paralelos transportando corrente elétrica (Figura 40) o módulo da força magnética em um dos

²⁶ Esse obstáculo também é discutido por Medeiros e Medeiros (2002) e por Araujo (2005).

fos foi colocado proporcional ao quadrado da distância, em vez de ser inversamente proporcional. Inicialmente os alunos fizeram algumas previsões somente sobre o sentido das correntes elétricas, com base nos sentidos das forças magnéticas mostradas na simulação. Ao explorarem-na mais profundamente, todos os grupos acabaram percebendo que suas previsões estavam coerentes com o que observaram em relação ao sentido das forças. Em relação ao módulo, os alunos 1, 2 e 5 perceberam imediatamente que existia algo de estranho na simulação e partiram para análise na Janela Modelo do *Modellus*, encontrando e corrigindo o “erro”. Os alunos 3, 4 e 6 não foram capazes de perceber o problema antes que fossem alertados de que suas respostas não estavam de acordo com a teoria. Então, sentiram-se inseguros e recorreram ao livro para rever a parte teórica até que o Aluno 6 se deu conta do “erro” e junto com seus colegas corrigiram o modelo inserido no *Modellus*. O aspecto mais relevante a esse respeito é que a partir dessa aula, os alunos passaram a ser bem mais críticos, deixando de considerar que a priori a simulação estava certa e passando a analisá-la de modo mais criterioso.

Atividades experimentais

Nas quatro atividades experimentais implementadas usamos como guia os roteiros da disciplina, mas sempre apresentávamos uma introdução teórica e estimulávamos os alunos a pensarem e explicitarem suas ideias antes de começarem a interagir com os recursos experimentais. Nas três primeiras aulas os alunos priorizaram a coleta de dados sem se preocupar com o que ocorria fisicamente nos experimentos. Atribuímos isso, especialmente, ao mau hábito adquirido nas aulas de

laboratórios de disciplinas anteriores, em que dispunham de guias altamente dirigidos com os quais desenvolviam os trabalhos práticos de modo mecânico e com pouco engajamento intelectual. Foram necessárias algumas aulas iniciais para que eles captassem o espírito de nossa proposta e passassem a procurar ter uma compreensão geral do experimento, antes de saírem coletando dados. (Conforme relato dos alunos 2 e 3, esse foi o maior problema das primeiras aulas.)

Mesmo assim consideramos que essas aulas contribuíram para o aprendizado dos alunos, pois possibilitam-lhes a manipulação de materiais reais e sempre que possível instigávamos a refletirem sobre seus próprios procedimentos adotados no desenvolvimento das atividades, de modo a fazerem previsões antes de interagirem com os experimentos. Quando isto aconteceu percebemos que os se motivaram mais para entender o que ocorria fisicamente nos experimentos.

Ao longo do estudo constatamos que os alunos adquiriam habilidades para utilizar instrumentos de medidas. Por exemplo, em uma questão conceitual sobre instrumentos de medidas todos os alunos foram capazes de identificar que grandezas físicas estavam medindo dois multímetros conectados corretamente em um circuito simples (Figura 47). Vejamos dois exemplos:

“ M_1 mede a tensão a qual está submetido o dispositivo L e M_2 mede a corrente no circuito.

M_1 deve ter uma resistência muito elevada para que possa medir a diferença de potencial entre “a” e “b” na figura. Caso tentássemos medir a corrente que passa por L com M_1 não conseguiríamos, pois a corrente passaria toda por M_1 .

M_2 deve ter uma resistência muito baixa para não alterar a resistência total do circuito. Caso tentássemos medir a ddp

com M_2 estaríamos medindo a ddp entre pontos que, no caso de um fio ideal, tem o mesmo potencial.” (Aluno 2)

“Se colocarmos os instrumentos na ordem inversa ocorrerá um problema, pois M_2 possui uma resistência muito baixa e isto ocasionaria um curto circuito. M_1 resistência muito alta, então não seria possível medir a corrente elétrica.” (Aluno 3)

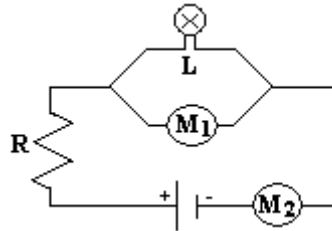


Figura 47 – Circuito elétrico simples.

8.4 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES

Com base nos estudos anteriores e utilizando as teorias de aprendizagem de Ausubel (2003) e de Vigotski (Vygotsky, 2003; Vigotski, 2001) e visão epistemológica de Bunge (1974) sobre modelos teóricos, fundamentamos nossa metodologia didática, que além de envolver os métodos de ensino colaborativo presencial e PIE estabelece uma dinâmica de integração entre atividades computacionais e experimentais. A integração constitui em dois momentos: em um primeiro, como preparação para a parte experimental, os alunos trabalham com computador; em um segundo momento, realizam um experimento real e exploram uma simulação sobre o experimento, para responderem questões conceituais presentes em guias impressos.

Avaliamos o desempenho dos alunos ao longo do estudo em relação a dois atributos: visão epistemológica e aprendizagem significativa. Os resultados sugerem

que a integração proposta pode proporcionar aos alunos uma visão epistemológica mais adequada sobre os papéis dos modelos teóricos, do laboratório e do computador, e promover a interatividade e o engajamento dos alunos em seu próprio aprendizado, transformando a sala de aula em um ambiente propício para uma aprendizagem significativa dos conceitos físicos de Eletromagnetismo em nível de Física Geral.

Encontramos pelo menos duas situações em que as atividades computacionais e experimentais se complementam, auxiliando os alunos a atingirem uma aprendizagem significativa de conceitos de Física e compreenderem algumas ideias sobre modelos científicos. Uma situação trata-se da contribuição que as AC propiciam aos alunos, em termos de aprendizagem conceitual, para interagirem de forma consciente com os experimentos e não por mera tentativa-e-erro, propiciando melhores condições para os alunos priorizarem uma análise física do que ocorre nos experimentos reais. Isto está de acordo com os estudos de: Jaakkola e Nurmi (2008), que argumentam ser mais fácil para os alunos descobrir os princípios teóricos com a simulação computacional e, em seguida, transferi-los para os circuitos reais e ver que as leis físicas presentes nas simulações também são aplicadas em outros ambientes; também corrobora resultados de Zacharia (2007) e Zacharia e Anderson (2003), que concluem que o uso de simulações integradas com experimento real propicia aos alunos maior habilidade para fazerem previsões e darem explicações cientificamente aceitas sobre os fenômenos físicos presentes nos experimentos; e de Ronen e Eliahu (2000), em que simulações computacionais são consideradas como uma ferramenta

capaz de estabelecer uma ponte entre modelos teóricos, representações formais e realidade.

Outra situação em que atividades experimentais e computacionais se complementam é na análise de sistemas reais e ideais quase que simultaneamente. Observamos que os alunos são capazes de perceberem mais facilmente o domínio de validade dos modelos teóricos em AI em comparação ao uso exclusivo de AC. Quando os alunos observam discrepâncias entre os valores experimentais e os esperados (teóricos) ao interagirem com sistemas reais, podem usar tanto um experimento quanto uma simulação para encontrarem situações em que o sistema idealizado presente na simulação é capaz de representar o sistema real com algum grau de precisão. Sem a utilização de AE, frequentemente, a discussão do domínio de validade dos modelos teóricos subjacentes à implementação das AC é muito vaga, não passando de uma frase do tipo: nessa atividade admite-se que: o atrito é desprezível, os fios elétricos e a fonte possuem resistência elétrica desprezível, etc.

Concluída a apresentação e discussão dos estudos realizados, no próximo capítulo passamos a apresentar as conclusões desta tese.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÃO

Ao longo da presente tese apresentamos resultados de uma série de estudos em que buscamos conceber, implementar e avaliar uma proposta didática sobre o ensino de Eletromagnetismo. Em todos os estudos levamos em conta as dificuldades de aprendizagem relatadas na literatura, buscando auxiliar os alunos a superá-las e propiciar melhores condições para uma aprendizagem significativa na acepção de Ausubel (Ausubel, 2003; Moreira, 2006). Também buscamos estabelecer uma dinâmica de sala de aula capaz de promover a interação social defendida por Vigotski (2003) como meio para a aprendizagem.

No primeiro estudo, desenvolvido no segundo semestre de 2004 na disciplina de Física II-C (Eletromagnetismo para alunos de Engenharia), oferecida pelo Departamento de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), tivemos como objetivo investigar o desempenho de alunos que desenvolveram atividades de simulação e modelagem computacionais com o *software Modellus* no estudo de circuitos elétricos simples e do tipo RLC, apresentadas como situações-problema. Tais situações consistem em uma particular situação física, sobre a qual são formuladas questões que visam instigar o aluno a pensar e interagir de modo crítico com os recursos computacionais e não meramente por tentativa-e-erro. Os resultados mostram que as atividades podem auxiliar os alunos a superarem as dificuldades de aprendizagem usualmente enfrentadas no estudo de circuitos elétricos (Dorneles, Veit

e Moreira, 2008 e 2009), estando de acordo com os estudos de Araujo, Veit e Moreira (2008), Ronen e Eliahu (2000) e Finkelstein et al. (2005), que sugerem que o uso de AC pode melhorar a compreensão conceitual e constituir-se em um elemento motivador para a aprendizagem. No entanto, ao longo desse estudo percebemos a necessidade de maior referência aos circuitos reais.

Em 2006 realizamos um segundo estudo na disciplina de Física Geral e Experimental III (Eletromagnetismo para alunos de licenciatura em Física), em que basicamente utilizamos as atividades concebidas no estudo anterior e disponibilizamos material experimental para os alunos montarem os circuitos representados nas simulações. Para desenvolverem as atividades propostas os alunos tinham a liberdade de utilizar somente o computador, o material experimental ou ambos. Os resultados sobre as AC foram semelhantes ao estudo anterior. Observou-se que o computador constitui-se em uma ferramenta capaz de auxiliar os alunos a desenvolver raciocínios sistêmicos ao analisarem um circuito elétrico, proporcionando uma melhor compreensão dos conceitos físicos envolvidos nesta área (Dorneles, Veit e Moreira, 2007). Porém, os resultados também mostraram que as AE propostas com roteiros fortemente dirigidos nas disciplinas de laboratório didático do Curso de Licenciatura em Física têm sido subutilizadas, pois vários alunos espontaneamente compararam de forma positiva as AE propostas por nós com as AE que vinham sendo trabalhadas ao longo das disciplinas de laboratórios. Adicionalmente, os alunos apresentaram mais dificuldades para desenvolver as atividades em comparação aos do primeiro estudo (turmas de Engenharia), possivelmente por tratar-se de um curso de licenciatura que

apresenta no exame de seleção para ingresso (vestibular) menos de dois candidatos por vaga e, também, por tratar-se de um curso noturno, de modo que a grande maioria dos alunos trabalha durante o dia. Outro fator é que as disciplinas de Física Geral e Experimental para licenciandos ao longo do tempo têm sido ministradas por dois professores (para as aulas teóricas e experimentais) que interagem pouco em relação à dinâmica das aulas e à distribuição dos conteúdos. O professor que ministra as aulas teóricas busca atender todo conteúdo do livro texto (Halliday, Resnick e Walker, 2003), enquanto o das experimentais utiliza uma série de roteiros de experimentos fortemente dirigidos, que priorizam a coleta e análise de dados, não favorecendo o estabelecimento de vínculos com os conceitos trabalhados nas aulas teóricas. Diante deste problema passamos a ter como meta a concepção de uma proposta didática que envolvesse o uso integrado de AC e AE a fim de auxiliar os alunos da licenciatura a superarem suas dificuldades.

Propusemos e implementamos em um terceiro estudo (Dorneles, Veit e Moreira, 2009), algumas formas de integração entre AC e AE baseados nos pressupostos teóricos de Ausubel e nos pontos positivos e negativos apresentados na literatura (tabelas 1 e 2). Trabalhamos com 32 alunos de quatro turmas (A, B, C e D) distintas que cursaram a disciplina de Física Geral e Experimental III (Eletromagnetismo para alunos de licenciatura ou bacharelado em Física), em 2008/2. O tópico abordado foi, novamente, o ensino-aprendizagem de circuitos elétricos, e as atividades práticas, em pequenos grupos, eram desenvolvidas em duas partes, uma contendo somente AC ou AE e a outra contendo uma atividade experimental integrada

com uma simulação (AI). Combinamos essas atividades formando quatro dinâmicas diferentes (AC-AI, AI-AC, AE-AI, AI-AE). Os resultados apontam que quando os alunos trabalharam inicialmente com o computador se mostraram mais capazes para integrar teoria e experimentos. Ao manipularem os experimentos reais os alunos trabalharam de forma consciente, demonstraram saber o que estava sendo proposto e o que estavam fazendo e não por tentativa-e-erro. Essas observações estão de acordo com os estudos de Zacharia e Anderson (2003) e Ronen e Eliahu (2000), que sugerem que o uso de AC constitui-se em uma preparação inicial para o ensino de laboratório. Também foram coletados indícios de que a integração proposta pode propiciar aos alunos um adequado vínculo entre teoria e realidade, e enriquecer a aprendizagem sobre o contexto de validade de modelos teóricos e a confiabilidade de dados experimentais.

No quarto e último estudo passamos a ter como meta, também, a possibilidade de propiciar aos alunos uma visão epistemológica sobre os papéis do laboratório didático de Física e de modelos teóricos na acepção de Bunge (Bunge, 1994). Utilizando esses referenciais teóricos fundamentamos uma proposta de integração entre atividades experimentais e computacionais e realizamos uma experiência didática que teve a duração de 25 aulas (totalizando 68 horas-aula). Os resultados mostram que a integração entre esses dois tipos de atividades pode proporcionar aos alunos uma visão epistemológica mais adequada sobre os papéis dos modelos teóricos, do laboratório e do computador, e promover a interatividade e o engajamento dos alunos em seu próprio aprendizado, transformando a sala de aula em um ambiente

propício para uma aprendizagem significativa dos conceitos físicos de Eletromagnetismo em nível de Física Geral.

A título de conclusão, destacamos que observamos uma evolução nas respostas dos alunos ao longo do quarto estudo, principalmente nas atividades em que usaram o computador e o material experimental simultaneamente, provavelmente porque os guias que os orientavam nessas atividades estavam repletos de questionamentos. Os alunos deixaram de dar respostas lacônicas, passando a justificar suas respostas com alguma argumentação conceitual, ainda que por vezes as empregassem de modo errôneo. Observamos, também, que não há necessidade de que o computador esteja presente em todas as atividades experimentais, mas uma metodologia didática como o método Predizer, Interagir e Explicar é indispensável para tornar os alunos mais críticos nas aulas de laboratório. Isso está de acordo com os resultados de Crouch et al. (2004), que sugerem que com o simples uso de atividades de demonstração os alunos aprendem pouco, mas quando solicitados a fazerem algumas previsões antes de ver a demonstração podem apresentar melhor compreensão dos conceitos físicos envolvidos. Se além das previsões lhe for propiciado a oportunidade de discussão, a compreensão é ainda maior. Outro aspecto importante que deve estar presente em todas as aulas de laboratório é a explicitação do vínculo entre teoria e experimento, para que o aluno se torne motivado e interaja de forma significativa com os experimentos. Em relação às atividades computacionais, depois que os alunos exploraram uma simulação em que propositadamente havíamos introduzindo um

“erro”, sem alertá-los, eles se tornaram mais críticos e reflexivos quanto aos modelos que regem as simulações, deixando de considerá-las inquestionavelmente certas.

Finalizamos esta tese apontando como perspectiva futura dessa pesquisa a implementação e avaliação de nossa proposta didática envolvendo outros conteúdos de Física – possivelmente sobre o ensino de Termodinâmica ou de Ondas – com melhorias no que diz respeito a incertezas experimentais e às noções de ordens de grandezas, com o propósito de facilitar a discriminação entre sistemas reais e ideais.

REFERÊNCIAS

ANDRÉS, M. M. Evaluación de un plan instruccional dirigido hacia la evaluación de las concepciones de los estudiantes acerca de circuitos eléctricos. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 8, n. 3, p. 231-237, agosto 1990.

ANDRÉS, M. M.; PESA, M. A.; MOREIRA, M. A. El trabajo de laboratorio en cursos de Física desde la teoría de campos conceptuales. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 12, n. 2, p. 129-142, 2006.

ARAUJO, I. S. *Simulação e Modelagem Computacionais como Recursos Auxiliares no Ensino de Física Geral*. 2005. 229 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ARAUJO, I. S. *Um Estudo sobre o Desempenho de Alunos de FísicaU Usuários da Ferramenta Computacional Modellus na Interpretação de Gráficos em Cinemática*. 2002. 111 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A.; MOREIRA, M. A. Physics students' performance using computational modelling activities to improve kinematics graphs interpretation. *Computers & Education*, Amsterdam, v. 50, n. 4, p. 1128-1140, May 2008.

_____. Simulações computacionais na aprendizagem da Lei de Gauss para a eletricidade e da Lei de Ampère em nível de Física Geral. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, Vigo, v. 6, n. 3, p. 601-629, 2007.

_____. Um estudo exploratório sobre o uso de simulações computacionais na aprendizagem da Lei de Gauss e da Lei de Ampère em nível de Física Geral. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, 2005. Número extra.

ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Interatividade em recursos computacionais aplicados ao ensino aprendizagem de Física. In: GONÇALVES, R. de A.; OLIVEIRA, J. S. de; RIVAS, M. A. C.. (Orgs.). *A Educação na Sociedade dos Meios Virtuais*. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano, 2009. p. 129-140.

_____. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos a tecnologias computacionais no ensino de física. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, Bauru, v. 4, n. 3, p. 5-18, set./dez. 2004.

ARNOLD, M.; MIDDLE, W.; MILLAR, R. Being constructive: an alternative approach to the teaching of introductory ideas in electricity. *International Journal of Science Education*, London, v. 9, n. 5, p. 553-563, Oct. 1987.

AUSUBEL, D. P. *Aquisição e Retenção de Conhecimentos: uma perspectiva cognitiva*. Lisboa: Plátano, 2003. 226 p.

AXT, R.; ALVES, V. M. O papel do voltímetro na aquisição do conceito de diferença de potencial. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 11, n. 1, p. 19-26, abr. 1994.

BARBOSA, J. O.; PAULO, S. R.; RINALDI, C. Investigação do papel da experimentação na construção de conceitos em eletricidade no ensino médio. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 105-122, abr. 1999.

BEICHNER, R. J. Testing student interpretation of kinematics graphs. *American Journal of Physics*, Woodbury, v. 62, n. 8, p. 750-762, Aug. 1994.

BELLONI, M.; CHRISTIAN, W. Electromagnetism and optics physlet-based curriculum. Chapter 9. Disponível em: <http://webphysics.davidson.edu/physletprob/ch9_problems/default.html>. Acesso em: 20 fev. 2010.

BENSEGHIR, A.; CLOSSET, J. L. The electrostatics-electrokinetics transition: historical and educational difficulties. *International Journal of Science Education*, London, v. 18, n. 2, p. 179-191, Apr. 1996.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 19, n. 3, p. 803-815, dez. 2002.

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. A modelagem científica de fenômenos físicos e o ensino de Física. *Física na Escola*, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 10-14, maio 2008.

BRANDÃO, R. V. *Investigando a Aprendizagem do Campo Conceitual Associado à Modelagem Científica por Parte de Professores de Física do Ensino Médio*. 2008. 204 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

BUNGE, M. *Teoria e Realidade*. São Paulo: Perspectiva. 1974. 243 p.

CAMPBELL, D. T.; STANLEY, J. C. *Delineamentos experimentais e quase experimentais de pesquisa*. São Paulo: EPU, 1979. 138 p.

CAMPBELL, D. T.; STANLEY, J. C. Experimental and quasi-experimental designs for research on teaching. In: N. L. Gage (Ed.). *Handbook of research in teaching*. Chicago: Rand McNally, 1963. Experimental and quasi-experimental designs for research on teaching, p.171-246.

CARRASCOSA, J.; PÉREZ, D. G.; VILCHES, A.; VALDÉS, P. Papel de la actividad experimental en la educación científica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 23, n. 2, p. 157-181, ago. 2006.

CARTER, G.; WESTBROOK, S. L.; THOMPSON, C. D. Examining science tools as mediators of students' learning about circuits. *Journal of Research in Science Teaching*, New York, v. 36, n. 1, p. 89-105, Jan.1999.

CASTRO, C. Un modelo significativo para la comprensión de los circuitos eléctricos simples. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 10, n. 3, p. 345-346, oct.1992.

CHAMBERS, S. K.; ANDRE T. Gender, prior knowledge, interest, and experience in electricity and conceptual change text manipulations in learning about direct current. *Journal of Research in Science Teaching*, New York, v. 34, n. 2, p. 107-123, Feb. 1997.

CHIU, M. H.; LIN, J. W. Promoting fourth graders' conceptual change of their understanding of electric current via multiple analogies. *Journal of Research in Science Teaching*, New York, v. 42, n. 4, p. 429-464, Apr. 2005.

CROUCH, C. H.; FAGEN, A. P.; CALLAN, J. P.; MAZUR, E. Classroom demonstrations: learning tools or entertainment? *American Journal of Physics*, Melville, v. 72, n. 6, p. 835-838, May 2004.

DORNELES, P. F. T.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. A integração entre atividades computacionais e experimentais: um estudo exploratório no ensino de circuitos cc e ca em física geral. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 6., 2007, Florianópolis. *Atas*. Florianópolis: ABRAPEC, 2007. 12 f.

_____. Simulação e modelagem computacionais no auxílio à aprendizagem significativa de conceitos básicos de eletricidade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 487-496, out./dez. 2006. pt. 1 Circuitos elétricos simples.

_____. Simulação e modelagem computacionais no auxílio à aprendizagem significativa de conceitos básicos de eletricidade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 3308-3316, jul./set. 2008. pt. 2 Circuitos RLC.

DORNELES, P. F. T. *Investigação de Ganhos na Aprendizagem de Conceitos Físicos Envolvidos em Circuitos Elétricos por Usuários da Ferramenta Computacional Modellus*. 2005. 142 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DORNELES, P. F. T.; VEIT, A. E.; ARAUJO, I. S. Atividades experimentais e computacionais como recursos instrucionais que se complementam: um estudo exploratório no ensino de eletromagnetismo em física geral. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, p. 1806-1810, 2009. Número extra.

DORNELES, P. F. T.; VEIT, E. A.; MOREIRA, M. A. Investigating the learning of RLC circuits with the aid of computer-based activities (apresentado no Girep 2008, accepted for publication in the Girep 2008 Conference Book).

_____. A study about the learning of students who worked with computational modeling and simulation in the study of simple electric circuits (aceito para publicação em 08/03/2009 na *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*).

DUIT, R.; RHONECK, C. V. Learning and understanding key concepts of electricity. In: TIBERGHIE, A.; JOSSEM, E. L.; BAROJOS, J. (Eds.). *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*. International Commission on Physics Education. Disponível em: <<http://www.physics.ohio-state.edu/~jossem/ICPE/C2.html>>. Acesso em: 20 fev. 2010.

DUPIN, J. J.; JOHNSON, S. Analogies and “Modeling Analogies” in teaching: some examples in basic electricity. *Science Education*, New York, v. 73, n. 2, p. 207-224, Apr. 1989.

_____. Conceptions of french pupils concerning electric circuits: structure and evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, New York, v. 24, n. 9, p. 791-806, Sept. 1987.

_____. Una analogía térmica para la enseñanza de la corriente continua en electricidad: descripción y evaluación. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 8, n. 2, p. 119-126, mayo 1990.

ENGELHARDT, P. V.; BEICHNER, R. J. Students’ understanding of direct current resistive circuits. *American Journal of Physics*, Melville, v. 72, n. 1, p. 98-115, Jan. 2004.

EYLLON, B.; GANIEL, U. Macro-micro relationships: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. *International Journal of Science Education*, London, v. 12, n. 2, p. 79-94, Dec. 1990.

FALESKI, M. C. Transient behavior of the driven RLC circuit. *American Journal of Physics*, Melville, v. 74, n. 5, p. 429-437, May 2006.

FINKELSTEIN, N. D.; ADAMS, W. K.; KELLER, C. J.; KOHL, P. B.; PERKINS, K. K.; PODOLEFSKY, N. S.; REID, S. When learning about the real world is better done virtually: a study of substituting computer simulations for laboratory equipment. *Physical Review Special Topics. Physics Education Research*, College Park, v.1, n.1, 010103 8p., July/Dec. 2005.

FINN, J. D. Analysis of variance and covariance. In: KEEVES, J. P. (Org.). *Educational Research, Methodology, and Measurement: an international handbook*. Cambridge: Pergamon, 1997.

GANGOLI, S. G.; GURUMURTHY, C. A study of the effectiveness of a guided open-ended approach to physics experiments. *International Journal of Science Education*, London, v. 17, n. 2, p. 233-241, Mar. 1990.

GASPAR, A. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. São Paulo: Editora Ática. 2005. 327 p.

GASPAR, A.; MONTEIRO, I. C. C. Atividades experimentais de demonstrações em sala de aula: uma análise segundo o referencial da teoria de Vygotsky. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 227-254, ago. 2004.

GIL-PÉREZ, D.; FURIÓ, M. C. P. V.; SALINAS, J.; MARTÍNEZ-TORREGROSA, J.; GUIASOLA, J.; GONZÁLEZ, E.; DUMAS-CARRÉ, A.; GOFFARD, M.; PESSOA, A. M. C. ¿Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio? *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 12, n. 2, p. 311-320, jun. 1999.

GOLDMAN, C.; LOPES, E.; ROBILOTTA M. R. Um pouco de luz na Lei de Gauss. *Revista de Ensino de Física*, São Paulo, v. 3, n. 3, p. 3-15, set. 1981.

GRAVINA, M. H.; BUCHWEITZ, B. Mudanças nas concepções alternativas de estudantes relacionadas com eletricidade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 110-119, jun. 1996.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Modelos mentales y aprendizaje de Física en electricidad y magnetismo. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 16, n. 2, p. 289-303, agosto 1998.

_____. Un estudio piloto sobre representaciones mentales, imagenes, proposiciones y modelos mentales respecto al concepto de campo electromagnético en alumnos de Física General, estudiantes de postgrado y fisicos profesionales. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 95-108, abr. 1996.

GUISASOLA, J.; ALMUNDÍ, J. M.; ZUBIMENDI J. L. Dificultades de aprendizaje de los estudiantes universitarios en la teoría del campo magnético y elección de los objetivos de enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 21, n. 1, p. 79-94, marzo 2003.

GURIDI, V. M.; ISLAS, S. M. Guías de laboratorio tradicionales y abiertas en Física Elemental: propuesta para diseñar guías abiertas y estudio comparativo entre el uso de este tipo de guías y guías tradicionales. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 203-220, set. 1998.

GUTWILL, J.; FREDERIKSEN, J.; RANNEY, M. Seeking the causal connection in electricity: shifting among mechanistic perspectives. *International Journal of Science Education*, London, v. 18, n. 2, p. 143-162, Apr. 1996.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. v. 3.

HENNESSY, S.; DEANEY, R.; RUTHVEN, K. Situated expertise in integrating use of multimedia simulation into secondary Science Teaching. *International Journal of Science Education*, London, v. 28, n. 7, p. 701-732, June 2006.

HALLOUN, I. Schematic modeling for meaningful learning of physics. *Journal of Research in Science Teaching*, New York, v. 33, n. 9, p.1019-1041, Nov. 1996.

HELLEN, H. E; LANCTOT, M. J. Nonlinear damping of the LC circuit using antiparallel diodes. *American Journal of Physics*, Melville, v. 75, n. 4, p. 326-330, Apr. 2007.

HODSON, D. Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 12, n. 3, p. 299-313, Nov. 1994.

IOP – Institute of physics. *Advancing Physics*. London: IOP. Disponível em: <<http://advancingphysics.iop.org>> Acesso em 21 de mar 2004.

JAAKKOLA, T.; NURMI, S. Fostering elementary school students' understanding of simple electricity by combining simulation and laboratory activities. *Journal of Computer Assisted Learning*, Oxford, v.24, n.4, p.271-283, Aug. 2008.

KRAPAS, S.; ALVES, F.; CARVALHO, L. R. Modelos mentais e a Lei de Gauss. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 7-21, maio 2000.

KRAPAS, S.; BORGES, A. M. Decaimento radioativo: uma analogia para o circuito RC. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 15, n. 1, p. 47-58, abr. 1998.

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

LEE, S. J. Exploring students' understanding concerning batteries: theories and practices. *International Journal of Science Education*, London, v. 29, n. 4, p. 497-516, Mar. 2007.

LIÉGEOIS, L.; CHASSEIGNE, G.; PAPIN, S.; MULLET, E. Improving high school students' understanding of potential difference in simple electric circuits. *International Journal of Science Education*, London, v. 25, n. 9, p. 1129-1145, Sept. 2003.

LIÉGEOIS, L.; MULLET, E. High school students' understanding of resistance in simple series electric circuits. *International Journal of Science Education*, London, v. 24, n. 6, p. 551-564, June 2002.

MAGNO, W. C.; ARAÚJO, A. E. P.; LUCENA, M. A.; MONTARROYOS, E.; CHESMAN, C. Probing a resonant circuit with a PC sound card. *American Journal of Physics*, Melville, v. 75, n. 2, p. 161-162, Feb. 2007.

MANOGUE, C. A.; BROWNE, K; DRAY, T.; EDWARDS, B. Why is Ampère's law so hard? A look at middle-division physics. *American Journal of Physics*, Melville, v. 74, n. 4, p. 344-350, Apr. 2006.

MARINELI, F.; PACCA, J. L. A. Uma interpretação para dificuldades enfrentadas pelos alunos em um laboratório didático de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 497-505, out./dez. 2006.

McDERMOTT, L. C.; SHAFFER, P. S. Research as a guide for curriculum development: an example from introductory electricity. I. Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, Woodbury, v. 60, n. 11, p. 994-1003, Nov.1992.

McDERMOTT L.C.; THE PHYSICS EDUCATION GROUP. *Physics by Inquiry*. New York: John Wiley, 1996.

MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. D. Possibilidades e limitações das simulações computacionais no ensino da física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 77-86, jun. 2002.

METIOUI, A.; BRASSARD, C.; LEVASSEUR, J.; LAVOIE, M. The persistence of students' unfounded beliefs about electrical circuits: the case of Ohm's law. *International Journal of Science Education*, London, v. 18, n. 3, p. 193-212, Mar. 1996.

MIERA, A. R. S.; ROSADO, L.; OLIVA, J. M. Investigación de las ideas de los alumnos de enseñanza secundaria sobre la corriente eléctrica. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 9, n. 2, p. 155-162, marzo 1991.

MILLAR, R.; BEH, K. L. Students' understanding of voltage in simple parallel electric circuits. *International Journal of Science Education*, London, v. 15, n. 4, p. 351-361, July 1993.

MILLAR, R.; KING, T. Students' understanding of voltage in simple series electric circuits. *International Journal of Science Education*, London, v. 15, n. 3, p. 339-349, May 1993.

MOREIRA, M. A. *Aprendizagem Significativa*. Brasília: Editora Universitária de Brasília, 1999a. 129 p.

_____. *Teorias de Aprendizagem*. São Paulo: E.P.U., 1999b. 195 p.

_____. *A Teoria da Aprendizagem Significativa e sua Implementação em Sala de Aula*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2006. 186 p.

MOREIRA, M. A.; DOMÍNGUEZ, M. E. Misconceptions in electricity among college students. *Ciência e Cultura*, São Paulo, v. 39, n. 10, p. 955–961, nov. 1987.

MOREIRA, M. A.; KREY, I. Dificuldades dos alunos na aprendizagem da lei de Gauss em nível de física geral à luz da teoria dos modelos mentais de Johnson-Laird. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 28, n. 3, p. 353-360, set. 2006.

MOREIRA, M. A.; PINTO, A. O. Dificuldades dos alunos na aprendizagem da lei de Ampère, à luz da teoria dos modelos mentais Johnson-Laird. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 317-325, set. 2003.

MOREIRA, M. A.; SILVEIRA, F. L. *Instrumentos de Pesquisa em Ensino e Aprendizagem: a entrevista clínica e a validação de testes de papel e lápis*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1993. 101 p.

NIETO, P.; CAMPO, M. J. M.; MARTINEZ, A. F. Circuitos eléctricos: una aplicación de un modelo de enseñanza-aprendizaje basado en las ideas previas de los alumnos. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 6, n. 3, p. 285-290, nov. 1988.

OLDE, C. V.; JONG, T. Student-generated assignments about electrical circuits in a computer simulation. *International Journal of Science Education*, London, v. 26, n. 7, p. 859-873, June 1990.

PAATZ, R.; RYDER, J.; SCHWEDES, H.; SCOTT, P. A case study analysing the process of analogy-based learning in a teaching unit about simple electric circuits. *International Journal of Science Education*, London, v. 26, n. 9, p. 1065-1081, July 2004.

PACCA, J. L. A.; FUKUI, A.; BUENO, M. C. F.; COSTA, R. H. P.; VALÉRIO, R. M.; MANCINI, S. Corrente elétrica e circuito elétrico: algumas concepções do senso comum. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 20, n. 2, p. 151-167, ago. 2003.

PARDHAN, H.; BANO, Y. Science teachers' alternate conceptions about direct-currents. *International Journal of Science Education*, London, v. 23, n. 3, p. 301-318, Mar. 2001.

PLANINIC, M.; BOONE, W. J.; KRSNIK, R.; BEILFUSS, M, L. Exploring alternative conceptions from Newtonian dynamics and simple DC circuits: links between item difficulty and item confidence. *Journal of Research in Science Teaching*, New York, v. 43, n. 2, p. 150-171, Feb.2006.

PSILLOS, D.; KOUMARAS, P.; TIBERGHIE, A. Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching on D. C. circuits. *International Journal of Science Education*, London, v. 10, n. 1, p. 29-43, Jan. 1988.

REDONDO, D. M.; LÍBERO, V. L. Conceitos básicos sobre capacitores e indutores. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 137-142, jun. 1996.

RONEN, M.; ELIAHU, E. Simulation - a bridge between theory and reality: the case of electric circuits. *Journal of Computer Assisted Learning*, Oxford, v. 16, n. 1, p. 14-26, Mar. 2000.

ROSS, R.; VENUGOPAL, P. On the problem of (dis)charging a capacitor through a lamp. *American Journal of Physics*, Melville, v. 74, n. 6, p. 469-559, June 2006.

ROYCHOUDHURY, A.; ROTH, W. M. Interactions in an open-inquiry physics laboratory. *International Journal of Science Education*, London, v. 18, n. 4, p. 423-445, June 1996.

SANCHEZ, M. T.; SÁNCHEZ, M. M. Circuitos eléctricos: problemas de aprendizaje. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 7, n. 1, p. 107-108, feb. 1989.

SARAIVA-NEVES, M.; CABALLERO, C.; MOREIRA, M. A. Repensando o papel do trabalho experimental, a aprendizagem da Física em sala de aula: um estudo exploratório. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 383-401, dez. 2006.

SAXENA, A. B. An attempt to remove misconceptions related to electricity. *International Journal of Science Education*, London, v. 14, n. 2, p. 157-162, Apr. 1992.

SENCAR, S.; ERYILMAZ, A. Factors mediating the effect of gender on ninth-grade Turkish students' misconceptions concerning electric circuits. *Journal of Research in Science Teaching*, New York, v. 41, n. 6, p. 603-616, Aug. 2004.

SÉRÉ, M. G.; COELHO, S. M.; NUNES, A. D. O papel da experimentação no Ensino de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 20, n. 1, p. 30-42, abr. 2003.

SÉRÉ, M. G. La enseñanza en el laboratorio. ¿Qué podemos aprender en términos de conocimiento práctico y de actitudes hacia la ciencia? *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 20, n. 3, p. 357-368, Nov. 2002.

SHAFFER, P. S.; McDERMOTT, L. C. Research as a guide for curriculum development: an example from introductory electricity. II. Design of instructional strategies. *American Journal of Physics*, Woodbury, v. 60, n. 11, p. 1003-1013, Nov. 1992.

SHEPARDSON, D. P.; MOJE, E. B. The nature of fourth graders' understandings of electric circuits. *Science Education*, New York, v. 78, n. 5, p. 489-514, Sept. 1994.

_____. The role of anomalous data in restructuring fourth graders' frameworks for understanding electric circuits. *International Journal of Science Education*, London, v. 21, n. 1, p. 77-94, Jan. 1999.

SHIPSTONE, D. M.; RHÖNECK, C.; JUNG, W.; KARRQVIST, C.; DUPIN, J. J.; JOHSUA, S.; LICHT, P. A study of student understanding of electricity in five european countries. *International Journal of Science Education*, London, v. 10, n. 3, p. 303-316, July 1988.

SILVEIRA, F. L.; MOREIRA, M. A.; AXT, R. Validação de um teste para verificar se o aluno possui concepções científicas sobre corrente elétrica em circuitos simples. *Ciência e Cultura*, São Paulo, v. 41, n. 11, p. 1129-1133, nov. 1989.

SINGH, C. Student understanding of symmetry and Gauss's law of electricity. *American Journal of Physics*, Melville, v. 74, n. 10, p. 923-936, Oct. 2006.

SOLANO, F.; GIL, J.; PÉREZ, A. L.; SUERO, M. I. Persistencia de preconcepciones sobre los circuitos eléctricos de corriente continua. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 460-470, jun. 2002.

STEINBERG, R. N. Computers in teaching science: to simulate or not to simulate? *American Journal of Physics*, Melville, v. 68, n. 7, p. S37-S41, July 2000. Supplement.

STOCKLMAYER, M. S.; TREAGUST, F. D. Images of electricity: how do novices and experts model electric current? *International Journal of Science Education*, London, v. 18, n. 2, p. 163-178, Apr. 1996.

TALIM, S. L.; OLIVEIRA, J. A conservação da corrente elétrica em circuitos simples: a demonstração de Ampère. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 18, n. 3, p. 376-380, dez. 2001.

TAO, P.-K.; GUNSTONE, R. F. The process of conceptual change in force and motion during computer-supported physics instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, New York, v. 36, n. 7, p. 859-882, Sept. 1999.

TEODORO, V. D. From formulae to conceptual experiments: interactive modelling in the Physical Sciences and in Mathematics. In. *International CoLos Conference New Network-Based Media in Education*. Maribor, Slovenia, 1998. p. 13-22. Disponível em:

<<http://modellus.fct.unl.pt/file.php?file=/1/papers/Paper%20VDT%20Slovenia%20September%201998.PDF>> Acesso em: 11 Mar. 2010.

_____. *Modellus Web Page*. <<http://modellus.fct.unl.pt/>>. Acesso em: 20 fev. 2010.

TEODORO, V. D.; VIEIRA, J. P.; CLÉRIGO, F. C. *Modellus, Interactive Modelling with Mathematica*. San Diego: Knowledge Revolution, 1997.

THACKER, B. A.; GANIEL, U.; BOYS, D. Macroscopic phenomena and microscopic processes: student understanding of transients in direct current electric circuits. *American Journal of Physics*, Melville, v. 67, n. 7, S1, p. S25-S31, July 1999.

TSAI, C. C. Using a conflict map as an instructional tool to change student alternative conceptions in simple series electric-circuits. *International Journal of Science Education*, London, v. 25, n. 3, p. 307-327, Mar. 2003.

TSAI, C H.; CHEN, H. Y.; CHOU, C. Y.; LAIN, K. D. Current as the key concept of Taiwanese students' understandings of electric circuits. *International Journal of Science Education*, London, v. 29, n. 4, p. 483-496, Mar. 2007.

VEIT, E. A.; TEODORO, V. D. Modelagem no ensino/aprendizagem de Física e os novos parâmetros curriculares nacionais para o ensino médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 87-96, jun. 2002.

VERGNAUD, G. A. La théorie des champs conceptuels. *Recherches em Didáctique des Mathématiques*, Roubaix, v. 10, n. 2, p. 133-170, 1990.

VIENNOT, L.; RAINSON, S. Student's reasoning about the superposition of electric fields. *International Journal of Science Education*, London, v. 14, n. 3, p. 475-487, Mar. 1992.

VIEIRA, J. S.; QUILLFELDT, J. A.; SELISTRE, L. F.; RIOS, L. H. R.; SCHMITZ, S. R.; STEFFANI, M. H. Conservação de corrente elétrica num circuito elementar: o que os alunos pensam a respeito. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 3, n. 1, p. 12-16, abr. 1986.

VIGOTSKI, L. S. *A Construção do Pensamento e da Linguagem*. São Paulo: Editora Martins Fontes. 2001. 496 p.

VYGOTSKY, L. S. *Pensamento e Linguagem*. São Paulo: Martins Fontes. 2003. 194 p.

WEBB, P. Primary science teachers' understandings of electric current. *International Journal of Science Education*, London, v. 14, n. 4, p. 423-429, May 1992.

YIN, R. K. *Estudo de Caso: planejamento e métodos*. Porto Alegre: Bookman. 2005. 212 p.

ZACHARIA, Z. C.; ANDERSON, R. The effects of an interactive computer-based simulation prior to performing a laboratory inquiry-based experiment on students' conceptual understanding of physics. *American Journal of Physics*, Melville, v. 71, n. 6, p. 519-640, June 2003.

ZACHARIA, Z. C. Comparing and combining real and virtual experimentation: an effort to enhance students' conceptual understanding of electric circuits. *Journal of Computer Assisted Learning*, Oxford, v. 23, n. 2, p. 83-169, Apr. 2007.

ZACHARIA, Z. C.; CONSTANTINOU, C. P. Comparing the influence of physical and virtual manipulatives in the context of the Physics by Inquiry curriculum: The case of undergraduate students' conceptual understanding of heat and temperature. *American Journal of Physics*, Melville, v. 76, n. 4/5, p. 425-430, Apr./May 2008.

ZACHARIA, C. Z.; OLYMPIOU, G.; PAPAERVIPIDOU, M. Effects of Experimenting with physical and virtual manipulatives on students' conceptual understanding in heat and temperature. *Journal of Research in Science Teaching*, New York, v. 45, n. 9, p. 1021-1035, Nov. 2008.

APÊNDICE A

Neste apêndice apresentamos os guias que os alunos receberam no segundo estudo para desenvolverem as atividades concebidas. Em nossos modelos¹ representando circuitos elétricos admitimos que os resistores são ôhmicos e os fios, os indutores e algumas fontes possuem resistência elétrica desprezível. Nas aulas 2 e 3 trabalhamos com fontes reais (com resistência interna).

AULA 1 – CIRCUITOS ELÉTRICOS SIMPLES

Lâmpadas em associação mista

Questões

Nas questões 1, 2 e 3 apresentadas neste guia admite-se que as lâmpadas são iguais e que o brilho das mesmas aumenta quando a intensidade da corrente elétrica é aumentada.

- 1) Classifique o brilho das lâmpadas (L_1 , L_2 , L_3 e L_4) presentes no circuito elétrico simples representado na Figura A.1 para as seguintes posições das chaves A - B e C - D :
 - i) B e D
 - ii) A e C
 - iii) A e D

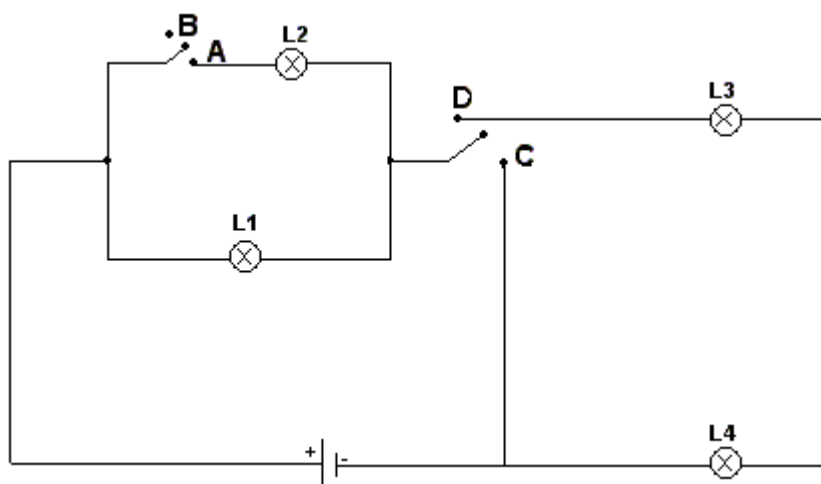


Figura A,1 – Figura ilustrativa de um circuito elétrico simples.

- 2) Quando as chaves estão nas posições A e C , ao abrir a chave A - B (posição B), o que acontecerá com o brilho de L_1 ?
- 3) Quando as chaves estão nas posições B e D , ao fechar a chave A - B (posição A), o que acontecerá com o brilho de L_1 , L_3 e L_4 ?

¹ Os modelos computacionais estão disponíveis em: http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/circuitos/estudo_II.zip. Cada modelo encontra-se protegido pela senha “m”, para desproteger o modelo Arquivo => Senha.

- 4) Responda os itens anteriores utilizando o material experimental disponível ou a simulação computacional (nome do arquivo eletrônico: *circuito_misto.mdl*) comentando detalhadamente as respostas que diferirem de suas previsões iniciais.
- 5) O modelo computacional representa adequadamente o comportamento do circuito real?
- 6) Explique o que acontece com a resistência equivalente do circuito representado na A.1 quando:
 - i) as chaves estão nas posições *B* e *C*, e fechamos a chave *A-B* (posição *A*)?
 - ii) as chaves estão nas posições *A* e *C*, e fechamos a chave *C-D* (posição *D*)?
- 7) O que se pode dizer sobre o comportamento da corrente elétrica ao longo de um circuito elétrico?
- 8) Em um circuito elétrico contendo duas lâmpadas de resistência elétrica diferentes, podemos associá-las em série ou paralelo. O que podemos dizer sobre o brilho das lâmpadas nestas situações? Justifique.

AULA 2 – CIRCUITOS ELÉTRICOS SIMPLES

Fonte real

Questões

- 1) Considere o circuito simples mostrado na Figura A.2. O que acontece com V_{ab} , I_t , I_2 , I_3 e I_4 ao se abrir a chave C-D?
- 2) Quando todas as chaves estão fechadas no circuito apresentado na Figura A.2, o que acontece com V_{ab} , I_t , I_1 , I_2 , I_3 e I_4 ao aumentar(diminuir) a resistência elétrica no resistor $R1$?
- 3) Ainda no circuito da Figura A.2, o que acontece com a diferença de potencial entre os pontos **a** e **b** ao aumentar(diminuir) a resistência elétrica em r ?
- 4) Responda os itens anteriores utilizando a simulação computacional (*fonte_real.mdl*) comentando detalhadamente as respostas que diferirem de suas previsões iniciais.
- 5) Execute o modelo computacional e manipule os parâmetros ε , $R1$, $R2$, $R3$, $R4$ e r . Quais são as consequências devido a resistência interna da fonte ao longo do circuito elétrico?

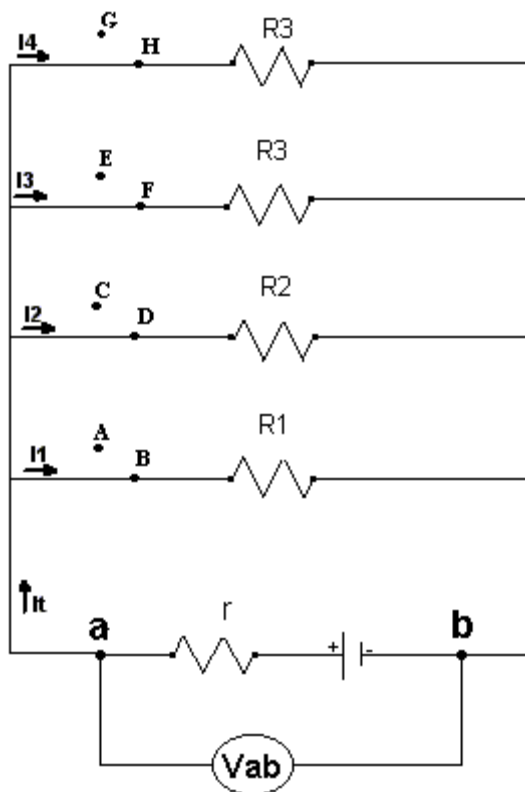


Figura A.2 – Figura ilustrativa de um circuito elétrico simples com fonte real.

AULA 3: CIRCUITOS ELÉTRICOS SIMPLES

Fonte real (continuação da aula anterior)

Questões

- 1) Dada uma bateria real de fem conhecida e resistência interna r , que possui um resistor R ligado em série como mostra a Figura A.3. Escreva na janela Modelo as equações que representam a resistência equivalente, a corrente que passa em R e a potência dissipada em R em função de ε , R e r .
- 2) Na janela Controle clique em Opções e escolha a variável R como variável independente com valores mínimo 0 e máximo 10 e passo 0.05.
- 3) Execute o modelo para os seguintes parâmetros: $\varepsilon = 15.00 \text{ V}$ e $r = 4.00 \Omega$.

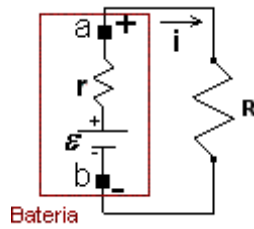


Figura A.3 – Representação de um circuito elétrico simples.

- 4) No menu Janela escolha a opção Novo Gráfico. Obtém-se a janela vista na Figura A.4.
- 5) Escolha a variável PR na direção vertical e R na direção horizontal.

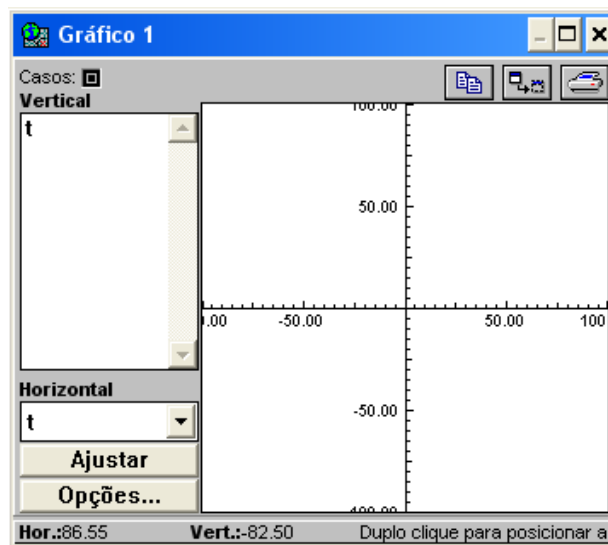


Figura A.4 – Janela Gráfico.

- 6) Justifique o comportamento da curva descrita no gráfico potência dissipada em R versus resistência elétrica no resistor R .

Representações de circuitos elétricos

- 1) Faça um diagrama que represente o circuito elétrico que se encontra montado sobre a mesa.
- 2) Com base no diagrama desenhado:
 - i) Classifique o brilho das lâmpadas presentes no circuito elétrico;
 - ii) O que acontecerá com o brilho das cinco lâmpadas ao retirar do circuito o cabo preto (pino jacaré)?
- 3) Responda os itens anteriores utilizando o circuito elétrico montado comentando detalhadamente as respostas que diferem de suas previsões iniciais.

AULA 4: CIRCUITOS RC

Questões

Atenção: Responda os itens “1 e 2” antes de executar o modelo computacional. Considerando que o capacitor C do circuito mostrado na Figura A.5 esteja sendo carregado.

- 1) Trace qualitativamente a curva que representa a carga do capacitor em função do tempo para uma situação em que a diferença de potencial fornecida pela fonte V é repentinamente:
 - i) aumentada
 - ii) diminuída, quando o capacitor C está próximo de sua carga máxima
- 2) Trace qualitativamente a curva que representa a carga do capacitor em função do tempo para uma situação em que a capacitância do capacitor C é repentinamente:
 - i) aumentada
 - ii) diminuída, quando o capacitor C está sendo carregado
 - iii) diminuída, quando o capacitor C está próximo de sua carga máxima

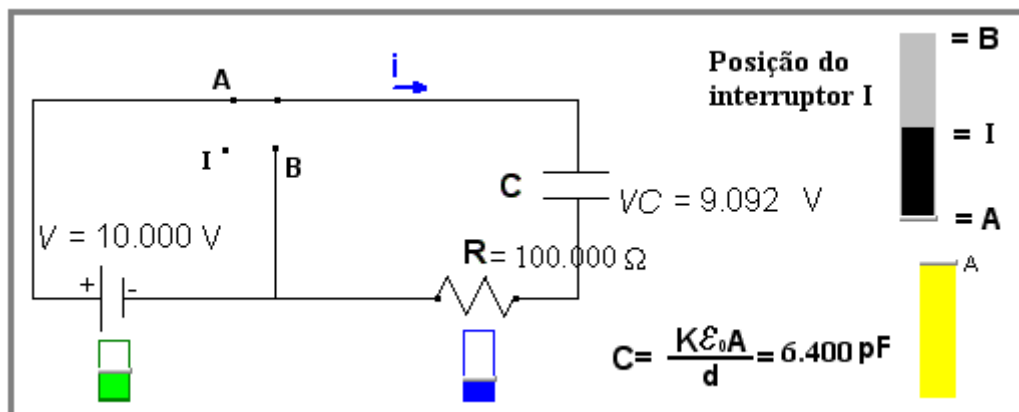


Figura A.5 – Figura ilustrativa do circuito representado no modelo computacional.

No modelo computacional (*CirRC.mdl*) é possível variar a resistência elétrica do resistor R (barra em azul), a diferença de potencial fornecida pela fonte V (barra em verde) e a capacitância do capacitor C alterando a área A (barra em amarelo).

- 3) Execute o modelo e manipule os valores de V e C de modo a criar os gráficos traçados nos itens “1 e 2”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.
- 4) O que acontece com a taxa de variação da quantidade de carga $q(t)$ armazenada no capacitor durante o processo de carga (interruptor I na posição A) para uma situação em que a resistência elétrica em R é repentinamente:

- i) aumentada
 - ii) diminuída
- 5) Esboce o gráfico da taxa de variação da quantidade de carga $q(t)$ armazenada no capacitor durante o seu processo de carregamento. Que grandeza física esta variação representa?
- 6) Utilizando o osciloscópio e o gerador de funções meça a constante de tempo capacitiva do circuito RC disponibilizado. Compare o valor experimental com o valor teórico e aponte as possíveis fontes de erro.

AULA 5: CIRCUITOS RL

Questões

Atenção: Responda os itens “1, 2 e 3” antes de executar o modelo computacional.

- 1) Considerando que no circuito mostrado na Figura A.6, o interruptor é deslocado da posição I para a posição A. Esboce os seguintes gráficos:
- i) corrente elétrica em função do tempo;
 - ii) diferença de potencial no resistor R em função do tempo;
 - iii) diferença de potencial no indutor L em função do tempo.

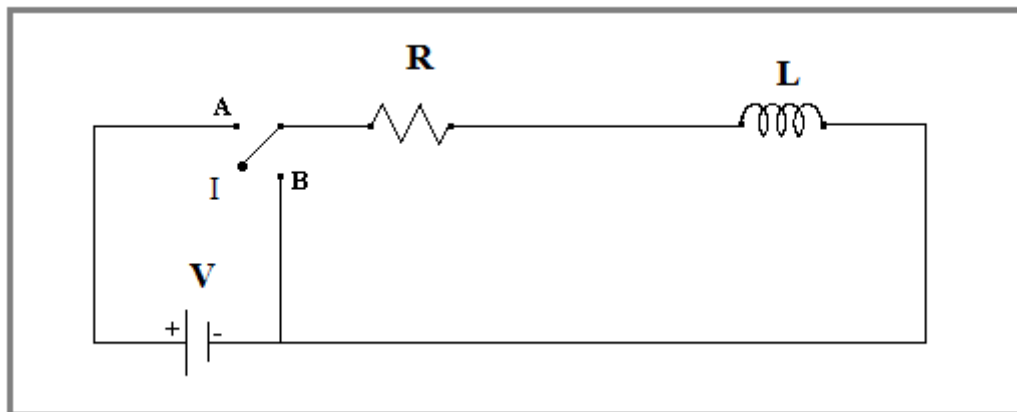


Figura A.6 – Figura ilustrativa do circuito representado no modelo computacional.

- 2) Ainda no circuito da Figura A.6, o interruptor é deslocado da posição A para a posição B . Esboce os seguintes gráficos:
- i) corrente elétrica em função do tempo;
 - ii) diferença de potencial no resistor R em função do tempo;

- iii) diferença de potencial no indutor L em função do tempo.
- 3) Ainda no circuito da Figura A.6, o interruptor é deslocado da posição I para a posição A . Esboce o gráfico da intensidade de corrente elétrica em função do tempo quando:
- a resistência elétrica R é repentinamente diminuída, após um breve intervalo de tempo em função do tempo;
 - a resistência elétrica R é repentinamente aumentada, após um breve intervalo de tempo em função do tempo;
 - a diferença de potencial fornecida pela fonte é repentinamente aumentada, quando a corrente elétrica estiver quase estabilizada;
 - a indutância L é repentinamente aumentada, após um breve intervalo de tempo.

No modelo computacional (*CirRL.mdl*) é possível variar a resistência elétrica do resistor R (barra em azul), a diferença de potencial fornecida pela fonte V (barra em amarelo) e a indutância do indutor L (barra em verde).

- 4) Execute o modelo e manipule os valores de R , V e L de modo a criar os gráficos traçados nos itens “1, 2 e 3”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.
- 5) Utilizando o osciloscópio e o gerador de funções meça a constante de tempo indutiva circuito RL disponibilizado. Compare o valor experimental com o valor teórico e aponte as possíveis fontes de erro.

AULA 6: CIRCUITOS LC e RLC

Nesta aula trabalhamos somente com atividades computacionais.

Questões

- 1) No circuito da Figura A.7, considere que o capacitor C esteja completamente carregado, quando o interruptor é deslocado da posição I para posição A . Esboce os seguintes gráficos:
- corrente elétrica em função do tempo;
 - diferença de potencial no indutor em função do tempo;
 - diferença de potencial no capacitor em função do tempo;

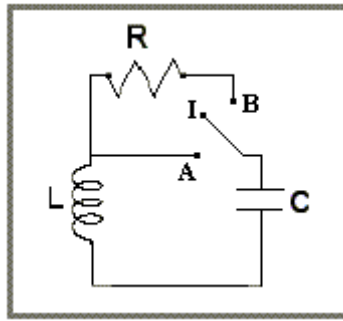


Figura A.7 – Circuito RLC.

- 2) Em que condições não há conservação da energia eletromagnética. Por quê?
- 3) Ainda no circuito da Figura A.7, considere que o capacitor C esteja completamente carregado, quando o interruptor é deslocado da posição I para posição B . Esboce os seguintes gráficos:
 - i) quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor C em função do tempo;
 - ii) corrente elétrica em função do tempo;
 - iii) energia elétrica no capacitor C em função do tempo para uma situação em que a resistência elétrica em R é repentinamente aumentada;
 - iv) energia magnética no indutor L em função do tempo para uma situação em que a resistência elétrica em R é repentinamente diminuída.

O arquivo eletrônico *cirRLC.mdl*, traz a simulação de um circuito elétrico RLC na qual é possível variar a resistência elétrica do resistor R (barra em azul).

- 4) Execute o modelo, se necessário manipule o valor de R de modo a criar os gráficos traçados nos itens “1 e 3”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.
- 5) Qual o comportamento do campo magnético (B) no indutor nos intervalos de tempo em que a carga está aumentando? Explique.
- 6) Qual o comportamento do campo elétrico (E) entre as placas do capacitor nos intervalos de tempo em que a corrente elétrica está diminuindo? Explique.
- 7) Esboce o gráfico que representa a energia eletromagnética em função do tempo em um circuito RLC.

AULA 7: CIRCUITOS CORRENTE ALTERNADA

Circuitos RLC em série

- 1) No circuito da Figura A.8, R é um resistor, L um indutor, C um capacitor e G um gerador que produz uma f_{em} oscilatória senoidal que estabelece uma corrente alternada (CA) no circuito. Esboce os gráficos ou faça diagramas de fasores das diferenças de potencial V_R , V_L , V_C e ε em função do tempo para as seguintes condições:
 - i) $XL > XC$
 - ii) $XL < XC$
 - iii) $XL = XC$

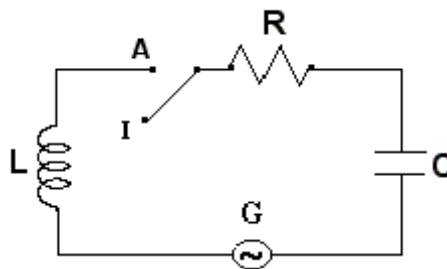


Figura A.8 – Circuito RLC.

- 2) Ainda no circuito da Figura A.1, considere que inicialmente o circuito está em ressonância ($f_d = f$). Esboce os gráficos da diferença de potencial V_R , V_L , V_C e ε em função do tempo quando:
 - i) a frequência de excitação f_d é repentinamente aumentada;
 - ii) a frequência de excitação f_d é repentinamente diminuída.

O arquivo eletrônico *CiracRLC.mdl*, traz a simulação de um circuito elétrico RLC em série excitado senoidalmente na qual é possível variar a resistência elétrica do resistor R (barra em preto), a capacitância do capacitor C (barra em verde), a frequência de excitação f_d da fonte (barra em amarelo) e a indutância do indutor L (barra em azul).

- 3) Execute o modelo, se necessário manipule os valores de R , L , C e f_d de modo a criar os gráficos traçados nos itens “1 e 2”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.
- 4) Utilizando o osciloscópio, o gerador de função (fonte) e os multímetros:
 - i) encontre a frequência de ressonância do circuito e compare com o valor teórico;
 - ii) meça a intensidade da corrente elétrica no circuito para diferentes valores de frequência de excitação (10 a 200 Hz) e construa um gráfico frequência ($f_d(\text{Hz})$) versus impedância ($Z(\text{k}\Omega)$).
- 5) Descreva detalhadamente os procedimentos experimentais realizados no item anterior.

APÊNDICE B

Neste apêndice apresentamos a entrevista semi-estruturada realizada ao final do segundo estudo.

- 1) Considere os seguintes fatores:
 - (a) uso de experimentos
 - (b) uso do computador
 - (c) trabalho em grupo
 - (d) interação com o professor

Ordene do mais importante ao menos importante para:

- o seu aprendizado 1° () 2° () 3° () 4° ()
 - a sua motivação para aprender 1° () 2° () 3° () 4° ()
 - as suas dificuldades 1° () 2° () 3° () 4° ()
- 2) Comente sobre as atividades experimentais desenvolvidas no laboratório de Física no ensino de circuitos elétricos, em termos de auxílio ao seu aprendizado.
 - 3) Pensando em termos de circuitos elétricos, consideras que tenhas aprendido alguma coisa com o uso do computador?
 - 4) De forma geral, gostaria que comentasses um pouco o que achaste da integração entre as atividades experimentais e computacionais?
 - 5) No circuito mostrado na Figura B.1, L é uma lâmpada, a bateria é real e os resistores R_1 e R_2 ($R_1 \ll R_2$) são ôhmicos. Quando os interruptores estão nas posições A e C , ao fechar o interruptor A - B , **(a)** o que acontecerá com o brilho de L ? **(b)** este comportamento é semelhante ao que aconteceria se fosse fechado o interruptor C - D em vez do interruptor A - B ?

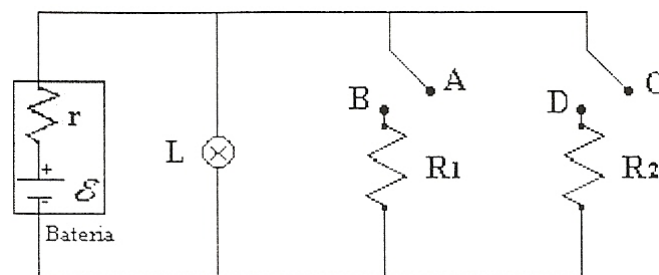


Figura B.1 – Circuito simples com fonte real.

APÊNDICE C

Neste apêndice apresentamos a entrevista semi-estruturada realizada ao final do terceiro estudo.

- 1) De forma geral, gostaria que comentasses sobre as aulas de Laboratório de Física realizadas neste semestre.
- 2) Pensando em termos de circuitos elétricos, consideras que tenhas aprendido alguma coisa com o uso do computador? Se tiveres, o quê e como?
- 3) Comente um pouco sobre o que achaste da integração proposta entre atividades experimentais e computacionais?
- 4) Na sua opinião, o que achaste das atividades que exploram as diferenças entre um sistema real e um sistema ideal?

APÊNDICE D

Neste apêndice apresentamos os guias que os alunos receberam no terceiro estudo para desenvolverem as atividades concebidas. Em nossos modelos¹ representando circuitos elétricos admitimos que os resistores são ôhmicos e os fios, as fontes e alguns indutores possuem resistência elétrica desprezível. Nas aulas 2 e 3 trabalhamos com indutores reais (com resistência elétrica).

AULA 1: CIRCUITOS RC

Atividade computacional

Atenção: Responda os itens “1 e 2” antes de executar o modelo. Considerando que o capacitor C do circuito mostrado na Figura D.1 esteja sendo carregado.

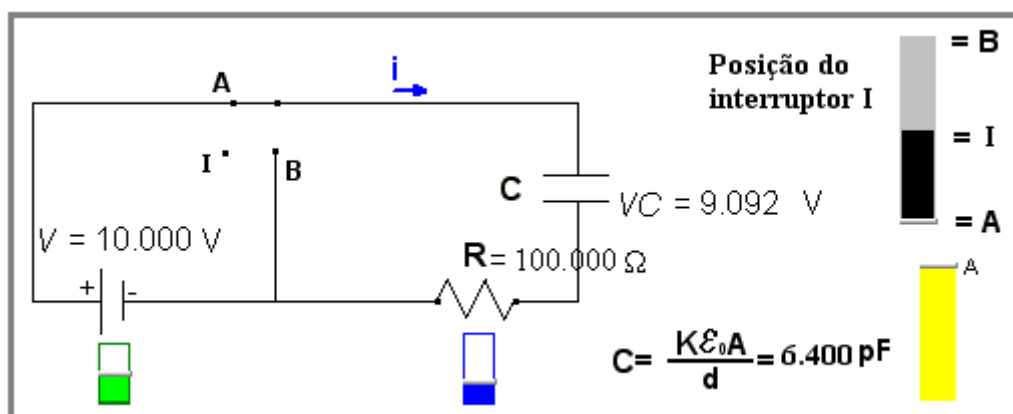


Figura D.1 – Figura ilustrativa do circuito representado no modelo computacional.

Questões

- 1) Trace qualitativamente a curva que representa a carga do capacitor em função do tempo para uma situação em que a diferença de potencial fornecida pela fonte V é repentinamente:
 - i) aumentada,
 - ii) diminuída, quando o capacitor está próximo de sua carga máxima.
- 2) Trace qualitativamente a curva que representa a carga do capacitor em função do tempo para uma situação em que a capacitância do capacitor é repentinamente:
 - i) aumentada,
 - ii) diminuída, quando o capacitor está sendo carregado,
 - iii) diminuída, quando o capacitor está próximo de sua carga máxima.

¹ Os modelos computacionais estão disponíveis em: <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/circuitos/estudo_III.zip>
Acesso em 20 fev. 2010.

Cada modelo encontra-se protegido pela senha “m”, para desproteger o modelo Arquivo => Senha.

O arquivo eletrônico *circuitoRC1.mdl*, traz a simulação de um circuito elétrico RC na qual é possível variar a resistência elétrica do resistor (barra em azul), a diferença de potencial fornecida pela fonte (barra em verde) e a capacitância do capacitor alterando a área A (barra em amarelo).

- 3) Execute o modelo e manipule os valores de V e C de modo a criar os gráficos traçados nos itens “1 e 2”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.
- 4) O que acontece com a taxa de variação da quantidade de carga $q(t)$ armazenada no capacitor durante o processo de carga (interruptor I na posição A) para uma situação em que a resistência elétrica no resistor é repentinamente:
 - i) aumentada
 - ii) diminuída
- 5) Esboce o gráfico da taxa de variação da quantidade de carga $q(t)$ armazenada no capacitor durante o seu processo de carregamento. Que grandeza física esta variação representa?

Atividade integrada

O arquivo eletrônico *circuitoRC2.mdl*, traz a simulação de um circuito elétrico RC alimentado por um gerador de função, que fornece ao circuito uma onda quadrada.

- 1) Abra a janela Animação 2, do modelo denominado *circuitoRC2.mdl*, e trace na Figura D.2 as curvas de diferenças de potencial no resistor e no capacitor durante uma oscilação completa.

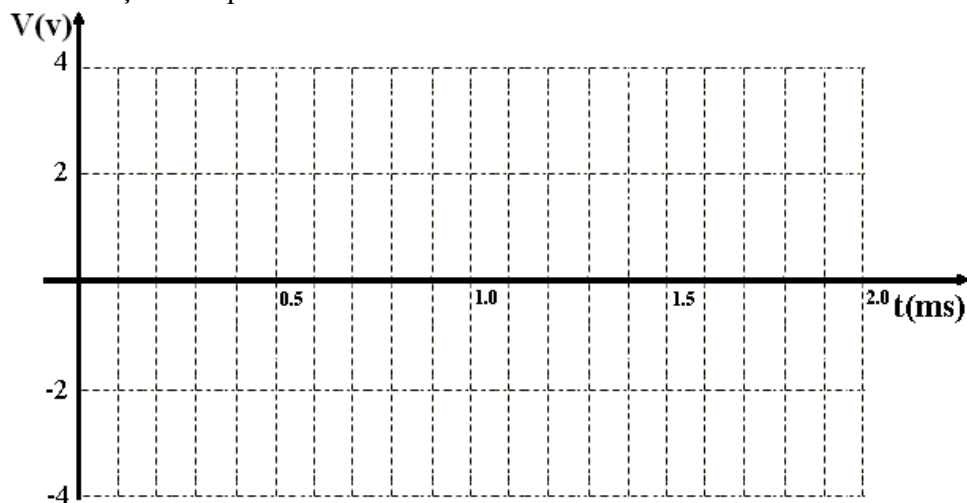


Figura D.2 – Gráfico diferenças de potencial versus tempo.

- 2) Utilizando o material experimental disponibilizado sobre a bancada:

- i) monte um circuito real com as mesmas características do circuito representado na simulação²;
- ii) obtenha as curvas de diferença de potencial V_R e V_C no osciloscópio e compare com as apresentadas na janela Animação 1;
- iii) explique as diferenças entre as curvas obtidas e as previstas por você inicialmente, caso haja alguma diferença;
- iv) meça experimentalmente a constante de tempo capacitiva do circuito RC montado. Compare o valor experimental com o valor teórico e aponte as possíveis fontes de erro;
- v) descreva detalhadamente os procedimentos experimentais realizados no item anterior.

Atividade experimental

A atividade experimental proposta foi o roteiro usual da disciplina, intitulado circuitos RC em série. Processos de carga e descarga (Anexo B).

AULA 2: REATÂNCIA CAPACITIVA E INDUTIVA

Circuito puramente capacitivo

Atividade computacional

- 1) No circuito da Figura D.3, C é um capacitor e G um gerador que produz uma *fem* oscilatória senoidal ε que estabelece uma corrente alternada no circuito. Esboce os gráficos ou faça diagramas de fasores da diferença de potencial no capacitor e da intensidade de corrente elétrica em função do tempo para as seguintes condições:
 - i) a frequência de excitação f_d é repentinamente aumentada;
 - ii) a capacitância C é repentinamente diminuída.

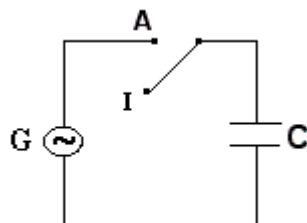


Figura D.3 – Circuito capacitivo.

² Para obter uma onda quadrada com as características da fornecida pelo gerador presente na simulação você deve ligar a opção OFFSET (inserir uma diferença de potencial CC) e variar o valor de saída no botão OFFSET, que se encontra ao lado do OUTPUT.

O arquivo eletrônico *capacitivo.mdl*, traz a simulação de um circuito elétrico puramente capacitivo na qual é possível variar a capacitância do capacitor C (barra em azul), a frequência de excitação f_d do gerador (barra em verde).

- 2) Execute o modelo e manipule os valores de C e de f_d de modo a criar os gráficos traçados no item anterior. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.

Circuito puramente indutivo

- 3) No circuito da Figura D.4, L é um indutor e G um gerador que produz uma *fem* oscilatória senoidal ε que estabelece uma corrente alternada no circuito. Esboce os gráficos ou faça um diagrama de fasores da diferença de potencial no indutor e da intensidade de corrente elétrica em função do tempo para as seguintes condições:
 - i) a frequência de excitação f_d é repentinamente aumentada;
 - ii) a indutância L é repentinamente diminuída;

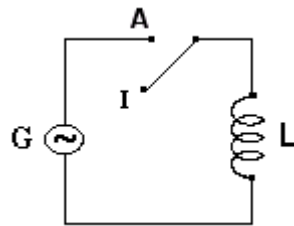


Figura D.4 – Circuito indutivo

O arquivo eletrônico *indutivo.mdl*, traz a simulação de um circuito elétrico puramente indutivo na qual é possível variar a indutância do indutor L (barra em azul), a frequência de excitação f_d do gerador (barra em verde).

- 4) Execute o modelo e manipule os valores de L e de f_d de modo a criar os gráficos traçados no item anterior. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.

Atividade integrada

- 1) Utilizando o material experimental disponibilizado sobre a bancada:
 - i) monte um circuito real com as mesmas características do representado na simulação sobre circuitos capacitivos (arquivo eletrônico *capacitivo.mdl*);
 - ii) encontre experimentalmente a capacitância do capacitor e compare com valor medido diretamente com o multímetro;

- iii) descreva detalhadamente os procedimentos experimentais realizados no item anterior;
- iv) substitua no circuito o capacitor por um indutor;
- v) encontre experimentalmente a indutância do indutor e compare com valor medido diretamente com o multímetro, caso haja alguma diferença execute o modelo computacional cujo o nome do arquivo eletrônico é: *indutor_real.mdl*. Este arquivo traz uma simulação que explora as diferenças entre um indutor ideal e um real. Manipule os valores de L , f_d e ε e observe o comportamento dos valores máximos das diferenças de potencial ao longo dos circuitos representados na simulação. Com base nos resultados gerados discuta com seus colegas de grupo um novo procedimento experimental capaz fornecer uma medida mais precisa da indutância do indutor;
- vi) descreva detalhadamente os procedimentos experimentais realizados no item anterior.

AULA 3: CIRCUITOS DE CORRENTE ALTERNADA

Circuito RLC em série

Atividade computacional

- 1) No circuito da Figura D.5, R é um resistor, L um indutor, C um capacitor e G um gerador que produz uma f_{em} oscilatória senoidal que estabelece uma corrente alternada (CA) no circuito. Esboce os gráficos ou faça diagramas de fasores das diferenças de potencial V_R , V_L , V_C e ε em função do tempo para as seguintes condições:
 - i) $XL > XC$;
 - ii) $XL < XC$;
 - iii) $XL = XC$.

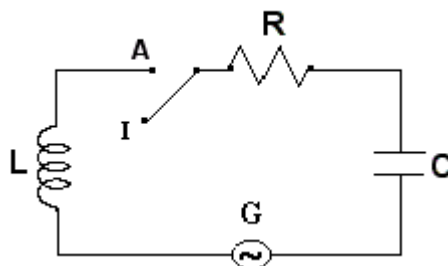


Figura D.5 – Circuito RLC em série de corrente alternada.

2) Ainda no circuito da Figura D.5, considere que inicialmente o circuito está em ressonância ($f_d = f_n$). Esboce os gráficos da diferença de potencial V_R , V_L , V_C e \mathcal{E} em função do tempo quando:

i) a frequência de excitação f_d é repentinamente aumentada;

ii) a frequência de excitação f_d é repentinamente diminuída;

O arquivo eletrônico *CiracRLC.mdl*, traz a simulação de um circuito elétrico RLC em série excitado senoidalmente na qual é possível variar a resistência elétrica do resistor R (barra em preto), a capacitância do capacitor C (barra em verde), a frequência de excitação f_d da fonte (barra em amarelo) e a indutância do indutor L (barra em azul).

3) Execute o modelo, se necessário manipule os valores de C , L e f_d de modo a criar os gráficos traçados nos itens “1 e 2”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.

Atividade integrada

1) Utilizando o material experimental disponibilizado:

i) ajuste o gerador para frequência de 150 Hz e obtenha no osciloscópio as curvas de diferença de potencial v_R e \mathcal{E} . Neste caso o circuito pode ser considerado mais capacitivo, indutivo ou resistivo? Justifique sua resposta;

ii) o que acontece com a diferença de potencial no resistor se a frequência do gerador for ajustada para 350 Hz?

iii) encontre a frequência de ressonância do circuito e compare com o valor teórico;

iv) descreva detalhadamente os procedimentos experimentais realizados no item anterior;

v) com o gerador ajustado na frequência de ressonância do circuito, obtenha a curva de diferença de potencial v_R no osciloscópio e compare com a curva apresentada na Janela Animação 1 da simulação sobre corrente alternada (arquivo eletrônico: *CiracRLC.mdl*). Explique a principal diferença entre estas curvas?

vi) substitua o resistor de 2 k Ω por um de 20 k Ω . Por que neste caso praticamente não há diferenças entre o sistema real e o simulado?

APÊNDICE E

Na Tabela E.1 apresentamos as respostas das questões dissertativas respondidas pelos alunos no início da disciplina no quarto estudo.

Tabela E.1 – Questões dissertativas respondidas no início da disciplina.

Aluno	Teste inicial – Questões dissertativas	
	Como se dá o progresso do conhecimento científico?	Qual o papel da experimentação em Física?
1	<p>“Através de aulas experimentais, onde o aluno deve ser levado à curiosidade, despertando assim seu interesse sobre determinado assunto”.</p> <p>“Incentivando a buscar informações em livros e outros recursos disponíveis. Também dar oportunidade ao aluno para inserção numa iniciação científica”.</p>	<p>“Colocar em prática (no laboratório) o que se vê em sala de aula”.</p> <p>“A experimentação em Física (olhando por outro ângulo) serve para coletar dados para depois então ver se tem a ver com a teoria. No mesmo sentido, também para fazer a pesquisa”.</p>
2	<p>“Através da pesquisa científica tanto teórica quanto experimental e a sua aplicabilidade em casos gerais”.</p>	<p>“Eu acredito que a experimentação na física tem o papel de elucidar de modo prático a teoria em questão”.</p>
3	<p>“Através de teorias que se confirma na prática e o estudo de coisas desconhecidas”.</p>	<p>“Mostrar e verificar se a teoria esta de acordo. Mostrar que a teoria está correta”.</p>
4	<p>“Observação, do suposto fenômeno, investigação, hipótese, constatação experimental”.</p>	<p>“Corroborar; ou seja, ratificar uma hipótese”.</p>
5	<p>“Através da produção de conhecimento por meio de experimento, estudos de campo, ensaios e outros métodos, tendo por base a produção científica anterior. Além disso, o progresso do conhecimento necessita de organização e sistematização dos novos conhecimentos (“descobertas”, “invenções”) e conhecimento prévio, por meio de normatização, sistematização, adoção de padrões, meta-análise de publicações e revisões sistemáticas entre outros”.</p>	<p>“É a produção de novos conhecimentos a partir de hipóteses, confirmação de teorias e também servir como ferramenta de formação para profissionais de áreas científicas afins”.</p>
6	<p>“Depois de formada uma boa base, dar-se a partir de tentativas (experimentos e teorias)”.</p>	<p>“Comprovar teorias existentes e fenômenos novos”.</p>

APÊNDICE F

Neste apêndice apresentamos os guias que os alunos receberam no quarto estudo para desenvolverem as atividades AC-AI. Em nossos modelos¹ admitimos que os resistores são ôhmicos, os fios elétricos, algumas fontes e os indutores possuem resistência elétrica desprezível. Nas aulas 19, 20, 23, 24 e 25 trabalhamos com indutores reais (com resistência elétrica) e na Aula 11 trabalhamos com fonte real. Nas demais aulas trabalhamos com fontes e indutores ideais (resistência elétrica desprezível).

AULA 8: CIRCUITOS SIMPLES

Associação de resistores em série

Atividade de simulação computacional

Questões

- 1) Execute o modelo computacional (nome do arquivo eletrônico: *cirser.mdl*) e responda a seguinte questão: ao fechar a chave *A-B*, o que acontece com a resistência equivalente do circuito mostrado na Animação 3 (Figura F.1)? Por quê?
- 2) Com a chave *A-B* na posição *A*, o que acontece com a corrente elétrica total no circuito quando a resistência elétrica do resistor *R1* é aumentada?
- 3) A intensidade da corrente elétrica no ponto *E*, em relação à intensidade medida no amperímetro *A*, é:
 - i) menor
 - ii) igual
 - iii) maior

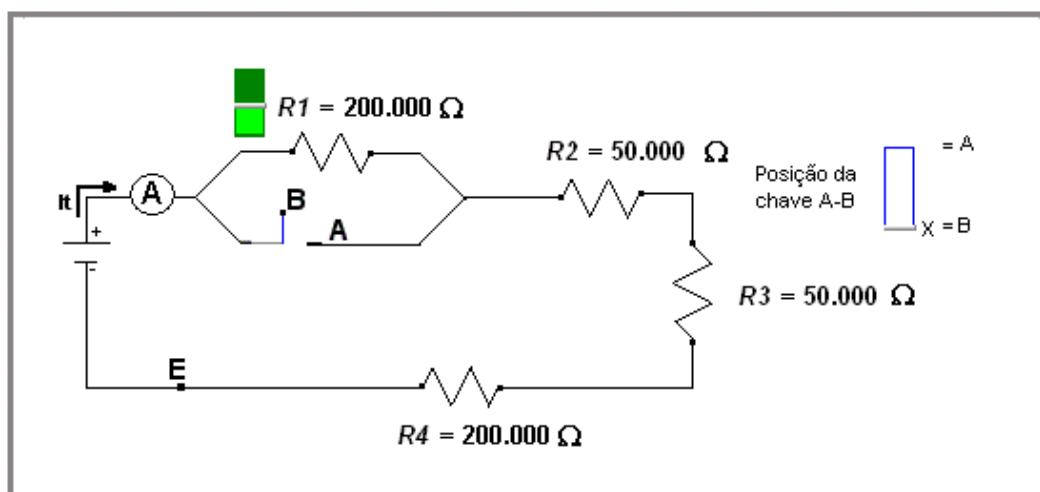


Figura F.1 – Figura ilustrativa do circuito representado no modelo *cirser.mdl*.

¹ Os modelos computacionais estão disponíveis em:
<http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/circuitos/estudo_IV_atividades_integradas.zip> Acesso em 20 de fev. 2010. Cada modelo encontra-se protegido pela senha “m”, para desproteger o modelo Arquivo => Senha.

- 4) Abra a *Animação 2* (janela => Animação 2). Verifique as respostas anteriores. O que se pode dizer sobre o comportamento da corrente elétrica ao longo do circuito?
- 5) Abra a *Animação 1*. No lado direito da janela Animação, encontram-se voltímetros capazes de medir diferenças de potencial entre diferentes pares de pontos do circuito. Altere o valor da resistência elétrica nos resistores (barra em verde). Quando a chave *A-B* está na posição *B* e os resistores *R2* e *R3* nos seus valores máximos, qual é a diferença de potencial entre os pontos *b-d*?
- 6) Quando a chave *A-B* está na posição *A* e os resistores *R2* e *R3* nos seus valores mínimos, qual é a diferença de potencial entre os pontos *a-d*?
- 7) Quando a chave *A-B* está na posição *B*, clique com o botão esquerdo do *mouse* em cima do medidor analógico de *R4* e informe o valor 10000 (valor em ohms). Para que valores tendem a corrente elétrica e a diferença de potencial entre os pontos *d-e*? Por quê?
- 8) Com a chave *A-B* na posição *B* e os resistores e a fonte assumindo os seguintes valores: $R1 = R4 = 200 \Omega$, $R2 = R3 = 50 \Omega$ e $V = 10 V$ calcule: *i)* a potência dissipada em cada resistor e *ii)* a potência da fonte.

Atividade Integrada

- 1) Utilizando o material experimental disponibilizado:
 - i) monte um circuito real com as mesmas características do circuito representado na simulação;
 - ii) encontre experimentalmente a potência dissipada em cada resistor e a potência da fonte. Os valores encontrados estão de acordo com os obtidos no item 8)?
 - iii) aponte as possíveis fontes de erro.

AULA 9: CIRCUITOS SIMPLES

Associação de resistores em paralelo

Atividade de simulação computacional

Questões

Atenção: Responda os itens “1 e 2” antes de executar o modelo.

- 1) Ao introduzir o resistor *R4* em paralelo no circuito mostrado na Figura F.2 (chave *A-B* na posição *A*), o que acontece com a resistência equivalente e a corrente elétrica total no circuito? Este comportamento é semelhante ao que aconteceria se *R4* fosse associado em série?

- 2) O que acontece com a resistência equivalente no circuito quando a resistência elétrica do resistor R_3 é aumentada?

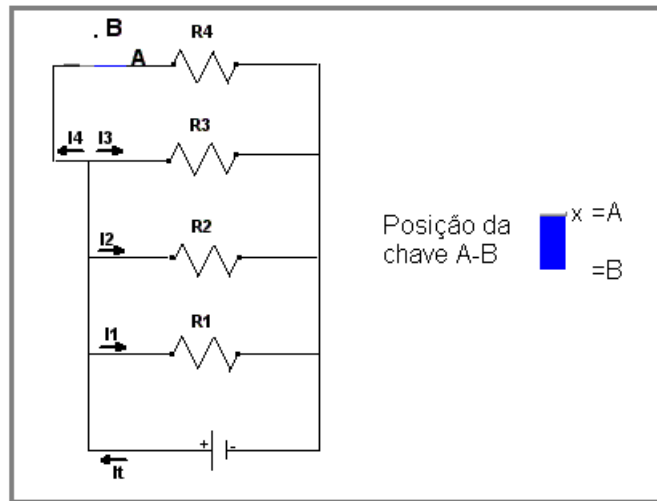


Figura F.2 – Figura ilustrativa do circuito representado no modelo *cirpar1.mdl*.

- 3) Abra a *Animação 2* do modelo computacional (nome do arquivo eletrônico: *cirpar1.mdl*) para verifique suas respostas anteriores.
- 4) Abra a *Animação 1*. Ao abrir a chave $A-B$, o módulo das correntes elétricas i_1 , i_2 e i_3 permanecerão constantes? Justifique sua resposta.
- 5) Quando a chave $A-B$ está na posição A , é possível alterar a diferença de potencial nos resistores ao manipular o valor da resistência elétrica nos resistores? E as correntes elétricas i_1 , i_2 , i_3 e i_4 ?

Atividade Integrada

- 1) Utilizando o material experimental monte um circuito elétrico com duas lâmpadas associados em paralelo. Explique porque neste caso ao inserir uma terceira lâmpada em paralelo a corrente elétrica em todas as lâmpadas não permanece constante (Se necessário abra o modelo computacional *cirpar2.mdl*.) Dê exemplos de situações do nosso cotidiano em que isso acontece.
- 2) Execute o modelo computacional *cirpar2.mdl* e manipule os parâmetros ε , R_1 , R_2 , R_3 , R_4 e r . Quais são as consequências devido a resistência interna da fonte ao longo do circuito elétrico?

AULA 10: CIRCUITOS SIMPLES

Associação mista de resistores

- 1) Nesta atividade é disponibilizado um circuito simples com lâmpadas reais (Figura F.3). Sem abrir a caixa somente ligando e desligando, faça um diagrama que represente o circuito elétrico. Explícite como cada lâmpada está associada.

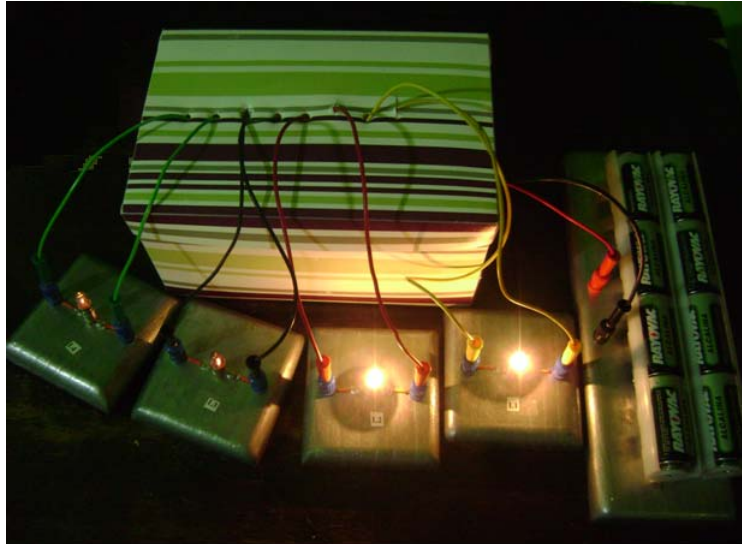


Figura F.3 – Figura ilustrativa do circuito elétrico montado dentro de uma caixa.

- 2) Explique o que acontece com L_2 , L_3 e L_4 ao retirar a lâmpada L_1 do circuito.

Atividade Integrada

- 1) Utilizando um multímetro faça medidas experimentais e teste suas previsões. Use também a simulação computacional (*cirmis.mdl*). Comente detalhadamente as convergências e divergências entre o que foi previsto inicialmente e o que foi medido.
- 2) Finalmente abra a caixa e observe se o diagrama que você desenhou e a simulação computacional podem representar este circuito real.

AULA 11: CIRCUITOS SIMPLES

Fonte Real

Atividade de modelagem computacional

- 1) Dada uma bateria real de fem conhecida e resistência interna r , que possui um resistor R ligado em série como mostra a Figura F.4. Escreva na janela Modelo as equações que representam a resistência equivalente, a corrente que passa em R e a potência dissipada em R em função de ε , R e r .

- 2) Na janela Controle clique em Opções e escolha a variável R como variável independente com valores mínimo 0 e máximo 10 e passo 0.05.
- 3) Execute o modelo para os seguintes parâmetros: $\varepsilon = 15.00$ e $r = 4.00$.

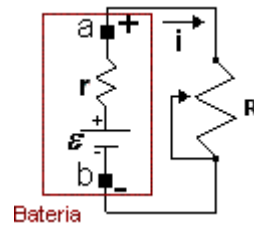


Figura F.4 – Representação de um circuito elétrico simples com fonte real.

- 4) No menu Janela escolha a opção Novo Gráfico. Obtém-se a janela vista na Figura F.5.



Figura F.5 – Janela Gráfico.

- 5) Escolha a variável potência dissipada em R na direção vertical e resistência elétrica em R na direção horizontal.
- 6) Justifique o comportamento da curva descrita no gráfico potência dissipada em R versus resistência elétrica no resistor R .

Atividade integrada

- 1) Utilizando o material experimental e se necessário o modelo computacional construído encontre a resistência interna da fonte disponibilizada. Calcule a incerteza total da medida.
- 2) Descreva detalhadamente os procedimentos experimentais utilizados no item anterior.

AULA 13: CIRCUITOS RC

Atividade de simulação computacional

O arquivo eletrônico *circuitoRC1.mdl*, traz a simulação de um circuito elétrico RC (Figura F.6) na qual é possível variar a resistência elétrica do resistor (barra em azul), a diferença de potencial fornecida pela fonte (barra em verde) e a capacitância do capacitor alterando a área A (barra em amarelo).

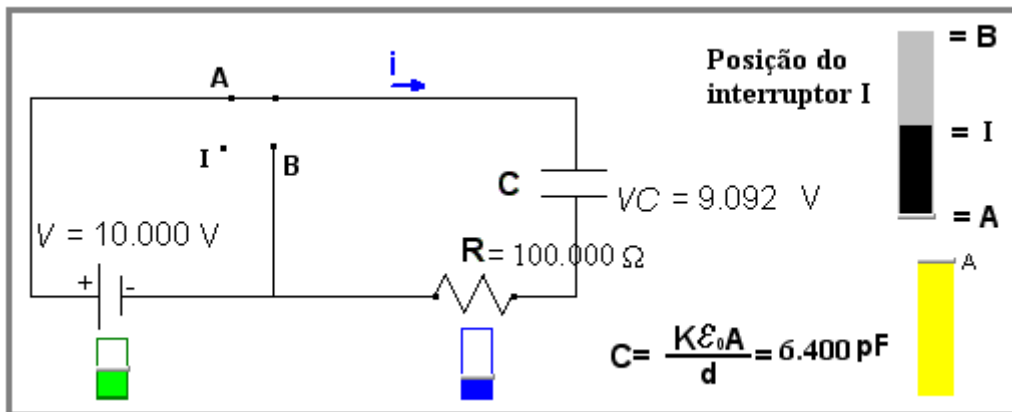


Figura F.6 – Figura ilustrativa do circuito representado no modelo *cirRC1.mdl*.

Questões

Atenção: Responda os itens “1 e 2” antes de executar o modelo. Considerando que o capacitor C do circuito mostrado na Figura F.6 esteja sendo carregado.

- 1) Trace qualitativamente a curva que representa a carga do capacitor em função do tempo para uma situação em que a diferença de potencial fornecida pela fonte V é repentinamente:
 - i) aumentada;
 - ii) diminuída, quando o capacitor está próximo de sua carga máxima.
- 2) Trace qualitativamente a curva que representa a carga do capacitor em função do tempo para uma situação em que a capacitância do capacitor é repentinamente:
 - i) aumentada;
 - ii) diminuída, quando o capacitor está sendo carregado;
 - iii) diminuída, quando o capacitor está próximo de sua carga máxima.
- 3) Execute o modelo e manipule os valores de V e C de modo a criar os gráficos traçados nos itens “a e b”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.

- 4) O que acontece com a taxa de variação da quantidade de carga $q(t)$ armazenada no capacitor durante o processo de carga (interruptor I na posição A) para uma situação em que a resistência elétrica no resistor é repentinamente:
- aumentada;
 - diminuída.
- 5) Esboce o gráfico da taxa de variação da quantidade de carga $q(t)$ armazenada no capacitor durante o seu processo de carregamento. Que grandeza física esta variação representa?

Atividade integrada

O arquivo eletrônico *circuitoRC2.mdl*, traz a simulação de um circuito elétrico RC alimentado por um gerador de função, que fornece ao circuito uma onda quadrada.

- 1) Abra a janela Animação 2, do modelo computacional, e trace na Figura F.7 as curvas de diferenças de potencial no resistor e no capacitor em função do tempo para uma oscilação completa.

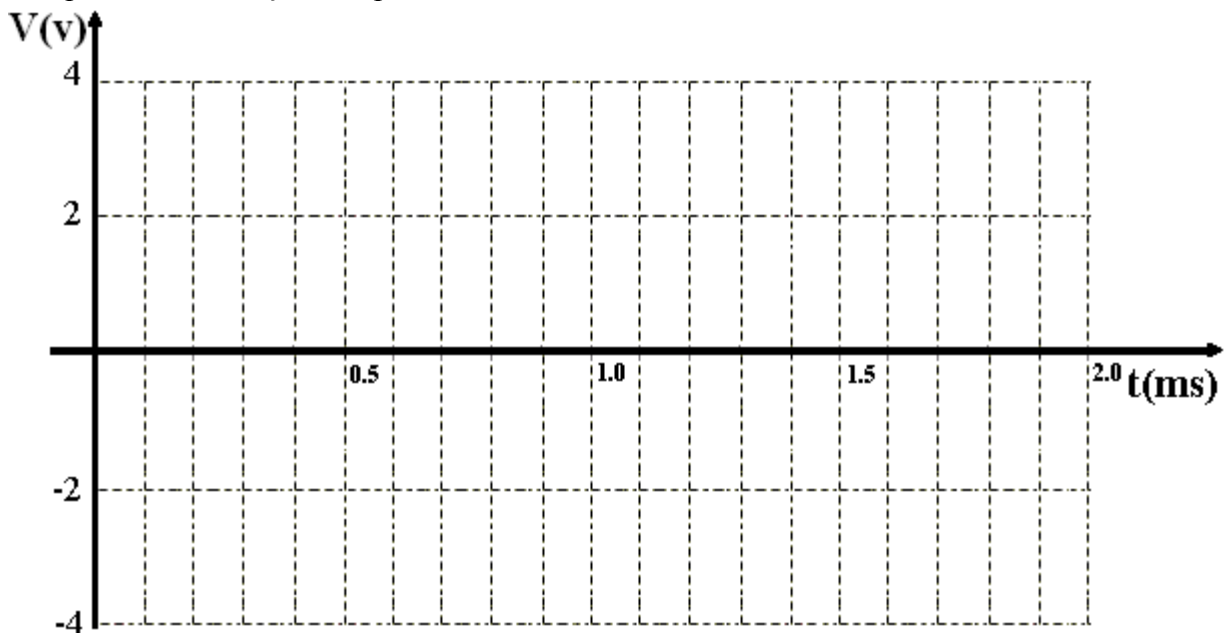


Figura F.7 – Gráfico diferenças de potencial versus tempo.

- 2) Utilizando o material experimental disponibilizado:
- monte um circuito real com as mesmas características do circuito representado na simulação²;

² Para obter uma onda quadrada com as características da fornecida pelo gerador presente na simulação você deve ligar a opção OFFSET (inserir uma diferença de potencial CC) e variar o valor de saída no botão OFFSET, que se encontra ao lado do OUTPUT.

- ii) obtenha as curvas de diferença de potencial V_R e V_C no osciloscópio e compare com as apresentadas na janela Animação 2;
- iii) explique as diferenças entre as curvas obtidas e as previstas por você inicialmente, caso haja alguma diferença;
- iv) meça experimentalmente a constante de tempo capacitiva do circuito RC montado. Compare o valor experimental com o valor teórico e aponte as possíveis fontes de erro;
- v) descreva detalhadamente os procedimentos experimentais realizados no item anterior.

AULAS 19 E 20: CIRCUITOS RL

- 1) A Figura F.8 representa um circuito RL (resistor e indutor associados em série com uma fonte). Esboce os gráficos das diferenças de potencial no resistor e no indutor em função do tempo para as seguintes situações:

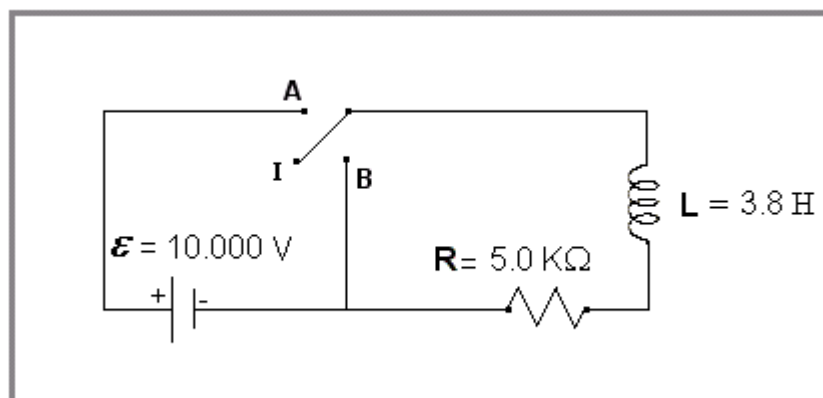


Figura F.8 – Circuito RL.

- i) em $t = 0$ s o interruptor passou da posição I para posição A;
- ii) em $t = 4$ ms o interruptor passou da posição A para posição B.

Atividade de modelagem computacional

- 2) A janela Modelo mostrada na Figura F.9 é de um modelo de um circuito RC. Com base neste, construa um modelo computacional de um circuito RL (Figura F.8).

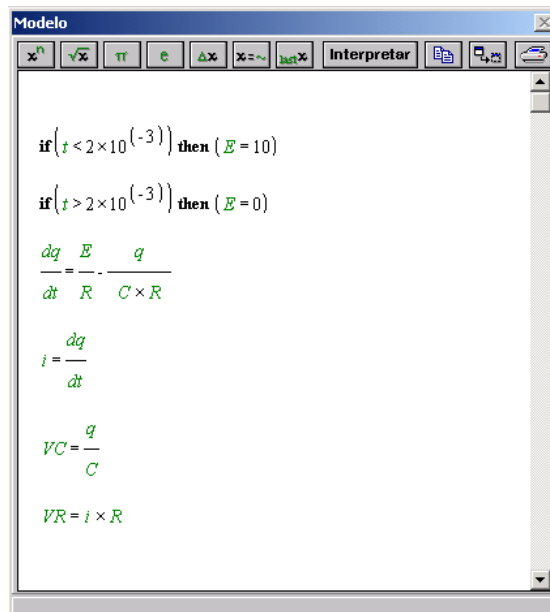


Figura F.9 – Janela Modelo.

- 3) Explique as convergências e divergências entre os gráficos traçados no item 1 e os obtidos com o modelo computacional construído (Janela Novo Gráfico).
- 4) Insira na janela Animação um gráfico corrente elétrica *versus* tempo e barras de rolagem para variar a indutância no indutor e a resistência elétrica no resistor. Após discuta as alterações na intensidade da corrente elétrica no circuito ao alterar a indutância em L ou a resistência elétrica em R .

Atividade integrada

- 1) Utilizando o material experimental disponibilizado monte um circuito real com as mesmas características do representado na Figura F.8. Os resultados teóricos obtidos com o modelo computacional estão de acordo com os dados experimentais? Justifique com argumentação física sua resposta.
- 2) Encontre experimentalmente a constante de tempo indutiva do circuito real. Compare o valor experimental com o valor teórico e aponte as possíveis fontes de erro.
- 3) Descreva detalhadamente os procedimentos experimentais realizados no item anterior.

AULAS 21 E 22: CIRCUITOS LC E RLC

Atividade de simulação computacional

O arquivo eletrônico *circuitoRCL.mdl* traz a simulação de um circuito RLC (Figura F.10) na qual é possível variar a resistência elétrica do resistor (barra em azul).

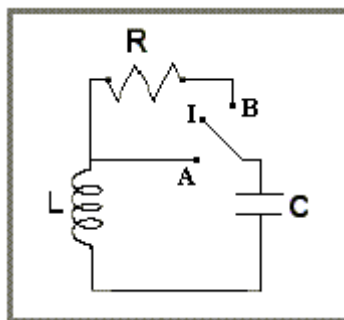


Figura F.10 – Circuito RLC.

Questões

Atenção: Responda o item “1” antes de executar o modelo. Considerando que o capacitor C do circuito mostrado na Figura F.10 esteja sendo carregado.

- 1) No circuito da Figura F.10, considere que o capacitor C esteja completamente carregado, quando o interruptor é deslocado da posição I para posição A . Esboce os seguintes gráficos:
 - i) corrente elétrica em função do tempo;
 - ii) diferença de potencial no indutor em função do tempo;
 - iii) diferença de potencial no capacitor em função do tempo.
- 2) Execute o modelo computacional e explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.
- 3) Justifique com argumentação física o comportamento da intensidade de corrente elétrica no circuito durante uma oscilação completa.
- 4) Ainda no circuito da Figura F.10, considere que o capacitor C esteja completamente carregado, quando o interruptor é deslocado da posição I para posição B . Esboce os seguintes gráficos:
 - i) quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor C em função do tempo;
 - ii) corrente elétrica em função do tempo;
 - iii) energia elétrica no capacitor C em função do tempo para uma situação em que a resistência elétrica em R é repentinamente aumentada;
 - iv) energia magnética no indutor L em função do tempo para uma situação em que a resistência elétrica em R é repentinamente diminuída;
 - v) energia eletromagnética em função do tempo.

- 5) Execute o modelo, se necessário manipule o valor de R de modo a criar os gráficos traçados no item “4”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.
- 6) Explique qualitativamente o comportamento dinâmico da energia eletromagnética no circuito durante uma oscilação completa.

Atividade integrada

- 1) Utilizando o material experimental disponibilizado monte um circuito RLC e encontre experimentalmente a curva que descreve o comportamento da energia eletromagnética em função do tempo para no mínimo duas oscilações completas e compare com o apresentado no modelo computacional.

AULA 23: CIRCUITOS DE CORRENTE ALTERNADA

Circuito puramente capacitivo

Atividade de simulação computacional

O arquivo eletrônico *capacitivo.mdl* traz a simulação de um circuito elétrico puramente capacitivo (Figura F.11) na qual é possível variar a capacitância do capacitor C (barra em azul), a frequência de excitação f_d do gerador (barra em verde).

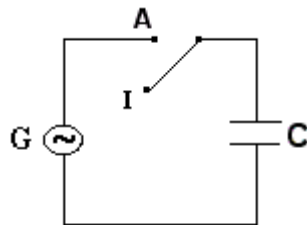


Figura F.11 – Circuito capacitivo

Questões

Atenção: Responda o item “1” antes de executar o modelo. Considerando que o capacitor C do circuito mostrado na Figura F.11 esteja sendo carregado.

- 1) No circuito da Figura F.11, C é um capacitor e G um gerador que produz uma *fem* oscilatória senoidal ε que estabelece uma corrente alternada no circuito. Esboce os gráficos ou faça diagramas de fasores da diferença de potencial no capacitor e da intensidade de corrente elétrica em função do tempo para as seguintes condições:
 - i) a frequência de excitação f_d é repentinamente aumentada;
 - ii) a capacitância C é repentinamente diminuída.

- 2) Execute o modelo e manipule os valores de C e de f_d de modo a criar os gráficos traçados no item “1”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.

Circuito puramente indutivo

O arquivo eletrônico *indutivo.mdl*, traz a simulação de um circuito elétrico puramente indutivo (Figura F.12) na qual é possível variar a indutância do indutor L (barra em azul), a frequência de excitação f_d do gerador (barra em verde).

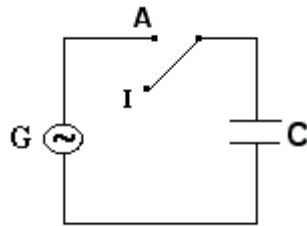


Figura F.12 – Circuito indutivo.

- 3) No circuito da Figura F.12, L é um indutor e G um gerador que produz uma *fem* oscilatória senoidal ε que estabelece uma corrente alternada no circuito. Esboce os gráficos ou faça um diagrama de fasores da diferença de potencial no indutor v_L e da intensidade de corrente elétrica em função do tempo para as seguintes condições:
- a frequência de excitação f_d é repentinamente aumentada;
 - a indutância L é repentinamente diminuída;
- 4) Execute o modelo e manipule os valores de L e de f_d de modo a criar os gráficos traçados nos itens “a e b”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.

Atividade integrada

- Utilizando o material experimental disponibilizado:
 - monte um circuito real com as mesmas características do representado na simulação sobre circuitos capacitivos (arquivo eletrônico capacitivo.mdl);
 - encontre experimentalmente a capacitância do capacitor e compare com valor medido diretamente com o multímetro;
 - descreva detalhadamente os procedimentos experimentais realizados no item anterior;
 - substitua no circuito o capacitor por um indutor;

- v) encontre experimentalmente a indutância do indutor e compare com valor medido diretamente com o multímetro, caso haja alguma diferença execute o modelo computacional cujo o nome do arquivo eletrônico é: indutor_real.mdl. Este arquivo traz uma simulação que explora as diferenças entre um indutor ideal e um real. Manipule os valores de L , f_d e ε e observe o comportamento dos valores máximos das diferenças de potencial ao longo dos circuitos representados na simulação. Com base nos resultados gerados discuta com seus colegas de grupo um novo procedimento experimental capaz fornecer uma medida mais precisa da indutância do indutor;
- vi) descreva detalhadamente os procedimentos experimentais realizados no item anterior.

AULAS 24 E 25: CIRCUITOS DE CORRENTE ALTERNADA

Circuito RLC em série

Atividade de simulação computacional

O arquivo eletrônico *CiracRLC.mdl*, contém a simulação de um circuito elétrico RLC em série excitado senoidalmente (Figura F.13) na qual é possível variar a resistência elétrica do resistor R (barra em preto), a capacitância do capacitor C (barra em verde), a frequência de excitação f_d da fonte (barra em amarelo) e a indutância do indutor L (barra em azul).

- 1) No circuito da Figura F.13, R é um resistor, L um indutor, C um capacitor e G um gerador que produz uma fem oscilatória senoidal que estabelece uma corrente alternada (AC) no circuito. Esboce os gráficos ou faça diagramas de fasores das diferenças de potencial V_R , V_L , V_C e ε em função do tempo para as seguintes condições:
- $X_L > X_C$
 - $X_L < X_C$
 - $X_L = X_C$

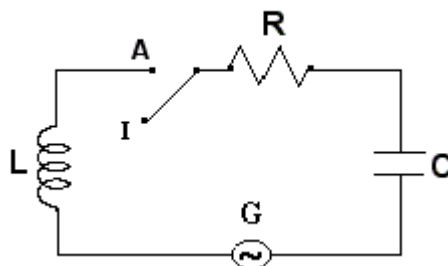


Figura F.13 – Circuito RLC em série.

- 2) Ainda no circuito da Figura F.13, considere que inicialmente o circuito está em ressonância ($f_d = f_n$). Esboce os gráficos da diferença de potencial V_R , V_L , V_C e ε em função do tempo quando:
- a frequência de excitação f_d é repentinamente aumentada;
 - a frequência de excitação f_d é repentinamente diminuída;
- 3) Execute o modelo, se necessário manipule os valores de C , L e f_d de modo a criar os gráficos traçados nos itens “1 e 2”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso haja alguma diferença.

Atividade integrada

- Utilizando o material experimental disponibilizado:
 - ajuste o gerador para frequência de 150 Hz e obtenha no osciloscópio as curvas de diferença de potencial V_R e \mathcal{E} . Neste caso o circuito pode ser considerado mais capacitivo, indutivo ou resistivo? Justifique sua resposta.
 - o que acontece com a diferença de potencial no resistor se a frequência do gerador for ajustada para 350 Hz?
 - encontre a frequência de ressonância do circuito e compare com o valor teórico;
 - descreva detalhadamente os procedimentos experimentais realizados no item anterior;
 - com o gerador ajustado na frequência de ressonância do circuito, obtenha a curva de diferença de potencial V_R no osciloscópio e compare com a curva apresentada na Janela Animação 1 da simulação sobre corrente alternada (arquivo eletrônico: *CiracRLC.mdl*). Explique a principal diferença entre estas curvas?
 - substitua o resistor de 2 k Ω por um de 20 k Ω . Por que neste caso praticamente não há diferenças entre o sistema real e o simulado?

APÊNDICE G

Neste apêndice apresentamos como ilustração das exposições teóricas realizadas no início de nossas aulas a nossa introdução sobre o ensino de circuitos RC.

CIRCUITOS RC

Até agora você estudou circuitos elétricos simples de corrente contínua. Nesses circuitos a intensidade de corrente elétrica além de ser sempre no mesmo sentido, é estacionária, isto é, independe do tempo. Na aula de hoje, vamos trabalhar com um circuito RC – resistor e capacitor associados em série. Capacitores não carregam ou descarregam imediatamente, quando ligados em um circuito que possui resistência elétrica. Na atividade da aula de hoje serão exploradas como variam no tempo durante os processos de carga e descarga do capacitor: *a*) a intensidade da corrente elétrica no circuito $i(t)$, *b*) a quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor $q(t)$, *c*) as diferenças de potencial entre os extremos do resistor $V_R(t)$ e *d*) entre as placas do capacitor $V_C(t)$. Para isto, inicialmente vamos analisar quantitativamente o processo de carga do capacitor C do circuito apresentado na Figura G.1. Nesse circuito, R representa um resistor, C um capacitor inicialmente descarregado e I uma chave interruptora.

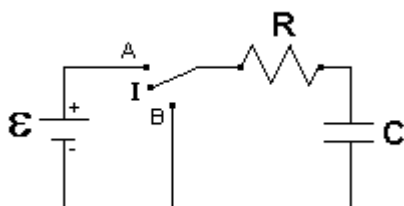


Figura G.1 – Circuito RC em série.

Processo de carga de um capacitor

Vamos considerar que a chave interruptora do circuito mostrado na Figura G.1 foi fechada na posição A em $t = 0$. Percorrendo o circuito no sentido horário a partir do terminal negativo da fonte, temos

$$\varepsilon - V_R - V_C = 0. \quad (\text{G.1})$$

A diferença de potencial no resistor é dada por

$$V_R(t) = i(t)R \quad (\text{G.2})$$

e no capacitor por

$$V_C(t) = \frac{q_C(t)}{C}. \quad (\text{G.3})$$

Substituindo as equações (G.2) e (G.3) na (G.1), temos

$$\varepsilon - i(t)R - \frac{q_C(t)}{C} = 0. \quad (\text{G.4})$$

A intensidade da corrente elétrica $i(t)$ pode ser expressa pela quantidade de carga elétrica que atravessa uma seção reta do resistor por unidade de tempo

$$i(t) = \frac{dq_R}{dt}. \quad (\text{G.5})$$

Pelo princípio de conservação de carga, temos que: se em um intervalo de tempo dt houve uma variação dq_C da quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor, nesse mesmo intervalo de tempo, uma quantidade de carga elétrica dq_R deve ter atravessado o resistor. Desta forma o módulo de dq_C é sempre igual ao de dq_R . Mas o sinal nem sempre é o mesmo, pois no processo de carga do capacitor a carga aumenta, ou seja, $dq_C > 0$, enquanto na descarga a carga diminui ($dq_C < 0$). No caso do resistor, se a lei das malhas for aplicada no sentido da intensidade da corrente elétrica, como feito aqui, dq_R será sempre positivo, independentemente da carga no capacitor estar aumentando ou diminuindo.

$$i) \quad dq_R = dq_C, \text{ processo de carga,} \quad (\text{G.6})$$

$$ii) \quad dq_R = -dq_C, \text{ processo de descarga.} \quad (\text{G.7})$$

Substituindo as equações (G.6) e (G.5) em (G.4) obtemos a equação diferencial que descreve o comportamento da quantidade de carga armazenada no capacitor

$$\varepsilon - \frac{dq_C(t)}{dt} R - \frac{q_C(t)}{C} = 0. \quad (\text{G.8})$$

Para resolver esta equação diferencial inicialmente reescrevemos da seguinte forma

$$\frac{dq_c(t)}{(q_c(t) - C\varepsilon)} = -\frac{1}{RC} dt. \quad (\text{G.9})$$

A seguir integramos os dois lados da equação (G.9). Para isto, no termo do lado esquerdo faremos a seguinte mudança de variável:

$$u = q_c(t) - C\varepsilon. \quad (\text{G.10})$$

Logo:

$$\int \frac{du}{u} = -\int \frac{1}{RC} dt$$

$$\ln(u) + A = -\frac{1}{RC}t + B$$

$$\ln(u) = -\frac{1}{RC}t + B - A, \text{ onde } A \text{ e } B \text{ são constantes de integração. } (\text{G.11})$$

Aplicando a exponencial em ambos os lados da equação (G.11), obtemos

$$u = e^{-\frac{1}{RC}t} e^{B-A} \quad (\text{G.12})$$

Substituindo a equação (G.10) em (G.12) e definindo $D = e^{B-A}$ finalmente encontramos a solução geral da equação (G.8)

$$q_c(t) = C\varepsilon + D e^{-\frac{1}{RC}t}. \quad (\text{G.13})$$

As soluções particulares dependem das condições iniciais. Para o problema em discussão, o capacitor está inicialmente descarregado. Então, com $q_c(t=0) = 0$ encontramos a constante de integração D:

$$\begin{aligned} q_c(t=0) &= C\varepsilon + D e^{-\frac{1}{RC}0} = 0 \\ C\varepsilon + D &= 0 \\ D &= -C\varepsilon \end{aligned} \quad (\text{G.14})$$

A solução particular é dada por:

$$q_c(t) = C\varepsilon \left(1 - e^{-\frac{1}{RC}t} \right). \quad (\text{G.15})$$

Esta equação descreve o comportamento da quantidade de carga elétrica armazenada em um capacitor durante o processo de carga em um circuito RC em função do tempo.

Processo de descarga de um capacitor

Para analisar o processo de descarga do capacitor vamos considerar que a chave interruptora do circuito mostrado na Figura G.1 encontra-se fechada em A por um tempo suficientemente longo – um tempo necessário para que o capacitor atinja sua carga máxima – e em $t = 0$ foi mudada para posição B. Aplicando a lei das malhas, percorrendo o circuito no sentido anti-horário a partir do ponto B, encontramos

$$\frac{q_C(t)}{C} - i(t)R = 0. \quad (\text{G.16})$$

A intensidade da corrente elétrica $i(t)$ pode ser expressa pela variação temporal da quantidade de carga elétrica que atravessa um plano hipotético que corta todo o resistor

$$\frac{q_C(t)}{C} - \frac{dq_R(t)}{dt} R = 0. \quad (\text{G.17})$$

Substituindo a equação (G.7) na (G.17) encontramos a equação diferencial que descreve o comportamento da quantidade de carga armazenada no capacitor

$$\frac{q_C(t)}{C} + \frac{dq_C(t)}{dt} R = 0. \quad (\text{G.18})$$

Resolvendo esta equação diferencial de primeira ordem de forma semelhante ao caso anterior (processo de carga) e aplicando a condição inicial $q(t = 0) = q_0$, obtém-se a equação que descreve o comportamento da quantidade de carga elétrica armazenada em um capacitor durante o processo de descarga em um circuito RC em função do tempo

$$q_C(t) = q_0 e^{-\frac{1}{RC}t}. \quad (\text{G.19})$$

Conhecendo o comportamento da quantidade de carga armazenada no capacitor durante os processos de carga e descarga podemos analisar também como variam no tempo a intensidade de corrente elétrica no circuito e as diferenças de potencial entre as placas do capacitor e entre os extremos do resistor, já que:

$$i(t) = \frac{dq_R(t)}{dt}; \quad (\text{G.20})$$

$$V_C = \frac{q_C(t)}{C}; \quad (\text{G.21})$$

$$V_R = i(t)R. \quad (\text{G.22})$$

APÊNDICE H

Neste apêndice transcrevemos literalmente as entrevistas semi-estruturadas realizadas na aula 16 do quarto estudo.

ALUNO 1

- 1) Considere os seguintes fatores:
- (a) uso de experimentos
 - (b) uso do computador
 - (c) trabalho em grupo
 - (d) interação com o professor

Ordene do mais importante ao menos importante para:

- | | | | | |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| • o seu aprendizado; | 1° (d) | 2° (a) | 3° (c) | 4° (b) |
| • a sua motivação para aprender; | 1° (d) | 2° (c) | 3° (a) | 4° (b) |
| • as suas dificuldades; | 1° (c) | 2° (a) | 3° (d) | 4° (b) |

“Bom, para o aprendizado mesmo é a interação com o professor. Acho que o A é o segundo o C trabalho em grupo é muito importante também e o uso do computador”.

[Motivação] “Acho que vai D de novo, interação com o professor, trabalho em grupo C, uso de experimentos e uso do computador”.

[Dificuldades] “Acho que o uso dos experimentos é muito importante, o trabalho em grupo acho que é o primeiro, experimento em segundo, bom, o uso do computador é muito fácil então acho que a interação com o professor e o uso do computador, tranquilo”.

- 1.1) Qual é a tua opinião sobre o papel do computador?

“Bom, que nem trabalhando com as linhas de campo não tem como a teoria experimental, mas acho que os caras conseguem visualizar bem também com o computador. Acho que é a simulação né, daí tu tem um resultado certo do que acontece. Mas eu acho que o experimento é mais importante ainda você tá manipulando com aquilo. Na aula sobre circuitos RC a gente fez no computador, claro que ajudou com certeza. É que primeiro era para dar ideias se a gente achava que dava e depois a gente ia para a simulação para ver se era isso mesmo. E depois para o experimento. Até nesse sentido o computador, nessa aula, ajudou muito mais que o experimento, eu acho”.

- 2) Comente um pouco sobre a integração entre as atividades experimentais e computacionais?

“Eu acho ótimo isso. Na Física 2 e Física 1 no laboratório o professor dava a “receitinha” ali e tal, estava tudo explicado. Era só fazer aquilo lá, não tinha muita ideia física. Era muita

conta, mas não era muita interpretação que nem agora. Não tinha tanta interpretação física como agora”.

“Ah, de repente nessa parte experimental com a teoria que junta ali, acho muito importante, acho que isso aí é bom, só que claro eu até tava conversando com meus colegas que muitas vezes ta na sala fazendo os experimentos e tal o senhor deixa a gente pensar no assunto bater a cabeça e tal, mas às vezes eu acho que é demais a gente ta perdendo muito tempo ali acho que, eu penso assim que poderia ser um pouco mais ligeiro tem muitas coisinhas ali que não entra na cabeça na hora, mas aí o professor vai no quadro mostra é isso aqui daí tu já ... ah, não, então é isso que acontece. Acho que em princípio tem que deixar o aluno pensar, pensar mesmo, aí ele vai te questionar e tal aí eu acho que se interessa mais pelo assunto”.

- 3) Qual sua opinião sobre atividades que exploram as diferenças entre um sistema real e um sistema ideal?

“Eu acho que é ótimo essa diferenciação entre um sistema real e um sistema ideal, porque estamos acostumados com uma situação ideal Pensei assim já várias vezes até que ponto a gente pode dizer que a situação é ideal, não só nos circuitos. No laboratório a gente faz limpeza dos substratos, mas logo depois da limpeza ele já está exposto, aí já tem a contaminação e tal. Até que ponto esse erro não interfere?”

- 4) Você tem mais algum fator que considera importante que queira falar?

“No primeiro momento eu fiquei assustado assim né. Eu, por exemplo, até achava bah, mas será essa disciplina aí, tô meio desconfiado porque eu tava num começo bem devagar né, nós estávamos vendo acho que era “duas cargas” e tinha outra turma que já tava vendo diferenças de potencial, mas agora já desandou, mas eu acho bem melhor os três aí, junto”.

ALUNO 2

- 1) Considere os seguintes fatores:

- (a) uso de experimentos
- (b) uso do computador
- (c) trabalho em grupo
- (d) interação com o professor

Ordene do mais importante ao menos importante para:

- | | | | | |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| • o seu aprendizado; | 1° (d) | 2° (c) | 3° (a) | 4° (b) |
| • a sua motivação para aprender; | 1° (d) | 2° (c) | 3° (a) | 4° (b) |
| • as suas dificuldades; | 1° (a) | 2° (b) | 3° (c) | 4° (d) |

“Na primeira aqui, no aprendizado, acho que o primeiro foi a interação com o professor, o segundo foi o trabalho em grupo, o terceiro uso de experimento e o quarto uso do computador”.

Na motivação: “a interação com o professor em primeiro, também trabalho em grupo em segundo, os experimentos em terceiro e o computador em quarto”.

“As dificuldades: eu acho que os experimentos em primeiro o computador em segundo umas coisas que ficaram meio assim. Quando tu vê o computador tu não entende muito direito né. Trabalho em grupo em terceiro e a interação com o professor em quarto”.

“Bah, eu no começo não me adaptei a trabalhar em aula exercícios coisa assim, mas depois com o tempo eu achei legal, tu receber o conteúdo naquele dia ali tu já começar a trabalhar naquilo ali pra não deixar pra fazer em casa depois tu não vai fazer nada. Eu não cheguei a terminar as aulas de laboratório no semestre passado, mas esse laboratório eu achei bem mais interessante. A interação com o grupo também foi bem mais interessante. O computador ali também”.

1.2) Qual é a tua opinião sobre o papel do computador?

“Ah, eu acho importante cara, eu acho que algumas idealizações que tem nos problemas, ali pelo computador tu pode ver bem direitinho tu não precisa fazer um experimento todo montar um experimento todo para resolver um problema ou para ter uma opinião sobre um problema... . Eu gostei bastante, esse último laboratório eu gostei mais por que não tinha tantos dados, era um negócio mais intuitivo chegava rápido ao objetivo do laboratório”.

2) Comente um pouco sobre a integração entre as atividades experimentais e computacionais?

“Eu gostei bastante porque tu pega um sistema idealizado no computador ali na pior no computador ali tudo dá certo daí depois tu bota uma prática ali e vê se acontece aquilo mesmo se é válido aquilo ali”.

“Eu não chamaria nem de motivação o computador dá uma base para compreender o que está acontecendo na parte real do experimento. Tu vê no computador. Aí vai olhar no livro por que está acontecendo assim? Aí já se tem uma base sobre o que está acontecendo para montar na prática o experimento”.

“Eu acho bacana principalmente no meu caso assim que não estava estudando muito para química eu estou fazendo duas cadeiras e tal como eu achei difícil e eu já tinha feito uma vez e não ia ter uma base melhor assim eu estudei menos no começo eu começava a me quebrar assim por que bah, isso é assim, isso é assim daí eu dava uma pesquisada na teoria dos livros daí depois quando fluía as ideias ali tal aí ia embora”.

“Eu acho assim no começo do experimento ele te dá um rumo assim pode ser um rumo certo ou errado só a realidade para te dizer”.

- 3) Qual sua opinião sobre atividades que exploram as diferenças entre um sistema real e um sistema ideal?

“Eu acho bastante legal porque na verdade a teoria que tu vê no livro é baseada em idealizações tu vai para o laboratório e começa a fazer os experimentos, coletar dados, e percebe o que está fechando com aquela fórmula, com aquela teoria e tal”.

- 4) Você tem mais algum fator que considera importante que queira falar?

“O laboratório foi bem interessante mesmo. Em relação em paralelo com o que fiz no semestre passado achei que ficou bem melhor”.

ALUNO 3

- 1) Considere os seguintes fatores:

- (a) uso de experimentos
- (b) uso do computador
- (c) trabalho em grupo
- (d) interação com o professor

Ordene do mais importante ao menos importante para:

- | | | | | |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| • o seu aprendizado; | 1° (b) | 2° (a) | 3° (c) | 4° (d) |
| • a sua motivação para aprender; | 1° (b) | 2° (a) | 3° (c) | 4° (d) |
| • as suas dificuldades; | 1° (c) | 2° (a) | 3° (d) | 4° (b) |

“O computador porque é uma ferramenta que ajuda bastante auxilia bastante, facilita o aprendizado. Pra visualizar é que o Modellus ajuda bastante o programa em si ajuda bastante.

É que alguns experimentos o computador é viável para outros não é muito viável, ele ajuda em alguns casos em alguns experimentos ele ajuda bastante, mas em outros o negócio é meio prático então é mais situação real né. Por exemplo, eu tava olhando ali um experimento que teve no computador, acho que foi circuitos RC que dava para você visualizar bem ali no computador você variava o que tinha que variar ali e percebia. Então naquela experiência foi bem válida. No caso de circuitos simples, aí não realmente só na prática”.

- 1.1) Sobre a experiência do campo magnético terrestre me chamou a atenção por que só no final da aula você percebeu as relações entre os campos?

“No princípio eu estava anotando o ângulo porque cada vez que eu variava a corrente o ângulo variava. Eu não sabia a relação até o momento, depois que você falou sobre as duas componentes aí é que eu me liguei no significado do ângulo”.

- 2) Comente um pouco sobre a integração entre as atividades experimentais e computacionais?

“No geral assim, o ideal que eu acho né, seria realmente dar a teoria primeiro para depois entrar na prática o que acontece é que as vezes a gente faz a prática sem ter visto a teoria ou pelo menos dar uma lida ali então o camarada fica meio perdido né, então isso é um problema. O laboratório talvez até desmotive algumas pessoas porque às vezes vamos para o laboratório sem conhecer o assunto, então a experiência fica um negócio mecanizado, sem entender o que está acontecendo, preocupado só em coletar dados para fazer o relatório. Teve um experimento que acho que o primeiro experimento não lembro qual foi. Teve um relatório que a gente fez depois da prova acho que foi sobre potencial, então ficou bem mais fácil de fazer o relatório então fica mais fácil fazer o relatório porque você já meio que estudou ali, conhece o assunto e quando você faz o laboratório você entende o que está fazendo e quando você vai fazer o relatório também né... . O computador junto com a teoria em alguns casos e ele junto com a prática mesmo em outros casos né. Por exemplo, a prática do laboratório sobre circuitos RC eu acho que só com o osciloscópio você já entende neste caso aí o computador foi desnecessário. Já no circuito RLC foi bem mais necessário”.

- 3) Qual sua opinião sobre atividades que exploram as diferenças entre um sistema real e um sistema ideal?

“É interessante também, às vezes tu tá muito bitolado a teoria muito bitolado a idealizações e as vezes a gente esquece do que acontece na prática ou não sabe o que acontece na prática né, porque as vezes o aluno está muito preocupado em saber a teoria certa para fazer uma boa prova e não se preocupa com a prática, então, as vezes não sabe ou não se preocupa muito com a prática”.

- 4) Você tem mais algum fator que considera importante que queira falar?

“Não”.

ALUNO 4

- 1) Considere os seguintes fatores:

- (a) uso de experimentos
- (b) uso do computador
- (c) trabalho em grupo
- (d) interação com o professor

Ordene do mais importante ao menos importante para:

- o seu aprendizado; 1° (d) 2° (c) 3° (a) 4° (b)
- a sua motivação para aprender; 1° (d) 2° (c) 3° (a) 4° (b)
- as suas dificuldades; 1° (a) 2° (b) 3° (c) 4° (d)

[Aprendizado] “Eu acho que o mais importante é a interação com o professor né. Depois trabalho em grupo, depois o uso de experimentos e por último o computador, o computador lá eu considero o último porque aquele Modellus eu não tenho muita familiaridade, aí me perco para mexer, mas acho muito importante também”.

“Eu tive umas dificuldades em algumas coisas que foram no laboratório, no caso experimentos. Teve dois laboratórios que eu fiquei meio perdido, aquele que a gente teve que mexer no osciloscópio, aí tinha que calcular lá. Eu não consegui mexer direito naquilo. Mas acho bem interessante, apesar de não ter muita familiaridade”.

2) Comente um pouco sobre a integração entre as atividades experimentais e computacionais?

“Eu to gostando, to achando melhor que Física I e II, com certeza, não tinha muito auxílio”.

“No caso considerando sempre que o aluno seja assim, sempre em dupla, eu acho bem interessante, até porque às vezes, por exemplo eu faço com o Aluno 3 né, eu sei que eu não sei muito Física o que tive no ensino médio foi fraco para caramba ou muitas coisas, por exemplo, eu nunca vi na vida e no colégio também, no cursinho eu vi corrido. Aí eu faço com o Aluno 3 que já era da Engenharia já fez Física I, II e III já tem uma boa base, aí eu acho interessante por causa disso. Sempre tem uns que sabem mais e uns que sabem menos. Eu fazendo em dupla, um auxiliando o outro, eu acho interessante. Muitas coisas tenho certeza que se eu fosse fazer sozinho, se não tivesse uma “canja”, eu ia trancar, daí isso é bom que já troca informação ali e já aprendo alguma coisa por tabela”.

“Acredito que seja também, por exemplo, o professor explica a teoria aí depois a gente vê como funciona na prática né. As vezes a gente, especialmente eu assim, algumas coisas que eu não entendia na teoria aí depois na prática aí agora sim eu entendia isso. Muitas coisas a gente não entende na teoria ou entende mais ou menos aí quando vai fazer o experimento daí sim consegue”.

2.1) Qual é a tua opinião sobre o papel do computador?

“Há colocar valores, alterar, ver como funciona tudo ali, tu mudar, fazer o que quiser com uma situação, poder ver o que está acontecendo, não fica restrito só a colocar no quadro e coloca os dados”.

“O computador vai ser válido para, por exemplo, melhorar uma situação que tu for ensinar o aluno, caso vocês, para ensinar ali, no caso, deixar uma situação mais facilitada para ensinar, aí depois se quiser fazer uma situação real aí sim”.

- 3) Qual sua opinião sobre atividades que exploram as diferenças entre um sistema real e um sistema ideal?

“Algumas coisas, por exemplo, que nem a gente tava vendo em circuitos são idealizadas né e tem algumas coisa também que não, algumas podem ser idealizadas e algumas também não, mas também dá para mudar né acredito que no computador pode fazer o que quiser né, colocar uma situação idealizada como uma não. Totalmente real eu acho que não”.

“Ah, eu acho bem interessante porque até então eu nunca tinha parado para pensar assim, estudava só pelo livro, o pessoal não leva isso muito em conta, real ideal”.

- 4) Você tem mais algum fator que considera importante que queira falar?

“Acho que está bem, bem interessante essa metodologia que vocês estão aplicando, principalmente assim de avaliar com exercícios, não é só específico uma prova, porque as vezes o cara estuda, estuda e chega na hora e não consegue desenvolver nada, no exercício o cara é obrigado a estudar e dá uma puxada mesmo não querendo, fica com aquilo assim, bah vale nota, se eu não fizer eu não vou aprender além de não aprender vai ser uma nota que eu não vou ter na final. Eu acho que essa questão assim é bem interessante sim e eu acho que essa parte instrumental também, o uso do computador é bem importante, eu to gostando”.

ALUNO 5

- 1) Considere os seguintes fatores:

- (a) uso de experimentos
- (b) uso do computador
- (c) trabalho em grupo
- (d) interação com o professor

Ordene do mais importante ao menos importante para:

- o seu aprendizado; 1° (d) 2° (a) 3° (c) 4° (a)
- a sua motivação para aprender; 1° (a) 2° (c) 3° (d) 4° (b)
- as suas dificuldades; 1° (a) 2° (d) 3° (b) 4° (c)

[Aprendizado] “A interação com o professor, eu particularmente aprendo mais com a exposição da matéria para depois poder complementar com a leitura do livro e ter duas visões: uma mais didática do professor normalmente e uma mais formal do livro, nem sempre é assim né. Eu acho que tendo duas visões da matéria facilita meu aprendizado eu coloquei isso como primeiro, entre essas atividades é a que mais me auxilia no aprendizado de conhecimentos novos. Eu coloquei em segundo trabalho em grupo, porque quando tem um grupo as coisas que a gente não sabe pode perguntar para alguém que explica de uma forma mais simples às vezes que o professor, mais próxima do nosso conhecimento e quando é a gente que explica a gente também ganha por estar repetindo a matéria e também porque quando a gente vai explicar alguma coisa tem que procurar abordar o que ta achando de todas as formas as vezes até acha que sabe bem, começa a explicar, aí aparece uma pergunta que não sabe responder e vai procurar respostas é o que mais ajuda no trabalho em grupo. Depois eu coloquei o uso do computador mais porque eu coloquei o uso dos experimentos

por último, não que não seja importante. É muito importante, mas no experimento eu acho que a gente aprende menos, por que a densidade idealizada é menor porque passamos muito tempo montando o experimento e como é limitado o tempo não chegamos a terminar o experimento. A gente fazendo toda a parte “frutivamente” como se a gente tivesse montando o experimento pela primeira vez, para buscar o conhecimento que sai dali. A gente mais reproduz e vê se acertou. Acaba mais aprendendo tendo prática de laboratório, de montar de resolver problema de montar um experimento de criar um sistema que corresponda a teoria mas não dá para criar um sistema em termos de o que vocês acham disto os resultados, acaba não tendo tempo, então por isso que eu coloquei por último o uso dos experimentos”.

“Aí na motivação eu já coloquei o uso dos experimentos primeiro porque o que mais motiva a pessoa é a forma concreta do conhecimento, então quando a gente vê o experimento funcionando ou vê uma explicação prática que a gente aprendeu, acho que motiva mais. O trabalho em grupo também é o que mais me motiva porque pela interação entre os alunos né, a proximidade de poder tirar dúvidas com os colegas e tirar as dúvidas dos colegas também. Daí eu coloquei depois a interação com o professor, quando tem um professor bom, motiva muito a aprender né, acaba estudando mais a matéria quando o professor é mais agradável que o outro. E coloquei por último o uso do computador porque para mim não motiva muito aprender o uso do computador. Eu acho interessante, mas eu acho que isso entra mais na cota do professor do que do computador, o computador tem as simulações que podem ser bonitas podem ser mais fidedignas com a teoria, por não ter erro prático ali pode desprezar totalmente o atrito, realmente a teoria, mas não motiva a aprender”.

“E as dificuldades eu interpretei como seria para resolver minhas dificuldades de aprendizado né. Eu coloquei que o uso de experimentos em primeiro de novo porque as minhas dificuldades particularmente são mais do ponto de vista prático mesmo. Corrente, magnetismo, diferença de potencial e até sabe da onde é que ela vem, sabe as fórmulas pode até saber dizer as fórmulas e muitas vezes não sabe qual é a aplicação prática disso então eu vendo o uso do experimento eu vejo que o que para mim parecia não passa de 5 amperes com 12 volts diferença de potencial, eu vejo que realmente se traduz numa lâmpada acendendo daí eu vejo que com 3 passos a lâmpada já não acendeu, me tiram a dúvida do que não está escrito no livro né, então por ser a única fonte de informação o experimento. Daí eu coloquei em segundo a interação com o professor que é a pessoa mais habilitada a tirar dúvidas né, aí depois eu coloquei o uso do computador porque alguns casos o computador mostra algumas faces diferentes da matéria como simulações, gráficos sendo gerados, o livro te proporciona o gráfico já impresso, o computador mostra a geração do gráfico”.

- 2) Comente um pouco sobre a integração entre as atividades experimentais e computacionais?

“Eu estou gostando, achei melhor que na Física 1 e Física 2 e pelo fato de que três professores trabalhando juntos, nas outras duas disciplinas quando eu passei o professor era o mesmo, laboratório e na prática, três professores trabalhando juntos dá a chance de tirar a mesma dúvida talvez três vezes, se a gente tiver, ou muitas vezes a gente, como aconteceu, eu tinha uma opinião o professor tinha outra e não tinha uma terceira para perguntar, aqui tem sempre três pessoas, normalmente o professor está sempre certo para poder me convencer mais facilmente, como eu tinha te falado eu acho esse lado muito bom e pelo lado do projeto sempre ta pelo fato de estar uma pessoa constante para a parte didática, acaba se aprimorando. A presença de um projeto de pesquisa de ensino, acaba aprimorando a qualidade das aulas porque nunca vai ser deixado de lado a parte didática; Às vezes em

outras disciplinas a parte didática é deixada de lado e o professor cumpre a tarefa de demonstrar teoremas pela matemática”.

“Eu acho que o computador é bastante útil, botando 70% das vezes que tá sendo usado é útil. Tem alguns casos que ele é muito mais útil que em outras, na aquela atividade que tinha dado um erro para nós, tinha dado um erro a gente gerou um gráfico errado, daí depois corrigindo aquilo ali a gente não teria percebido nosso erro experimental sem a ajuda da ferramenta do Excel, ferramenta básica da computação, para traçar um gráfico com precisão e para colocar todos os dados e fazer os cálculos já automaticamente a gente tava trabalhando com barra de erros né, e a gente ia gerar as fórmulas aproximadas também, se fosse feito a mão, então ali por exemplo o computador foi muito útil se não tivesse computador a gente ia ficar com impressão errada do resultado experimental que na verdade foi quase 100% de acordo com a teoria apesar das idealizações não influenciavam quase nada ali. A idealização dos fios e dos resistores não estava diferenciando praticamente nada da teoria com os valores apurados na prática e só foi possível ver isso com uso do computador para corrigir o nosso erro – era um erro de cálculo”.

“Eu acho que é bastante interessante o uso do computador nessas situações também, eu até acho não lembro direito em qual o dia que ficou meio confuso o uso da parte prática do computador intercalando os dois, eu acho que o ideal mesmo que tenha vantagens de intercalar temporalmente as duas atividades o ideal é dividir bem ou dependendo do objetivo ou primeiro mostra um modelo idealizado no computador e depois mostrar o modelo real ou faz o inverso, mas dividir bem até salientar o grande diferencial do computador que é mostrar o modelo idealizado na prática e comparar com o modelo real também na prática então acho que se for feito um modelo e depois o outro comparado, até depois foi perguntado sempre tem a pergunta clássica nos relatórios na parte de conclusão dos relatórios: Quais são os fatores que podem levar a erro. E sempre fica um negócio meio, ah esse é os fatores que podem levar a erro, mas que erro? Quanto de erro? É significativo? Pode ser olhado no computador inclusive mudando a programação do Modélus se usar simuladores, mudando as equações introduzindo fator de erro de 10%, 5% ou mesmo introduzindo fator de erro da variável à variável que seja, para ver se isso te é suficiente seria interessante se tiver tempo. Fazer a atividade prática e depois, via o modelo ideal, ver a diferença. Depois simular já colocando a resistência interna no modelo para ter três modelos: o real, o totalmente idealizado e o idealizado com nível de realidade que é a resistência interna da fonte, daí pode se observar o quanto da diferença entre o real e o idealizado se deve a resistência interna e quanto se deve a outros fatores”.

- 3) Qual sua opinião sobre atividades que exploram as diferenças entre um sistema real e um sistema ideal?

“Eu acho que sim, eu acho comparando com o modelo clássico é bem melhor, mas eu acho que dá para melhorar ainda, teve uma atividade aquela da caixa que tinha que adivinhar o que tinha dentro foi uma atividade assim que tangenciou o que eu acho que seria o ideal, mas não chegou lá por que eu sempre achei assim mesmo em Física 1 as atividades práticas poderiam ser colocadas hoje a gente quer verificar em Física 1 de que o período do pêndulo depende? Daí a gente chega na atividade que bah, a gente vai colocar o pêndulo aqui vamos medir o período, vamos medir a amplitude, vamos medir a variação da gravidade e vamos ver como é que isso vai dar. Daí isso aí já está tudo feito a gente chega lá e constata, eu acho que o ideal seria pelo menos talvez até na aula anterior de laboratório o professor dizer: na aula que vem a gente vai verificar o período do pêndulo vão pensando em casa não olhem no

livro, vão pensando em casa em um experimento que poderiam montar para verificar qual o período daí se desse o experimento, no dia seguinte cada um dissesse e pensa fazer se algumas das idéias fosse diferente da que está programada e fosse plausível ou fosse feita até essa idéia se todas as idéias não fossem plausíveis daí sim o professor dá a resposta: ta aqui o experimento é uma fórmula vocês viram como não é fácil chegar a conclusão que é este. Até para demonstrar porque as vezes acaba aparecendo um laboratório que a gente faz em termos de cada indício umas coisas assim a gente reproduz aqui e acha o resultado parece que é fácil até né, a gente já ta com o modelo pronto, a gente não tá descobrindo nada, o aluno poder tentar, construir o modelo então nesta da caixa surpresa nesta da caixa a gente realmente a gente definiu o que ia fazer só que a gente era muito limitado desconecta daqui, conecta dali tira esse plug daqui a gente tava relativamente limitados, mas é lógico daí é por causa do próprio modelo do laboratório, aquele dia daí a gente descobriu mas poderia se ter outras formas outros laboratórios onde a gente pensasse o que fazer a gente escolhesse o que fazer. O ideal é o aluno escolher o que fazer para desenvolver a cognição e a capacidade de resolver problemas práticos de laboratório pois sempre dá um erro e tem que achar uma solução”.

“Por isso que eu falei que o ideal é pedir numa aula anterior porque lógico se chegar com uma coisa que não seja fácil demais vai demandar tempo pensando, se ficarem pensando no laboratório vai terminar o laboratório aí vamos supor, vai chegar o final do laboratório chegou ao pensamento de que não é isso o que tem que fazer ta, mas agora acabou o laboratório vamos para a casa vai ser um laboratório de pensamento não prático, então eu acho que o ideal seria colocar assim oh, na aula que vem venham com idéias de experimentos pra medir a massa da terra”.

4) Você tem mais algum fator que considera importante que queira falar?
 “Não”.

ALUNO 6

1) Considere os seguintes fatores:

- (a) uso de experimentos
- (b) uso do computador
- (c) trabalho em grupo
- (d) interação com o professor

Ordene do mais importante ao menos importante para:

- o seu aprendizado; 1° (d) 2° (c) 3° (b) 4° (a)
- a sua motivação para aprender; 1° (b) 2° (d) 3° (a) 4° (c)
- as suas dificuldades; 1° (b) 2° (a) 3° () 4° ()

“Eu acho que o trabalho em grupo e a interação com os professores juntos formam uma coisa forte, não sei dizer qual seria o mais importante. No trabalho em grupo tu ta pensando em como resolver um problema aí tu tem teu colega aí chegou ao limite de cada um, fala o

que ta precisando aí os dois aumentam um pouquinho mais, mas não chegou trabalha mais a mente aí precisa do professor. Até comentamos quando estávamos indo embora que a gente anda pensando muito, esse trabalho é diferente, dinâmico faz a gente, pensar, pensar, pensar. Eu coloco B uso do computador porque foi o que mais nós trabalhamos, mais com o computador do que com o experimento talvez não só porque o computador ensina mais, mas porque nós tivemos mais aulas no computador do que o experimento, então me acrescentou mais foi o uso do computador. Eu prefiro o experimento e o computador para a gente enxergar as coisas”.

[Motivação] “Em primeiro lugar ta o uso do computador, a gente quer, já que a gente vai ter essa aula quinta feira que vai ter o computador a gente quer uma coisa que geralmente a gente não enxergaria. O uso do computador vai mostrar uma coisa que eu não ia ver, depois interação com o professor porque as minhas aulas de quinta-feira a gente tá bem próximo, o professor tá sempre em volta falando e explicando. Na aula a gente sente um pouco menos a vontade de sair perguntando não que isso deveria acontecer, mas acaba acontecendo. Experimentos e por último o trabalho em grupo, não chega ser uma motivação, mas ajuda muito entender e interagir com o colega”.

[Dificuldades] “Não sei ordenar” – PERGUNTA: desses quatro fatores algum tu teve mais dificuldades? “Pois é os experimentos foi tudo legal. Demorei um pouco para entender como montar o circuito, mas depois caiu a ficha, eu acho que minha maior dificuldade foi o uso do computador mesmo, pois sempre que eu colocava alguma coisa o computador mostrava outra, depois estudei mais. Eu no começo fiquei desconfiado com o computador, mas aí estudei mais porque deu tudo errado aí fiquei mais motivado”.

1.1) Para o teu aprendizado qual foi o papel do computador?

“O computador ajuda a entender como as coisas funcionam no experimento, a visualização. As linhas de campo tudo aquilo da lei de Gauss e tudo mais, mas eu aprendi muito, a gente montava o circuito e tinha o osciloscópio aquilo foi muito bom, mais que o computador... ..o osciloscópio ta ligado diretamente ao circuito. Entre a teoria e o experimento”.

2) Comente um pouco sobre a integração entre as atividades experimentais e computacionais?

“Isso ajuda o cara eu não sei dizer como. Ajuda muito, eu só não sei dizer como. Sim, sim. Eu acho muito bom eu aprendi muito nessas aulas porque eu tinha uma base fraca nessa parte de circuitos e foi muito bom foi um complemento para a parte teórica. Foi bem o que o Ives falou no começo, uma coisa leva a outra e pra mim foi bem o que aconteceu, as aulas integradas... . O professor é um só ele fala uma vez para todo mundo ali né. O porquê ele tá fazendo aquela medida aí um aluno não entendeu aí aquele aluno vai ao computador mais próximo dele para rever o que o professor passou. Para a gente entender e ter uma visão melhor porque ta medindo”.

3) Qual sua opinião sobre atividades que exploram as diferenças entre um sistema real e um sistema ideal?

“É bom para gente não ter esta visão errada de que dá sempre certo na teoria. É bem esclarecedor”.

4) Você tem mais algum fator que considera importante que queira falar?

“Não”.

APÊNDICE I

Neste apêndice apresentamos o guia que os alunos receberam para desenvolver a atividade AC sobre força magnética, no quarto estudo¹.

AULA 17: FORÇA MAGNÉTICA

Na Figura I.1 três circuitos elétricos simples são desenhados em perspectiva.

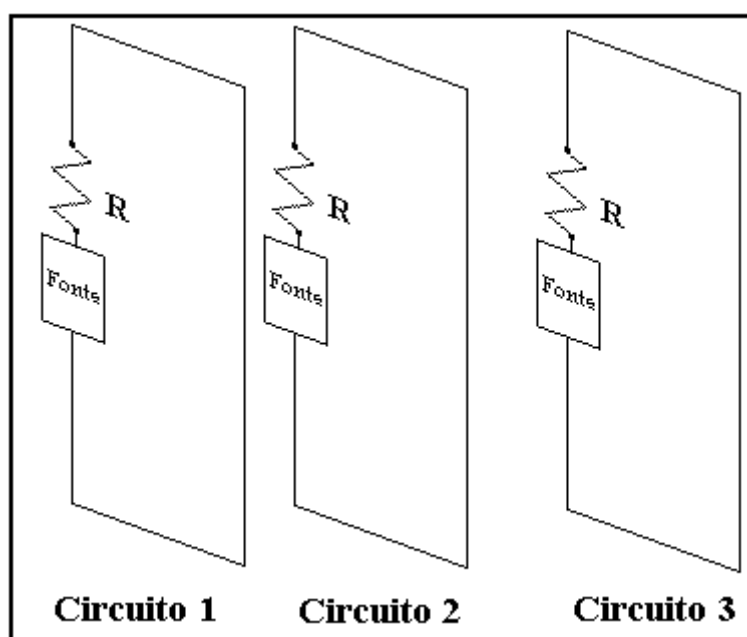


Figura I.1 – Circuitos elétricos simples em perspectiva.

Questões

- 1) Na janela Animação 1 (Figura I.2) é mostrada uma vista frontal dos três circuitos. Com base na Figura I.2 faça uma previsão qualitativa sobre os possíveis sentidos das correntes elétricas em cada circuito.
- 2) Execute o modelo computacional e justifique com argumentação física as convergências e divergências entre o que foi previsto inicialmente e o que efetivamente foi observado. Você pode alterar o módulo das intensidades de corrente elétrica, a posição e o comprimento de cada fio elétrico através das barras de rolagem.

¹ O modelo computacional está disponível em: http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/circuitos/estudo_IV_atividades_computacionais_pl.zip Acesso em 20 fev. 2010. O modelo encontra-se protegido pela senha “m”, para desproteger o modelo Arquivo => Senha.

3) O que acontece com a força magnética em cada fio ao afastar (aproximar) o terceiro fio? Explique porque isso acontece.

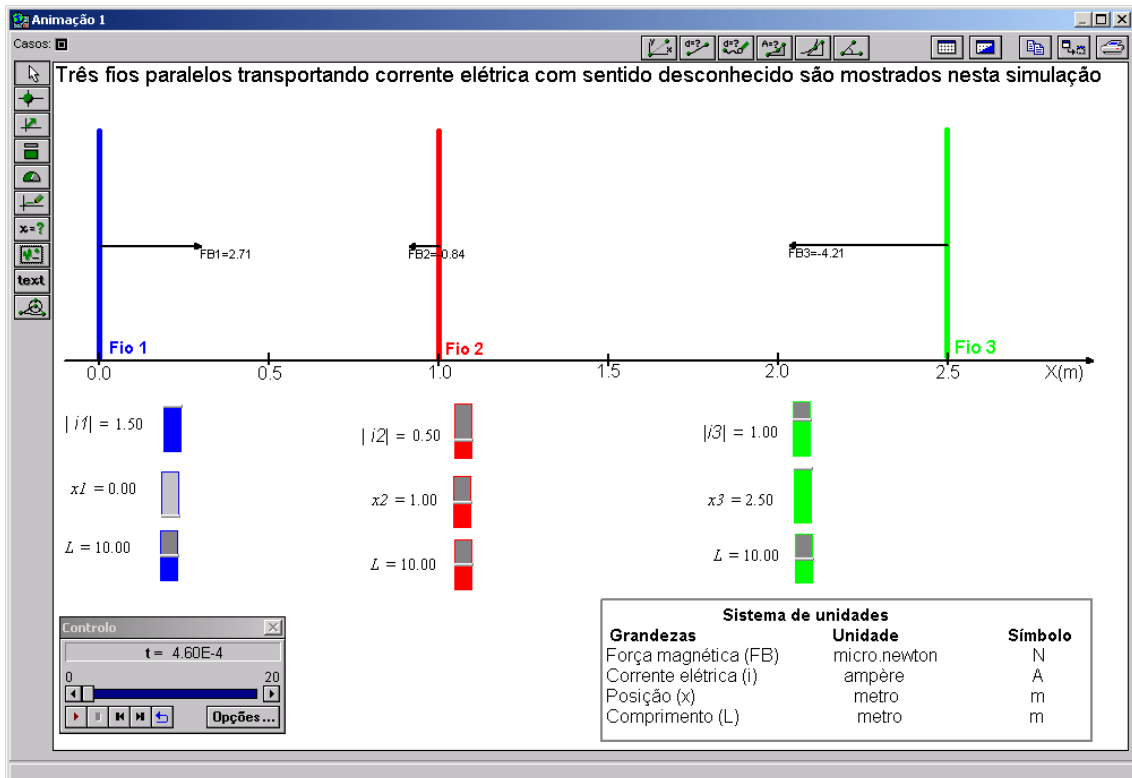


Figura I.2 – Figura ilustrativa da simulação sobre força magnética (modelo *fios_eletricos.mdl*).

APÊNDICE J

Na Tabela J.1, apresentamos as respostas das questões dissertativas respondidas pelos alunos ao final da disciplina, no quarto estudo. O aluno 6 não respondeu às questões.

Tabela J.1 – Questões dissertativas respondidas ao final da disciplina.

Questões	Aluno 1	Aluno 2	Aluno 3	Aluno 4	Aluno 5
Como se dá o progresso do conhecimento científico?	<i>“Através do incentivo a pesquisa, a força de vontade dos professores em animarem e mostrarem os caminhos da ciência”.</i>	<i>“Através de hipóteses científicas tanto teóricas quanto experimentais”.</i>	<i>“Através de estudos teóricos e práticos, hipóteses e modelos”.</i>	<i>“Acredito que em primeiro ocorre a abstração sobre o fenômeno cuja teoria está se buscando. Então, formulam-se as hipóteses embasadas em experimentação – geralmente com a matemática de ferramenta, então, logo que se comprova a hipótese com a experimentação formula-se a teoria”.</i>	<i>“Dá-se por meio do acúmulo de conhecimento especialmente aquele de origem empírica ou experimental, em contraponto com o que ocorre em outras áreas do conhecimento humano, onde grande parte da produção intelectual é dada “a priori””.</i>
Qual o papel da experimentação em Física?	<i>“Fazer e visualizar experimentalmente o que é visto na teoria. Mostrar principalmente o que é real e o que é o ideal na hora da experimentação”.</i>	<i>“Possibilita a verificação de hipóteses teóricas. Se uma hipótese é compatível com os resultados experimentais de experiências realizadas”.</i>	<i>“Poder comparar os resultados teóricos com os práticos. Muitas vezes para se chegar numa teoria e em outros casos para verificar a teoria”.</i>	<i>“O papel da experimentação é validar a teoria, levando em conta uma situação real; não idealizada”.</i>	<i>“No caso particular das ciências, entendidas nesse contexto como as ciências naturais, o processo de acumulação de conhecimento evolui historicamente em direção ao experimentalismo, o que resulta em um inequívoco aumento na produção científica. De uma atitude contemplativa de fenômeno, o homem passou a uma atitude interacionista, realizando experimentos, tendo em vista validar as hipóteses que desenvolvia para os experimentos observados. O valor do método experimental (método científico) fica evidente ao verificar os resultados obtidos por meio deste. Este sucesso baseia-se na objetividade, reprodutividade de resultados e sistematização, algumas das principais características da ciência experimental”.</i>

Continua ...

Questões	Aluno 1	Aluno 2	Aluno 3	Aluno 4	Aluno 5
Qual o papel de modelos teóricos em Física?	<i>“Pode ser útil para a experimentação e aproximações reais, sendo esse o principal papel”.</i>	<i>“Elucidar o comportamento de sistemas idealizados”.</i>	<i>“Serve como base para inícios de experiências para saber como vai iniciar a prática. Mas muitas vezes a teoria é bem diferente da prática, pois na teoria existe muitas vezes uma aproximação para que os valores fiquem “elegantes.” O modelo teórico despreza alguns dados”.</i>	<i>“Modelos teóricos possuem o papel de apresentar uma explicação plausível de alguma investigação científica. No entanto, um modelo teórico pode ser alterado; principalmente quando este modelo ainda não está bem aceito no meio científico”.</i>	<i>“O produto acabado da elaboração intelectual que consiste em observação, hipótese, experimento e teoria. Este modelo, quando testado por diversos pesquisadores independentes e aceito por grande parte do meio científico tornam-se “leis”, ou seja, a aplicação vigente para um fenômeno em uma determinada época. No entanto, modelo teórico que são refutados servem como base para desenvolvimento de novas hipóteses, alimentando um ciclo de produção de conhecimento”.</i>
Qual o papel do uso do computador em Física?	<i>“Ajudar na visualização de experimentos, dando muitas vezes idéias de como se dá alguns funcionamento s físicos que na verdade não são vistos, são abstratos”.</i>	<i>“No computador pode se visualizar algumas idealizações que tem nos problemas, não precisa montar um experimento para resolver um problema”.</i>	<i>“O computador é uma ferramenta boa para o aprendizado de Física, mas em alguns casos pode ser indispensável. Existe situações em que podemos trabalhar tranquilamente sem os computadores”.</i>	<i>“Com o computador pode-se analisar situações idealizadas e, basicamente, não idealizadas. Com ele é possível uma visão mais apurada do que está se estudando. Pois é possível analisar fenômenos, concomitantemente, com análises gráficas (instantaneamente) e variações nas situações cujo estudo está dirigido. Ou seja seu papel facilita muito o aprendizado”.</i>	<i>“O processo de ensino aprendizagem de física é tradicionalmente dividido em parte experimental e parte teórica. Na parte experimental pretende-se que o aluno conheça, compreenda e se habilite a executar as tarefas do método científico. Neste contexto, o computador é uma ferramenta útil ao propiciar ao aluno a possibilidade de verificar a compatibilidade e a diferença entre o modelo teórico (que pode ser reproduzido com recurso computacional) e o experimento realizado pelo aluno. O computador também pode servir como ferramenta na sistematização e análise de dados obtidos experimentalmente possibilitando um maior número de variáveis, maior grau de precisão e maior volume anotável, comparado ao que seria possível sem recurso computacional”.</i>

APÊNDICE K

Neste apêndice apresentamos as questões de prova que utilizamos para avaliar a aprendizagem conceitual dos alunos, no quarto estudo, sobre os conceitos de resistência elétrica em circuitos simples (questão 1) e força eletromotriz induzida (questão 2).

Questões

- 1) No circuito mostrado na Figura K.1, L_1 e L_2 são duas lâmpadas idênticas que possuem uma resistência elétrica R_L , a bateria é real e o resistor R é ôhmico. Quando os interruptores estão nas posições A e C, ao fechar o interruptor A-B, (a) o que acontecerá com o brilho de L_1 , considere $R_L \gg r$? (b) este comportamento é semelhante ao que aconteceria se fosse fechado o interruptor C-D em vez do interruptor A-B, considere que R é da mesma ordem de grandeza de r ? Justifique suas respostas com argumentação física.

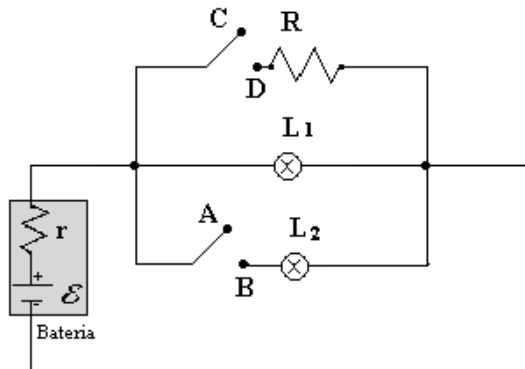


Figura K.1 – Associação de resistores em paralelo com fonte real.

- 2) Escreva a Lei de Faraday-Lenz na sua forma integral, interprete-a fisicamente e fale sobre ela, isto é, diga tudo o que puder sobre essa lei. Exemplifique sua explicação, discuta o seu significado físico, faça uso de desenhos ou diagramas se necessário.

ANEXO A

Este anexo é constituído das principais publicações desta tese, começando com a transcrição de um artigo aceito para publicação na Revista Electronica de Ensenanza de las Ciencias.

A study about the learning of students who worked with computational modeling and simulation in the study of simple electric circuits¹

Pedro F. T. Dorneles, Eliane A. Veit, Marco A. Moreira

Physics Institute – UFRGS – Caixa Postal, 15051 - Campus do Vale. 91501-970, Porto Alegre, RS – Brazil. E-mail: pdorneles@if.ufrgs.br

Abstract: The purpose of this research was to investigate the learning of students who worked with computational modeling and simulation using the software *Modellus* in the study of simple electric circuits. The theoretical framework was based on Ausubel's theory of meaningful learning and Halloun's schematic modeling approach. The quantitative results show that there were statistically significant differences in the performance of students who worked with the computational activities (experimental group), when compared to the one in which students were just exposed to a traditional method of teaching (control group). The qualitative results suggest that many students from the experimental group seemed to have achieved meaningful learning, and the students' interaction among themselves and with the teacher as well during the computational activities has strongly contributed for that.

Keywords: computational simulation, computational modeling, learning difficulties, simple electric circuits, physics teaching.

Introduction

It is common sense, nowadays, that engagement and interactivity are decisive factors to learning. The studies of Beichner (1990), Redish and Wilson (1993), Hodson (1994), and Beichner and Saul (2003), for example, show that active participation in classes and interactivity with instructional materials are key-points for the students' learning. According to Beichner and Saul (op. cit.), an active learning environment provides more favorable conditions for students to acquire a better conceptual understanding and to become more skillful in the resolution of physics problems.

In the teaching of simple circuits, which is the object of this research, the most traditional way of fostering engagement and interactivity comprises the development of experimental activities that take into account the students' previous knowledge (e.g., Shaffer and McDermott, 1992), and, more recently, computational simulation activities, aiming at an integration between theory and reality (e.g., Ronen & Eliahu, 2000). The drawing of concept maps and V diagrams (Novak & Gowin, 1984; Moreira, 2006) are some of other instructional techniques applied to promote interactivity. This study is in agreement with the line of studies of Ronen and Eliahu (2000) to which computational modeling activities were added.

To help students overcome learning difficulties in simple electric circuits as reported in the literature, we designed a set of computational simulation and modeling activities using the software *Modellus* (Teodoro, Vieira & Clérigo, 2008) that requires constant interaction of the students with computational resources to answer the questions proposed to them in printed guides. Many of the questions aim at generating students' reflections about their own conceptions and reasoning, providing them with more adequate conditions for meaningful learning in the sense proposed by Ausubel (2000). In our proposal, we promote the engagement and active participation of the student in the suggested activities through the use of a collaborative method, in which the teacher presents the most general ideas of the subject matter in an introductory explanation, typically of 30 to 40 minutes, out of a 1h40min total period, to be progressively differentiated in terms of details and specificities. After the introductory lecture, the students, in small groups of 2 to 3 partners engage in computational activities. For each group there is one PC and the accomplished tasks are handed in by the end of each class for formative evaluation purposes. With the requirement of handing in just one copy per group, we expect to promote the negotiation of meanings among the students, who are committed to finding a solution that complies with the ideas of all members of the group. The small and large group discussions favor students' interaction among themselves and with the teacher, who acts as mediator in the interaction between computer and learner and in the internalization of meanings by the learner (Vygotsky, 2003). Reflection, interaction, and engagement are encouraged with the use of a method we can call PIE – Predict, Interact, Explain – adapted from the POE method – Predict, Observe, Explain – proposed by White and Gunstone (*apud* Tao & Gustone, 1999), which consists of describing problem-situations in physics, or of presenting them through visual demonstrations, video projections or, as discussed here, computational simulations so as to help students *predict* what might happen. Then, opportunity is given to them to *interact* with the computational resource in order to generate results and evaluate what can effectively happen and, finally, to *explain* the differences and similarities between their ideas and the scientific solutions already accepted for the problem-situation at issue.

The instructional material developed here was applied in a course of Electromagnetism to Engineering students offered by the Physics Department of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Brazil, during the second semester of 2004. Here, we describe the findings of this study.

Computational simulation and modeling with software *Modellus*

In the literature, acceptance attributed to activities of computational simulation and modeling is not common sense. As a set of criteria to distinguish these two types of activities we used the level of access students have to the most basic elements that constitute a computational model. To our understanding, in *computational simulation* activities, the student has autonomy to assign initial values to the variables, to change parameters, but he/she does not have autonomy to modify the core of the computational model, that is, the access to its most basic elements, mathematical or iconical. In *computational modeling* activities, in addition to being able to

act upon the parameters and initial values, the student has access to such basic elements. Computational modeling activities are usually classified in two ways: *exploratory* and *expressive* (or creative). In the exploratory activities, the individual works with computational versions of scientific models and representations (graphs, animations, tables, diagrams) developed by other people and then they explore them through the most diverse perspectives. In the expressive activities, the individual designs his/her own computational models and creates ways to represent them.

Among the many computational tools available (*Interactive Physics*, *Java applets*, *Stella*, *PowerSim*, *Modellus*, etc.), we selected the software *Modellus* (Teodoro, Vieira & Clérgio, 2008), because with this software it is possible to propose both types of activities (simulation and modeling) and both ways of interaction of students with the computational model (exploratory and expressive). Besides, *Modellus* has an intuitive interface that facilitates the interaction of students with computational models in real time allowing them the observation of multiple conceptual experiments simultaneously.

Nowadays *Modellus* has started being very much used in teaching activities (e.g., Teodoro, 2008, *Advancing Physics*, 2004), however, in literature, studies that systematically look for the benefits of using such tool in relation to students' learning are scarce. Araujo, Veit & Moreira (2008) carried out a study about the use of computational simulation and modeling activities with *Modellus* presented in the form of problem-situations as an instructional complement in the teaching of kinematics graphs. This research involved two groups of students (experimental and control groups) who had already been exposed to formal instruction in kinematics and it was developed as an extra-class course. An adaptation to Portuguese of the "Test of Understanding Graphs in Kinematics" TUG-K (Beichner, 1994) was used to evaluate the conceptual understanding of the students; results show that there were statistically significant improvements in the performance of the students of the experimental group, when compared to the control group exposed to a traditional method of instruction. This finding suggested that the use of computational activities could improve the students' ability to understand kinematics graphs. An important aspect was that the students presented more willingness to learn because during the interactions with the computational models they realized the relevance of some mathematical relations and physics concepts, and the concepts that had previously seemed abstract became more familiar and concrete. These results encouraged us to carry out the present research, which differs from the former one by Araujo, Veit & Moreira (2008) in terms of the physics content and for having been developed during class periods of a regular discipline of the Engineering course, that typically is attended by 40 students per class.

Learning difficulties in simple electric circuits

Electricity is one of the areas of physics most studied in terms of learning difficulties. A significant part of these studies refers to the teaching of simple electric circuits and, according to these studies, students even after formal instruction are not able to analyze and predict the behavior of physics magnitudes involved in such circuits. In our literature review (Dorneles, 2005) we included the main journals on physics teaching, from

1985 to 2005 in which we found 44 publications about learning difficulties of simple electric circuits, and among those, we point out three: McDermott and Shaffer (1992), Duit & Von Rhöneck (1998) and Englehardt & Beichner (2004).

MacDermott & Shaffer (1992) carried out a systematic longitudinal study to identify students' difficulties in the learning of simple electric circuits. It involved students who had never had physics classes before, students who had completed a specialization course or had already teaching experience, together with two large groups of college students enrolled in the introductory courses of Calculus and Algebra. Results indicate that conceptual difficulties and misconceptions presented by the students as they analyzed an electric circuit seem to vary in difficulty and frequency. It was detected that with formal instruction some difficulties tend to disappear, while others may persist indefinitely and hinder students' learning of more advanced topics. McDermott & Shaffer (op. cit.) classify mistakes made by students during the study of simple electric circuits into three categories: inability to apply formal concepts to electric circuits; inability to use and interpret formal representations of an electric circuit; and inability to qualitatively argue about the behavior of an electric circuit. In a second study (Shaffer & McDermott, 1992), a tutorial was developed based on laboratory instructional strategies to help students overcome their difficulties. This tutorial was tested, modified and reviewed through continuous evaluation based on experiments carried out in the classroom. Its efficacy was compared to traditional teaching in a study involving 600 university students. Results seemed to show significant differences in the conceptual understanding of the students who had used the tutorial compared to the ones exposed only to traditional teaching. In both cases, students able to solve the quantitative problems were often unable of conceptually analyze the same electric circuit, whereas students of the tutorial classes solved substantially better all the qualitative problems proposed. The tutorial materials also seemed to be more effective for overcoming some misconceptions. We point out the relevance of these studies (Shaffer & McDermott) because besides contributing with the identification of main learning difficulties, they also helped verify how students progressed along the study of electric circuits, as well as presenting a pedagogical proposal for helping overcome those hindrances.

Duit & Von Rhöneck (1998) presented a synthesis of research results that show before and after instruction conceptions in the domain of electricity. They emphasized the teaching of simple electric circuits and identified the role of students' pre-instructional conceptions in the teaching/learning process, while distinguishing between misconceptions and the conceptions that serve as a basis for the students' development of an adequate understanding. The students' learning difficulties in the field of electricity serve as example for Duit & Von Rhöneck (op. cit.) to point out the importance of students' pre-instructional conceptions in the learning of physics.

Engelhardt & Beichner (2004) developed a multiple choice test with 29 questions to detect and interpret concepts about direct current resistive electric circuits (DIRECT – Determining and Interpreting Resistive Electric Circuit Concepts Test), that has been used with hundreds of students of

secondary and university levels in the United States and Canada. There are two versions, the first (version 1.0) was applied to 1135 students and the second (version 1.1), to 695. The results show that both versions may be useful in the evaluation of curriculum or instructional materials. Version 1.0 is more qualitative, seeming more adequate to identify misconceptions, while version 1.1 is more quantitative, seemingly more adequate to identify students' mathematical skills. Many of the difficulties identified by Engelhardt & Beichner (op. cit.) with the application of the two versions of the DIRECT test are similar to the ones identified in the studies of McDermott & Shaffer (1992) and of Duit & Von Rhöneck (1998).

Learning difficulties presented in these three studies may be classified as conceptual difficulties, misconceptions and indiscriminate use of mistaken language and reasoning. Table 1 presents a synthesis of the difficulties of specific nature related to the concepts of electric current, potential difference and electric resistance, and the main misconceptions derived from these references.

The indiscriminate use of language is considered a hindrance to learning because the meanings associated to physics concepts by the students are frequently different from those that a physicist attributes to the same concept. For example, the meanings attributed to the concept of electric current in everyday language include a broad range of meanings about energy quite different from those scientifically accepted for this physics concept. The mistakes in a physics class, consequently, are common, and even more frequent if the teacher is not aware of the difference between his/her own context and the one of the students when talking about electric phenomena (Duit & Rhöneck, 1998, Pacca, Fukui & Bueno et al, 2003).

The students who presented faulty reasoning in the study of simple electric circuits seem to tend to develop sequential or local reasoning instead of a systemic one. According to McDermott & Shaffer (1992), students who present sequential reasoning analyze a circuit in terms of "before" and "after" the flow of an electric current, that is, they recognize that a change in the "beginning" of the circuit influences the subsequent elements, although they consider that a change at the "end" of the circuit does not influence "former" elements. The students who present local reasoning focus their attention on a point of the circuit as they ignore the rest of the electric circuit. For example, when analyzing the electric current divisions at a point of the junction (current divisor) of a circuit containing many parallel branches, students seem to despise what exists in each branch and consider that the electric current divides itself into equal parts in each branch of the circuit (Duit & Rhöneck, 1998).

Another difficulty often reported in the literature, especially in studies that involve secondary students, is the inability to apply the concept of complete circuit. For example, many students are not able to turn on a light bulb with a battery and one single electric wire, since they do not consider that a light bulb has two terminals (bornes) for establishing a connection (Arnold, Middle & Millar, 1987; Sanchez & Sánchez, 1989; McDermott & Shaffer, 1992; Shepardson & Moje, 1994; Benseghir & Closset, 1996; Chambers & André, 1997; Shepardson & Moje, 1999; Sencar & Eryilmaz, 2004; Chiu & Lin, 2005).

Conceptual difficulties	Misconceptions: The students...
Electric current	
<ol style="list-style-type: none"> 1. To consider the conservation of the electric current. 2. To understand that intensity of an electric current in a circuit depends on characteristics of the source, but also on the equivalent resistance of what has been coupled between their terminals. 3. To recognize that the intensity of the electric current does not depend on the order in which the elements in the electric circuits are found, or on the direction of the current. 	<ol style="list-style-type: none"> a) ... think that the current is consumed passing through an electric resistance (1-3). b) ... think that the battery is a source of constant electric current (1-3). c) ... believe that the order of the elements in the circuit and the direction of the electric current are relevant (1-3). d) ... think that the source provides the charge carriers responsible for the electric current in the circuit. (3).
Electric resistance	
<ol style="list-style-type: none"> 1. To distinguish equivalent resistance of part of a circuit and the electric resistance of an individual element. 2. To realize that the equivalent resistance is a useful abstraction for obtaining the total current or the potential difference in part of a circuit. 3. To understand that the electric current divisions at a junction point of the circuit depend on the circuit configuration. 4. To understand the serial association of resistors as a hindrance to current flow; and the association in parallel as an alternative for the current flow. 5. To identify associations in series and in parallel. 	<ol style="list-style-type: none"> e) ... often think of the equivalent resistance of the circuit as if were a property of an individual element of the circuit (1). f) ...when determining how the electric current divides itself into parallel branches of a circuit, consider only the number of branches and not the relative electric resistances of the various branches. (1-3). g) ... think that if a resistor reduces the current by x, two resistors will reduce it by $2x$, independently of the resistors' configuration (3) h) ... consider that resistors aligned geometrically in series are associated in series either if there is a junction or not between them; and that resistors aligned geometrically in parallel are associated in parallel even if there is a battery in the branch.
Potential difference	
<ol style="list-style-type: none"> 1. To differentiate the concepts of potential difference and of electric current. 2. To differentiate the concepts of potential difference and of electric potential. 	<ol style="list-style-type: none"> i) ... think about the battery as a constant source of electric current and not as a source of constant potential difference (1-3). j) ... understand the potential difference as a property of the electric current (3).

Conceptual difficulties	Misconceptions: The students...
Potential difference	
3. To recognize that an ideal battery maintains a constant potential difference between its terminals. 4. To calculate the potential difference between pairs of points along the circuit.	<i>k)</i> ... consider that the potential difference between pairs of points along the circuit remains constant. (1). <i>l)</i> ... associate brightness of a light bulb to the potential value of one of the terminals of the bulb. (2).

Table 1 - Synthesis of the conceptual difficulties and alternative conceptions identified in the third column by (1) Duit & Von Rhöneck (1998), (2) McDermott & Shaffer (1992) and (3) Engelhardt & Beichner (2004).

Table 2 presents the other studies found in our literature review (Dorneles, 2005) and the main conceptual difficulties, misconceptions and mistaken reasoning found or mentioned in each study.

Theoretical framework

The theoretical framework of this research is anchored in Ausubel's (1978; 2000) theory of meaningful learning and in Halloun's schematic modeling approach (Halloun, 1996). From Ausubel we took into account the role of previous knowledge, progressive differentiation, integrative reconciliation, and conditions for the occurrence of meaningful learning. Ausubel's theory is a constructivist cognitive theory directed to learning the way it happens in the classroom, everyday in most schools. To Ausubel (1978, p.iv), *"The most important single factor influencing learning is what the learner already knows. Ascertain this and teach him accordingly"*. New concepts may be learned and retained as relevant and inclusive concepts are adequately clear and available in the cognitive structure of the individual serving as anchorage to new ideas and concepts. Progressive differentiation and integrative reconciliation are two programmatic principles that refer to classroom dynamics. Progressive differentiation is the principle according to which the most generic and inclusive ideas of the teaching topic should be presented at the beginning of teaching and then they can be progressively differentiated in their details and specificities. Ausubel, according to Moreira (2006) places at the basis of his theory two hypotheses: i) it is easier for human beings to grasp different aspects of a more inclusive whole that has been previously learned; ii) the organization of the content of a given discipline, in the mind of an individual, has a hierarchical structure in which the most inclusive and comprehensive ideas are at the top, and it progressively incorporates less inclusive and more differentiated propositions, concepts and facts. Integrative reconciliation, on the other hand, is the principle according to which teaching should explore relationships between/among ideas, pointing out important similarities and differences while reconciling real or apparent discrepancies, in opposition to the usual textbook practice that separates ideas and topics into chapters and sections. To Ausubel (2000), there are two conditions for meaningful learning to happen: i) the material must be potentially meaningful, that is,

the content to be studied must be relatable to the students' cognitive structure in a non-arbitrary and non-verbatim way; ii) the students must have willingness to relate the new potentially meaningful material in a substantive and non-arbitrary way to their cognitive structure.

Studies	Conceptual difficulty	Alternative conception	Reasoning	
			Local	Sequential
Andrés (1990)	2.1	-	-	-
Axt & Alves (1994)	1.1	-	-	-
Barbosa, Paulo & Rinaldi (1999)	1.1	a)	-	x
Carter, Westbrook & Thompkins (1999)	1.1	a)	-	-
Castro (1992)	2.1	-	-	-
Dupin & Johsua (1987; 1990)	2.3	b)	-	-
Dupin & Johsua (1989)	1.2	-	-	-
Gravina & Buchweitz (1996)	1.1	a)	-	-
Gutwill, Frederiksen & Ranney (1996)	2.1	-	-	-
Liegeois, Chasseigne, Papin et al. (2003)	2.1	-	-	-
Liegeois & Mullet (2002)	2.1	-	-	-
Metioui, Brassard, Levasseur et al (1996)	-	-	-	x
Miera, Rosado & Oliva (1991)	1.1	a)	-	-
Millar, Beh & Alam (1993)	2.1	-	-	-
Millar & King (1993)	2.1	-	-	-
Moreira & Domínguez (1987)	1.1 e 1.2	a) e f)	-	-
Nieto, Campo & Martinez (1988)	1.1 e 2.1	a)	-	x
Olde & Jong (1990)	1.1	a)	-	-
Paatz, Ryder, Schwedes et al (2004)	1.1	-	-	-
Pardhan & Bano (2001)	1.1	-	-	-
Psillos (1988)	2.1	-	-	-
Saxena (1992)	3.3	j)	x	-
Shipstone, Rhoeneck, Jung et al. (1988)	1.1 e 2.1	a)	x	x
Silveira, Moreira & Axt (1989)	1.1	a)	-	-
Solano, Gil, Pérez et al. (2002)	1.1	f)	-	x
Stocklmayer & Treagust (1996)	1.1 e 2.1	-	-	-
Talim & Oliveira (2001)	1.1	-	-	-
Tsai (2003)	1.1	a)	-	-
Vieira, Quillfeldt, Selistre et al. (1986)	1.1	a)	-	-
Webb (1992)	1.1	-	-	-

Table 2 - Research papers about the teaching of simple electric circuits. The identification for the conceptual difficulties use the convention presented in Table 1.

From Halloun (1996), we considered his proposal of schematic modeling that may be applied to the solution of paradigmatic problems, defined as those that possess special characteristics and whose solution cannot be obtained through direct formula application and substitution of numerical values, including open-ended questions. The solution of such problems requires students to think about their own conceptions about the physics system, thus favoring meaningful learning. Halloun's schematic modeling processes in five non-hierarchical stages: selection, construction, validation, analysis and expansion. In the solution of a paradigmatic problem, the first stage of the process consists of the selection of a scientific model from a repertoire of familiar models of a specific theory. The selection is guided by the domain of the model, the objective of modeling (i.e., of the problem) and the validity of expected results (including approximations and precision of results). Then, the solution of the problem is formulated by constructing a mathematical model that takes into account relevant parameters, initial conditions, constraint conditions; finally, a model that can be continuously processed, analyzed and validated to evaluate if it leads to an acceptable solution to the problem at study. These intermediate stages of construction, validation and analysis juxtapose, and some of these steps occur concomitantly. The expansion of the model includes a description or prediction of new situations referring to the same system focused on, or implications to other reference systems, as well as extrapolations for the design of new models.

Methodology

Object of study and research hypothesis

This study investigated the learning of students who worked with computational simulation and modeling presented as a problem situation proposed through the software *Modellus*, in the teaching of simple electric circuits. A problem situation consists of a particular situation in physics upon which questions are made with the purpose of stimulating students to think and interact consciously with computational resources and not merely by trial and error.

As a research hypothesis we assumed that the use of computational modeling and simulation activities as complements to the classroom and physics laboratory activities can favor the students' predisposition for learning, by relating the new information in a substantive and non-arbitrary way to his/her cognitive structure, thus, creating conditions for meaningful learning of physics concepts involved in simple circuits. This could generate better performance from the students in the posttest on the studied topic as well as promoting better conditions for the students to attain specific objectives (Table 3)

Design

This study was carried out when simple electric circuits concepts were taught in the course of Physics II-C (Electromagnetism for Engineering students of the Federal University of Rio Grande do Sul - UFRGS, Brazil). 193 Engineering students who attended the course in the second semester of 2004 participated in the study. The experimental and control group were

randomly chosen. A class with 28 students formed the experimental group, and 165 students, from five sections of the course in which the research was carried out, formed the control group. The students of the experimental group worked with computational simulation and modeling during the teaching of simple electric circuits, whereas the control group was exposed only to traditional teaching. Qualitative and quantitative evaluations were applied to the students' learning outcomes. As qualitative evaluation we considered the students' opinions about the treatment and answers to the discursive questions presented in printed guides during the classes. Quantitative evaluation was developed according to quasi-experimental design (Campbell & Stanley, 1963) in which there is a non-equivalent control group and an experimental group.

Procedures

Based on the learning difficulties presented in Table 1 and in mistaken reasoning students usually present, we established general and specific objectives to be attained by students after the teaching of simple electric circuits (Table 3).

To help students achieve the objectives presented in Table 3, we designed a series of simulation and modeling computational activities (Dorneles, Ives & Veit, 2005) as an instructional resource. For each activity we developed material containing: objectives to be attained by the students, a general description of the model, and a printed guide with discursive questions to be answered by the students in class.

The treatment adopted in this study comprised the implementation of designed computational activities, using the PIE (Predict, Interact and Explain) and the use of collaborative methods described in section I. These methods are related to classroom dynamics, aiming at promoting students' interactivity and engagement in class.

Treatment

The treatment was applied to a total of five classes of 1h40min each in the computer laboratory, where the students from the experimental group worked in pairs with computational simulation and modeling. At the beginning of each class the students received printed guides with discursive questions to be answered in groups with the PIE method. At the end of the class, each group handed in a single copy of the guide containing consensual group answers for evaluation purposes. From the second class on, we began each class with a coordinated discussion (~ 15 minutes) with all the students about the activities performed in the previous class.

Evaluation tools for students' learning

In the present study we have chosen to apply the test on simple electric circuits as proposed by Silveira, Moreira & Axt (1989), transcribed in Appendix A, because it is well accepted among teachers who have already taught the subject matter that is the focus of this study. Then, it had provided us a large control group. Furthermore, the reliability coefficient of the instrument (Cronbach's alfa) was calculated for a target population

seemingly similar to ours (Silveira, Moreira & Axt, op. cit.). Since the reliability coefficient is not a property exclusively associated to the instrument, but a property of it pertaining to a certain group, we recalculated the reliability coefficient of the test, that will be presented in the next section.

We applied this instrument as a pre-test both in the control and the experimental groups in the first day of classes to verify learning difficulties measured by this test as well as to use them as a covariable for the analysis of the results of the post-test. That test was applied to both groups at the end of classes about electric circuits to verify possible effects of the treatment. It took students approximately 30 minutes to answer the tests, and the application interval between the pre-test and the post-test was of seven weeks.

Results and Discussion

Reliability analysis of pre and post-tests

We calculated the reliability coefficient of the test proposed by Silveira, Moreira & Axt (op. cit.) before (pre-test) and after (post-test) the teaching of simple electric circuits based on the answers of students who attended the course Physics II-C, in the semester in which we carried out the present study, but who did not participate in the experimental or control group. The internal consistence analysis (ICA) was carried out according to Cronbach (1967, apud Moreira & Silveira, 1993). The ICA included the calculus of the Cronbach's alpha coefficient, whose result is presented in Table 4, together with the correlation coefficient of the score of each item with the total score. In both cases the coefficients were higher than 0.7, showing the capacity of the test to discriminate students with scientific conceptions from those with misconceptions about simple electric circuits.

Comparison between the experimental and control group

The percentages of correctness of each item of the pre-test and of the post-test of the experimental and control group are presented in Table 5. The data referring to item 8 of the test were not part of our analysis, for it involves a RC circuit, and when we applied the post-test the students had only studied the simple circuits. We can observe that for both groups the percentage of correctness of each item in the post-test is higher than the one presented in the pre-test.

In Table 6 we observe the total score averages of the experimental and control groups in the pre-test and in the post-test. In the pre-test, the control group average (6.94) was higher than the average of the experimental group (4.71); the statistical level of significance of the difference between the averages was less than 0.01. We also did a Variance and Covariance Analysis – ANOVA/ANCOVA (Finn, 1997). Table 7 shows the adjusted average in the post-test to both groups, and also the ratio F of Snedecor (through which the level of statistical significance is obtained) for the difference between the two averages and the level of statistical significance of this difference.

	Given a	The student should...
General objectives	simple electric circuit	<p>... grasp:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. that it is necessary to deal with the electric circuit as a system; 2. the conservation of electric current in the electric circuit; 3. the relation between total electric current and the resistances associated in the circuit; 4. the behavior of equivalent resistance to different associations; 5. electric current as a consequence of potential difference and electric resistance;
Specific objectives	resistors' association in series	<p>... grasp that:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) the electric current that runs through the resistors is the same; b) the sum of the potential difference between the terminals of resistors is the same as the potential difference applied by the source; c) equivalent resistance increases (diminishes) when a resistor is inserted (taken out) in a series association;
	resistors' association in parallel	<p>... grasp that:</p> <ol style="list-style-type: none"> d) the potential difference between the ends of resistors is the same; e) current divisions at a junction of the circuit (current divisor) depend on what already exists in the rest of the circuit; f) the equivalent resistance decreases (increases) when a resistor is inserted (taken out) in a parallel association;
	light bulb circuits	<p>... be able to:</p> <ol style="list-style-type: none"> g) identify that a light bulb is a resistor and, therefore, the observed behavior in relation to resistors is also manifested in light bulbs; h) associate the brightness of a light bulb to electric current;
	ideal tension source	<ol style="list-style-type: none"> i) ... grasp that an ideal battery is not a source of constant electric current, but a source of constant potential difference.

Table 3 - General and specific objectives to be attained by the students when working with computational simulation and modeling about simple electric circuits.

Test	N	Total score average	Standard deviation of the total score	Items	Cronbach alfa coefficient
Pre-test	66	7.70	2.82	13	0.75
Pos-test	53	8.36	3.25	13	0.85

Table 4 - ICA synthesis for the test on simple electric circuits applied to engineering students before and after instruction.

Based on the comparison between the average performance of the experimental and the control group in the adjusted averages of the post-test (Table 7), we used the null hypothesis, concluding that the average performance of the students who worked with computational simulation and modeling was higher than that of the other students, with a level of statistical significance lower than 0.01.

Objectives*	Item	Experimental group (28 students)		Control group (165 students)	
		Correct items (Pre-test)	Correct items (Pos-test)	Correct items (Pre-test)	Correct items (Pos-test)
a)	1	82	100	89	90
a)	2	14	86	53	59
e)	3	39	64	56	67
c), e)	4	18	43	38	41
-	5	18	79	55	64
e)	6	29	86	47	54
a)	7	21	25	29	28
a)	9	71	100	88	90
e)	10	71	79	89	90
f)	11	11	57	15	18
f)	12	0	57	16	21
a), e)	13	61	75	79	84
a), c), e)	14	36	68	39	42

*The objectives g) and h) pervade all the test's items.

Table 5 - Students' performance from the experimental and control group on the pre and post-tests. In the first column, we indicate the specific objectives measured for each item of the test.

Group	Pre-test			Pos-test		
	Total score average	Standard deviation	Correct answers	Total score average	Standard deviation	Correct answers
Experimental	4.7	2.5	36%	9.2	2.4	71%
Control	6.9	2.7	53%	7.5	2.7	58%

Table 6 - Comparison between experimental and control groups in the averages of the pre-test and post-test. Maximum score = 13.

Group	Adjusted average in the post-test	F	Level of statistical significance
Experimental	10.2	38.7	0.000
Control	7.3		

Table 7 - Comparison between the experimental group and control group of the adjusted averages of the post-test.

To compare the performance of the two groups in terms of the objectives measured through the test, we compared the gain of the experimental and control groups in the average scores of the questions associated to each specific objective (column 1 Table 5), the level of statistical significance being obtained with the U-Test of Mann-Whitney (a non-parametric test equivalent of the t-test to the average difference). The results are shown in

Table 8, in which we can observe that for every objective analyzed the performance of the students from the experimental group was higher than the one of the control group, with a level of statistical significance lower than 0.01.

Group		Gain a)	Gain c)	Gain e)	Gain f)
Experimental	Average	1.68	0.57	1.61	1.04
	Average standard error	0.27	0.18	0.32	0.18
Control	Average	0.15	0.05	0.29	0.08
	Average standard error	0.10	0.06	0.10	0.07
Level of statistical significance		0.000	0.002	0.000	0.000

Table 8 - Comparison between the experimental and the control groups in terms of each specific objective (column 1 Table 5). The level of statistical significance was obtained through the U-test of Mann-Whitney.

To illustrate the simulations developed with the students, in Table 9 and in Figures 1 to 3 we present in detail the computational activity that helped students attain objectives a), c) and e). In this activity, the students initially answered questions 1 and 2 from Table 9 to make predictions about the behavior of the equivalent resistance and of the electric current shown in Figure 1. Then, they interacted with animation 2 (Figure 2) to generate results, and afterwards they evaluated the divergences and convergences of their predictions (question 3 from Table 9). Finally, they answered four conceptual questions about the potential difference along the circuit shown in Figure 3 (questions 4 to 7 from Table 9).

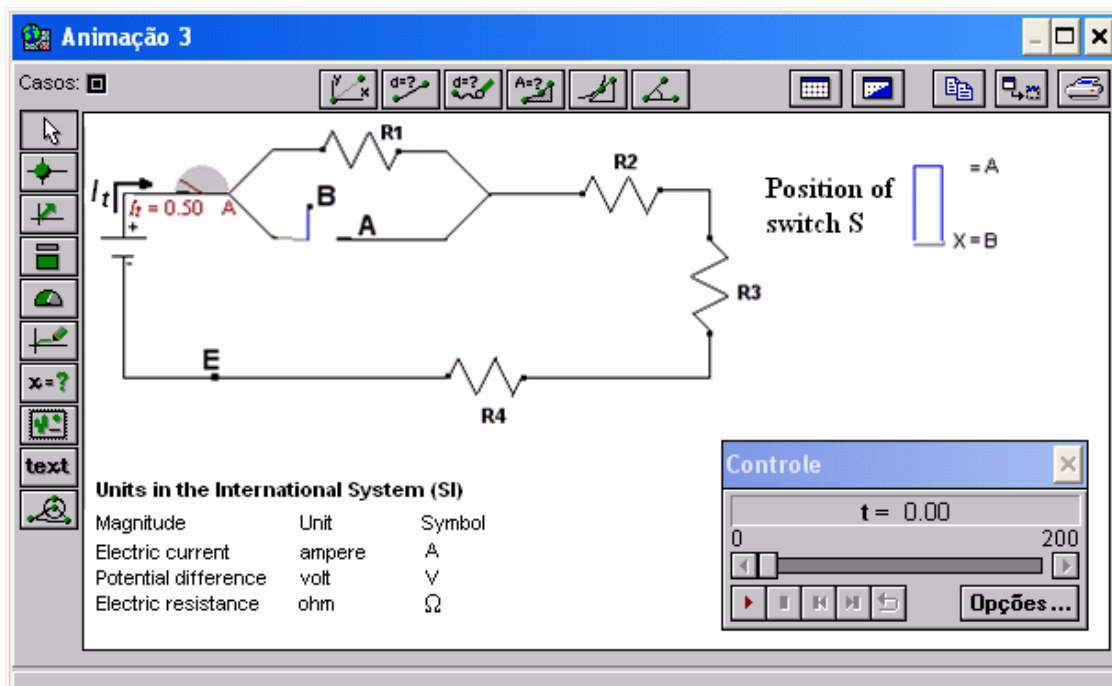


Figure 1 – Screenshot: Animation 3 of the computational simulation presented in Table 9.

General description	Running the model and changing the position of the switch shown in Figure 1, an ammeter registers an electric current variation at a specific point of the circuit, through which the total current of the circuit (I_t) runs. With the help of the ammeter (Figure 2), it is possible to observe the behavior of the electric current along the circuit and with the voltmeter (Figure 3), it is possible to observe the potential difference between many pairs along the circuit.
Objectives of the activity	<ul style="list-style-type: none"> - given a potential difference between two points of a simple circuit, the student should: <ul style="list-style-type: none"> i) be able to understand the electric current as a consequence of the potential difference and the electric resistance; ii) relate the increase of electric current in the circuit to the decrease of the equivalent resistance; - given a junction of the circuit (current divisor), the student should notice that the division of currents depends on what is connected in the circuit; - given an association of resistors in series, the student should realize that: <ul style="list-style-type: none"> i) the current that runs between them is the same; ii) the equivalent resistance increases when a resistor is associated in series; iii) the sum of the potential difference between the ends of resistors is the same as the potential difference applied between the ends of the source; iv) the potential difference applied between the ends of the source is an intrinsic characteristic of the source; v) it is necessary to deal with the circuit as a system.
Questions proposed to the students	<ol style="list-style-type: none"> 1) Run the model and answer the following question: closing the switch A-B, what happens to the equivalent resistance shown in Animation 3? Why? 2) The intensity of the electric current in point E, in relation to the intensity measured in the ammeter is: <ul style="list-style-type: none"> I) lower; II) equal; III) higher 3) Open Animation 2. Verify prior answers. What can be said about the behavior of the electric current in the circuit? 4) Open Animation 1. On the right side of the animation window there are voltmeters to measure the potential difference between different pairs of points of the circuit. Modify the value of the electric resistance of the resistors. When switch A-B is in position B and the resistors R2 and R3 in the maximum value, what is the potential difference between points b-d? 5) When switch A-B is in position A and the resistors R2 and R3 are at their lowest values, what is the potential difference between points a-d? 6) When switch A-B is in position B, click with the left button of the mouse over the analogic meter of R4 and inform the value 1000 (value in ohms). To which values tend the electric current and the potential difference between points d-e? Why? 7) Is it possible to modify the potential difference (V) between the ends of the source at any position of switch A-B? Why?

Table 9 - Detail of a computational activity that helped students attain specific objectives a), c) and e) presented in Table 3.

Qualitative analysis of the answers of the students of the experimental group to questions 1 to 3 of Table 9 agrees with the quantitative results related to objectives a), c) and e) (Table 3). Following, we present some examples of the students' answers.

Answers to question 1, related to objectives c) and e):

"The equivalent resistance decreases because the current does not pass through R1 anymore, for the segment of the wire that passes through A has negligible electric resistance, which turns it preferable. We noticed that because of the increase of the total electric current when we closed switch A-B" (Group 2).

"As we close switch A-B, the electric current does not pass through R1 anymore and the resistance in the whole circuit decreases. The electric current tends to follow what makes less electric resistance easier" (Group 6).

"The equivalent resistance of the circuit goes down with the switch in position A, the electric current passes all through the new path, increasing the amperage (current) in the circuit" (Group 15).

Answers to question 2, related to objective a):

"In an association in series, the intensity of the electric current is the same at all points" (Group 11).

" The electric current does not vary, it remains the same along the circuit" (Group 13).

"The electric current remains the same in an association in series" (Group 15).

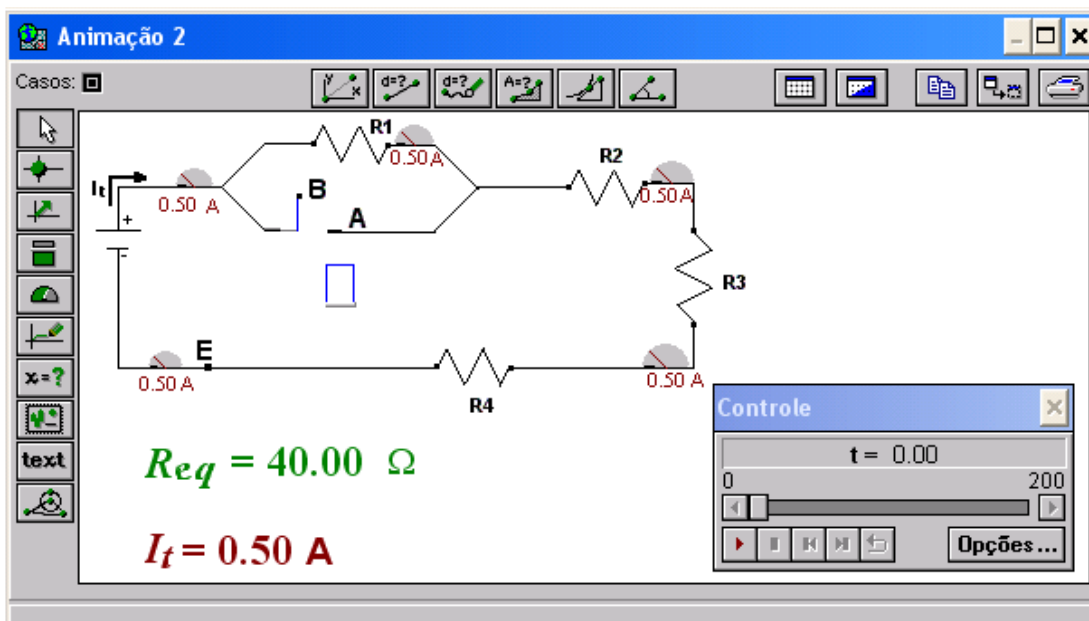


Figure 2 – Screenshot: Animation 2 of the computational simulation presented in Table 9.

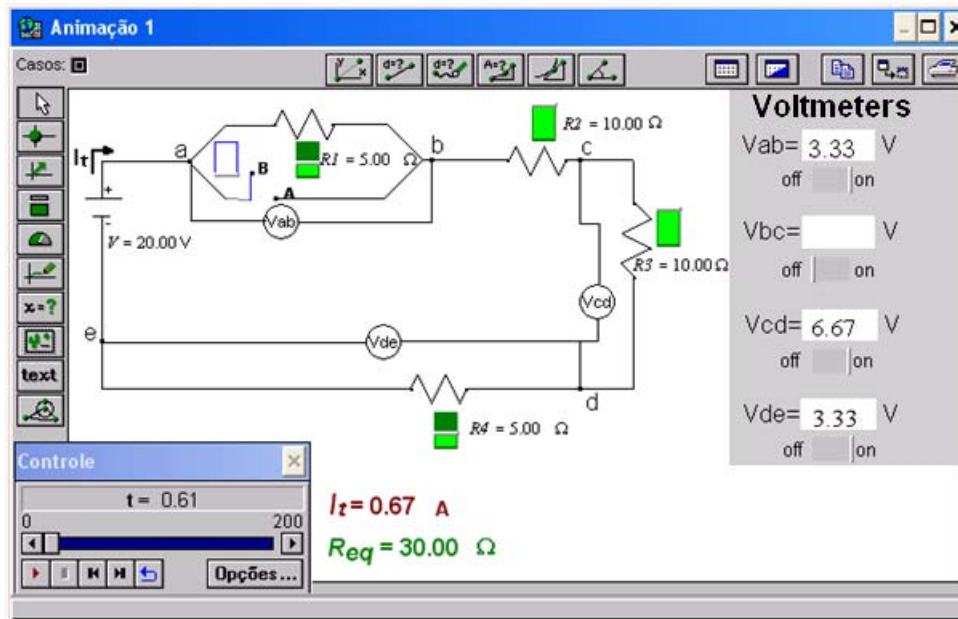


Figure 3 – Screenshot: Animation 1 of the computational simulation presented in Table 9.

These results suggest strong indications that the computational simulation presented in Table 9 has helped students overcome a misconception according to which the electric current is consumed when passing through an electric resistance. Other important result is that by varying a parameter in a circuit students could instantaneously observe alterations along the circuit, which motivated them to develop systemic reasoning, that is, to deal with an electric circuit as a system. For example, many students while analyzing the current division at a point of junction of the circuit did not apply local reasoning, that is, they did not focus their attention on just one point of the circuit; quite the contrary, they considered the divisions of electric current at a point of junction of the circuit to depend on what already existed in the whole of the circuit.

Since none of the test items adequately measures objective b), we qualitatively analyzed question 6 from Table 9. The results suggest that a few students have reached such objective, since only three groups, from a total of 15, have presented clear argumentation based on the concept of potential difference, which will be transcribed next.

“The electric current tends to zero because resistance R4 is too high, the higher the resistance, the lower the electric current. The potential difference between d-e tends to the maximum value 20V” (Group 10).

“It is that the total electric current tends to zero (0.002A) and V tends to the maximum (20.0V), because resistance increases, decreasing the electric current” (Group 9).

“The electric current tends to zero because the higher the resistance the lower the electric current. And the potential difference tends to 20V, which is the maximum value, because, as resistance is increased,

the potential difference between the two points also increases" (Group 11).

This result may not necessarily mean that computational simulation did not contribute to a better understanding of the students about potential differences in an association of resistors in series, but that the question proposed might not be appropriate for this evaluation. The instructional material could be more efficient in relation to this objective if it included questions that would necessarily require students to apply the concept of potential difference.

As for the objective d), we have qualitatively analyzed the students' answers to question 1) of the computational simulation described in Table 10 whose main screen is presented in Figure 4. We have found strong indications that the majority of students reached such objective. In their own words:

"The currents I_1 and I_2 remain constant since the resistors are in parallel and the total current changes. When the value of R_3 is greater, I_t it decreases and when R_3 is lower, I_t it increases." (Group 10).

" I_1 and I_2 remain constant because R_1 and R_2 and the tension are constant, and the current depends on these parameters. I_t diminishes with the increase of R_3 , for this increases the total resistance of the circuit." (Group 2).

"Circuit in parallel ($V=cte$) altering the value of R_3 (decreasing) more current passes through it, I is proportional to $1/R$." (Group 3).

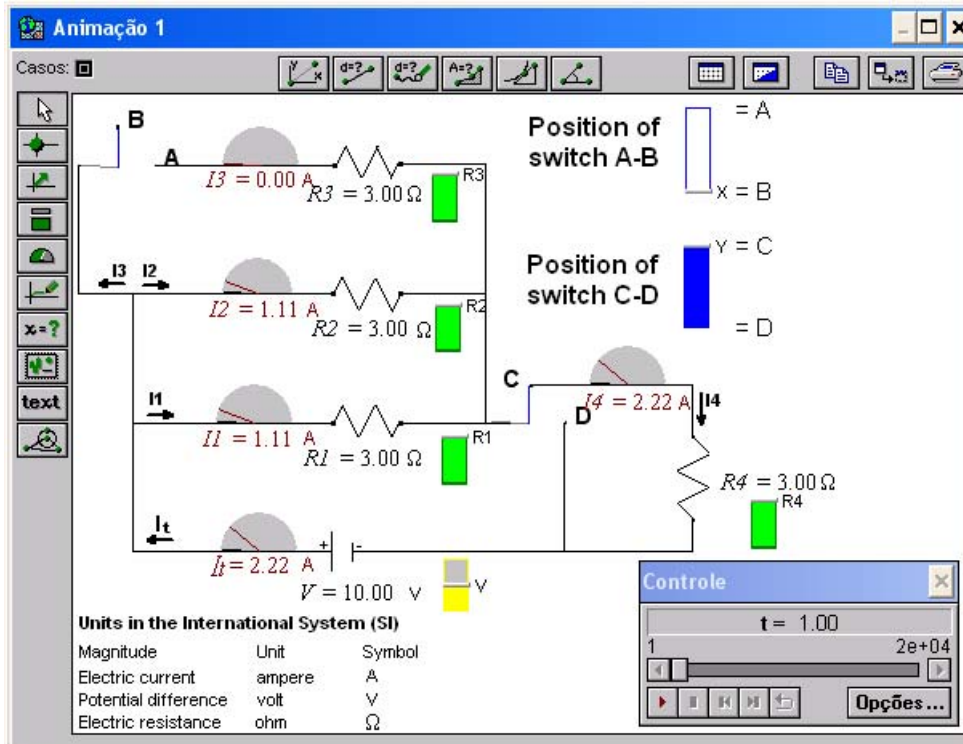


Figure 4 – Screenshot: Animation 1 of the computational simulation described in Table 10.

General description	By running the model, it becomes possible to obtain two or three resistors associated in parallel, by varying the position of the switches. There is still the possibility of associating them in series with a fourth resistor. The ammeter registers the electric current that passes through each resistor at any position of the switches. We can modify the value of the electric resistance in the resistors and the potential difference between the ends of the source, as shown in Figure 4.
Objectives of the activity	- given a circuit with resistors of mixed association, the student should be able to: <ul style="list-style-type: none"> i) deal with the circuit as a system; ii) notice the behavior of the equivalent resistance; iii) identify the behavior of potential difference on the ends of the resistors; iv) identify what is the intensity of electric current that passes through each resistor.
Questions proposed to the Students	1) With the switches at positions A and D, modify the value of R3. Explain the behavior of the values of i_1 , i_2 and i_t . 2) With the switches at positions A and C, modify again R3. Explain why, in this case, all the currents vary.

Table 10 - Details of a computational activity which helped the students attain the specific objectives d) and l) presented in Table 3.

Another important aspect is that interacting with the computational simulation described in Table 10, many groups (13) did not apply sequential reasoning and did not analyze the electric circuit in terms of “before” and “after” the passage of electric current; quite the contrary, they dealt with the circuit as a system and were able to recognize that an alteration in one parameter of the circuit causes instant alterations along the circuit. Following we present how the students from group 14 answered question b).

“Once R1, R2 and R3 are associated in parallel, the potential difference must be the same in each one. Diminishing R3, I3 increases and consequently I4 becomes higher. For that, potential difference in R4 will have to be higher, because R4 remains equal. That’s why the potential difference of the resistances in parallel will change (will be lower) what makes I1 and I2 also change.” (Group 14).

As for objective i), just three groups, when working with the computational activities proposed in this study, presented the misconception that an ideal battery is a source of constant electric current; the others, 12 groups, seemed to have reached the objective, that is, considered that the intensity of an electric current of a circuit does not depend only on the characteristics of the source but also on the equivalent resistance of what has been coupled between its ends, and that an ideal battery is a source of constant potential difference. Following, we show two examples of each case:

First case:

“ The total electric current in an association in parallel is equal to the sum of the currents in all the resistors. If you take out one resistor from the association, the remaining ones will have a greater current”. (Group 11).

"In a circuit associated in parallel, the partial currents added result in the total current. Since we have eliminated one resistor, the current that passed through it will be added to the other resistors" (Group 2).

Second case:

"Since the resistors R_1 , R_2 and R_3 are associated in parallel, the currents I_1 and I_2 do not depend on the electric resistance of R_3 , that's why they remain constant as R_3 is modified. The total electric current increases with the decrease of R_3 , because by decreasing R_3 , R_{eq} diminishes, while increasing the intensity of the total electric current. The potential difference between the resistors is constant for it depends only on source characteristics." (Group 11).

" In this case (the three resistors are associated in parallel) the currents I_1 and I_2 remain constant when the electric resistance of R_3 is altered and the potential difference remains the same in all resistors." (Group 13).

In synthesis, we have strong indications that the computational activities developed in this research helped the experimental group students attain the objectives related to the concepts of electric current and electric resistance. However, it did not show efficiency in helping them to reach the proposed objectives for potential difference. Many students, even after the treatment, showed difficulties in understanding the decrease on potential difference across an association in series.

In the next topic, we present some of the students' opinions about the treatment used in this study.

Raising opinions

We have also tried to evaluate our research hypothesis by analyzing the students' opinions about the treatment. The raising of students' opinions was encouraged by electronic mail during the second semester of 2005, when the students had already received the final grade for the course. Based on the analysis of the students' statements we believe that the use of computational activities may offer students opportunities for a better conceptual understanding. On their own words they stated:

"The use of computers facilitated understanding of the studied physics phenomena. Simple use of the blackboard to explain the subject rarely brings about clarity to physics concepts and with the simulations we were able to observe everything that could possibly happen" (Student 5).

" It was easier to learn by visualizing what happened each time we changed something in the circuit" (Student 1).

"I remember that after the simulations on the screen, the laws became clearer, it was cool to see the resistors influencing the circuit!" (Student 2).

" It was quite nice to study in the computers, it made the content clearer." (Student 9).

Moreover, we believe that treatment is a motivational factor for improving the students' learning. On their own words:

"The simulations give us a concrete view of what we learn theoretically in class. The visualization of the circuits makes learning much easier, stimulating and interesting". (Student 3).

"The development of assignments during the classes contributed a lot to learning because by interacting with the simulations we had a very good view of the physics concepts and moreover, with pair work, we had the chance of discussing the observations right there and clearing out doubts." (Student 5).

"I point out the disposition in the assistance of the student, always searching for ways to present the best way of learning, besides the change from the classical and formal environment of a conventional classroom to a room with computers and audiovisual resources." (Student 7)

"The computational activities proposed brought about many doubts, sometimes the simulation itself answered the doubt, or we would ask the teacher." (Student 4).

These results seem to show that the computational activities developed in this study can offer better conditions for meaningful learning of electric circuits.

Conclusions

Nowadays, studies that identify learners' difficulties with some contents of physics have not been restricted just to the detection of difficulties, but they also present alternatives to help students overcome them. We worked with simple electric circuits, because many research results (e.g. McDermott & Shaffer, 1992; Duit & Rhöeneck, 1998 and Engelhardt & Beichner, 2004) show that many students even after being taught this topic, continue with some misconceptions and mistaken reasoning. In order to help students overcome such difficulties, McDermott et al. proposed some experimental activities. In this study, we present as an alternative to overcome these difficulties the use of computers. So, we developed computational simulation and modeling activities that were designed taking into account difficulties commonly experienced by students in the learning of electric circuits to be worked in class with the PIE (predict, Interact, Explain) and the use of collaborative methods.

The quantitative results of this study showed that there was a statistically significant difference in the performance of students from the experimental group, in comparison with that of the control groups, leading us to believe that computational simulation and modeling activities can help students overcome their learning difficulties usually faced when they study simple electric circuits. The results of our qualitative analysis show that the conceptual questions presented in the guides which require constant

students' interactions with the computational models, might have promoted the students' predisposition to learn by relating in a substantive manner to their cognitive structure the physics concepts involved, thus, allowing for a better conceptual understanding. The willingness to learn is one of the conditions for meaningful learning. The other is that the material must be potentially meaningful. We believe to have attained both of these conditions in this study, which agrees with Araujo, Veit & Moreira (2008), Ronen & Eliahu (2000) and Finkelstein, Adams, Keller et al. (2005) whose findings, suggested that the use of computational activities can improve conceptual understanding while being itself a motivational element for learning.

We conclude pointing out that by using computational activities in the teaching of electric circuits we are not proposing them as a replacement for laboratory classes, but we believe we are increasing the range of possibilities for helping students overcome their learning difficulties.

Thanks

We thank Prof. Dr. Fernando Lang Silveira for his contribution in the statistic analysis of the results. This study is partially financed by CNPq, National Brazilian Council of Technological and Scientific Development.

References

Andrés, M.M. (1990). Evaluación de un plan instruccional dirigido hacia la evaluación de las concepciones de los estudiantes acerca de circuitos eléctricos, *Enseñanza de las Ciencias*, 8, 3, 231-237.

Araujo, I.S., Veit, E.A., & Moreira, M.A. (2008). Physics students' performance using computational modelling activities to improve Kinematics graphs interpretation, *Computers & Education*, 50, 4, 1128-1140.

Arnold, M., Middle, W., & Millar, R. (1987). Being constructive: An alternative approach to the teaching of introductory ideas in electricity, *International Journal of Science Education*, 9, 5, 553-563.

Ausubel, D.P. (2000). *Acquisition and Retention of Knowledge: A cognitive view*. Dorchet: Kluwer Academic Publishers.

Ausubel, D.P., Novak, J.D., & Hanesian, H. (1978). *Educational psychology*. Nova York: Holt, Rinehart and Winston.

Axt, R., & Alves, V.M. (1994). O papel do voltímetro na aquisição do conceito de diferença de potencial, *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 11, 1, 19-26.

Barbosa, J.O., Paulo, S.R., & Rinaldi, C. (1999). Investigação do papel da experimentação na construção de conceitos em eletricidade no ensino médio, *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 16, 1, 105-122.

Beichner, R.J. (1990). The effect of simultaneous motion presentation and graph generation in a kinematics lab, *Journal of Research in Science Teaching*, 27, 8, 802-815.

_____. (1994). Testing student interpretation of kinematics graphs, *American Journal of Physics*, 62, 8, 750-762.

- Beichner, R.J., Saul, J.M. (2003). Introduction to the SCALE-UP (Student-Centered Activities for Large Enrollment Undergraduate Programs) Project, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*,
- Benseghir, A., & Closset, J. (1996). The electrostatics-electrokinetics transition: Historical and educational difficulties, *International Journal of Science Education*, 18, 2, 179-191.
- Campbell, D.T., & Stanley, J.C. (1963). Experimental and quasi-experimental designs for research on teaching. N.L. Gage (Ed.), *Handbook of research in teaching* (pp. 171-246). Chicago: Rand McNally.
- Carter, G., Westbrook, S.L., & Thompkins, C.D. (1999). Examining science tools as mediators of students' learning about circuits, *Journal of Research in Science Teaching*, 36, 1, 89-106.
- Castro, C. (1992). Um modelo significativo para la comprensión de los circuitos eléctricos simples, *Enseñanza de las Ciencias*, 10, 3, 345-346.
- Chambers, S., & André, T. (1997). Gender, prior knowledge, interest, and experience in electricity and conceptual change text manipulations in learning about direct current, *Journal of Research in Science Teaching*, 34, 2, 107-123.
- Chiu, M.-H., & Lin, J.-W. (2005). Promoting fourth graders' conceptual change of their understanding of electric current via multiple analogies, *Journal of Research in Science Teaching*, 42, 4, 429-464.
- Dorneles, P.F.T. (2005). *Investigação de ganhos na aprendizagem de conceitos físicos envolvidos em circuitos elétricos por usuários da ferramenta computacional Modellus*. (Dissertação de Mestrado) - Instituto de Física, UFRGS, Porto Alegre.
- Dorneles, P.F.T., Araujo, I.S., & Veit, E.A. (2005) *Circuitos elétricos: atividades de simulação e modelagem computacionais com o Modellus*. Accessed 15 July 2008, <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/circuitos>.
- Duit, R., & Rhöeneck, C.V. (1998). Learning and understanding key concepts in electricity. A. Tiberghien, Jossem, E., Barojas, J. (Ed.), *Connecting research in physics education* (pp. 1-10). Ohio: ICPE Books.
- Dupin, J.J., & Johsua, S. (1987). Conceptions of French pupils concerning electric circuits: structure and evolution, *Journal of Research in Science Teaching*, 24, 9, 791-806.
- _____. (1989). Analogies and "modeling analogies" in teaching: Some examples in basic electricity, *Science Education*, 73, 2, 207-224.
- _____. (1990). Una analogía térmica para la enseñanza de la corriente continua en electricidad: descripción y evaluación, *Enseñanza de las Ciencias*, 8, 2, 119-126.
- Engelhardt, P.V., & Beichner, R.J. (2004). Students' understanding of direct current resistive circuits, *American Journal of Physics*, 72, 1, 98-115.
- Finkelstein, N.D., Adams, W.K., Keller, C.J., Kohl, P.B., Perkins, K.K., Podolefsky, N.S., & Reid, S. (2005). When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for

laboratory equipment, *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 1, 1, 010103-1 010103-8.

Finn, J.D. (1997). Analysis of variance and covariance. J.P. Keeves (Ed.), *Educational research, methodology, and measurement: an international handbook*. Cambridge: Pergamon.

Gravina, M.H., & Buchweitz, B. (1996). Mudanças nas concepções alternativas de estudantes relacionadas com eletricidade, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 16, 1, 110-119.

Gutwill, J., Frederiksen, J., & Ranney, M. (1996). Seeking the causal connection in electricity: Shifting among mechanistic perspectives, *International Journal of Science Education*, 18, 2, 143-162.

Halloun, I. (1996). Schematic modeling for meaningful learning of physics, *Journal of Research in Science Teaching*, 33, 9, 1019-1041.

Hodson, D. (1994). Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio, *Enseñanza de las Ciencias*, 12, 3, 299-313.

Institute of physics. Advancing Physics. (2004). London: IOP.

Liegeois, L., & Mullet, E. (2002). High school students' understanding of resistance in simple series electric circuits, *International Journal of Science Education*, 24, 6, 551-564.

Mcdermott, L.C., & Shaffer, P.S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding, *American Journal of Physics*, 60, 11, 994-1003.

Metioui, A., Brassard, C., Levasseur, J., & Lavoie, M. (1996). The persistence of students' unfounded beliefs about electrical circuits: The case of Ohm's law, *International Journal of Science Education*, 18, 2, 193-212.

Miera, A.R.S., Rosado, L., & Oliva, J.M. (1991). Investigación de las ideas de los alumnos de enseñanza secundaria sobre la corriente eléctrica, *Enseñanza de las Ciencias*, 9, 2, 155-162.

Millar, R., Beh, K.L., & Alam, S. (1993). Students' understanding of voltage in simple parallel electric circuits, *International Journal of Science Education*, 15, 4, 351-361.

Millar, R., & King, T. (1993). Students' understanding of voltage in simple series electric circuits, *International Journal of Science Education*, 15, 3, 339-349.

Moreira, M.A. (2006). *A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula*. Brasília: Editora Universidade de Brasília.

Moreira, M.A., & Domínguez, M.E. (1987). Misconceptions in electricity among college students, *Ciência e Cultura*, 39, 10, 955-961.

Moreira, M.A., & Silveira, F.L. (1993). *Instrumentos de pesquisa em ensino e aprendizagem: a entrevista clínica e a validação de testes de papel e lápis*. Porto Alegre: EDIPUCRS.

Nieto, P., Campo, M.J.M., & Martínez, A.F. (1988). Circuitos eléctricos: una aplicación de un modelo de enseñanza-aprendizaje basado en las ideas previas de los alumnos, *Enseñanza de las Ciencias*,

Novak, J.D., & Gowin, D.B. (1984). *Learning how to learn*. Nova York: Cambridge University Press.

Olde, C.V., & Jong, T. (1990). Student-generated assignments about electrical circuits in a computer simulation, *International Journal of Science Education*, 26, 7, 859-873.

Paatz, R., Ryder, J., Schwedes, H., & Scott, P. (2004). A case study analysing the process of analogy-based learning in a teaching unit about simple electric circuits, *International Journal of Science Education*, 26, 9, 1065-1081.

Pacca, J.L., Fukui, A., Bueno, M.C.F., Costa, R.H.P., Valério, R.M., & Mancini, S. (2003). Corrente elétrica e circuito elétrico: algumas concepções do senso comum, *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 20, 2, 151-167.

Pardhan, H., & Bano, Y. (2001). Science teachers' alternate conceptions about direct-currents, *International Journal of Science Education*, 23, 3, 301-318.

Psillos, D., Koumaras, P., & Tiberghien, A. (1988). Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching sequence on DC circuits, *International Journal of Science Education*, 10, 1, 29-43.

Redish, E.F., & Wilson, J.M. (1993). Student programming in the introductory physics course: M.U.P.P.E.T, *American Journal of Physics*, 61, 3, 222-232.

Ronen, M., & Eliahu, E.M. (2000). Simulation - a bridge between theory and reality: the case of electric circuits, *Journal of Computer Assisted Learning*, 16, 1, 14-26.

Sanchez, M.T., & Sánchez, M.M. (1989). Circuitos eléctrico: problemas de aprendizaje, *Ensenanza de las Ciencias*, 7, 1, 107-108.

Sencar, S., & Eryilmaz, A. (2004). Factors mediating the effect of gender on ninth-grade Turkish students' misconceptions concerning electric circuits, *Journal of Research in Science Teaching*, 41, 6, 603-616.

Shaffer, P.S., & Mcdermott, L.C. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part II: design of instructional strategies, *American Journal of Physics*, 60, 11, 1003-1013.

Shepardson, D.P., & Moje, E.B. (1994). The nature of fourth graders' understandings of electric circuits, *Science Education*, 78, 5, 489-514.

_____. (1999). The role of anomalous data in restructuring fourth graders' frameworks for understanding electric circuits, *International Journal of Science Education*, 21, 1, 77-94.

Shipstone, D.M., Rhoeneck, C.V., Jung, W., Kaerrquist, C., Dupin, J.J., Johsua, S., & Licht, P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries, *International Journal of Science Education*, 10, 3, 303-316.

Silveira, F.L., Moreira, M.A., & Axt, R. (1989). Validação de um teste para verificar se o aluno possui concepções científicas sobre corrente elétrica em circuitos simples, *Ciência e Cultura*, 24, 11, 1129-1133.

Solano, F., Gil, J., Pérez, A.L., & Suero, M.I. (2002). Persistencia de preconcepciones sobre los circuitos eléctricos de corriente continua. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 460-470, jun. 2002., *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 24, 4, 460-470.

Talim, S.L., & Oliveira, J. (2001). A conservação da corrente elétrica em circuitos simples: a demonstração de Ampère, *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 18, 3, 376-380.

Tao, P.-K., & Gunstone, R.F. (1999). The process of conceptual change in force and motion during computer-supported physics instruction, *Journal of Research in Science Teaching*, 36, 7, 859-882.

Teodoro, V.D., Vieira, J.P., & Clérigo, F.C. (2008) *Modellus, interactive modelling with mathematics*. Accessed 15 July 2008, <http://phoenix.sce.fct.unl.pt/modellus>.

Tsai, C.-C. (2003). Using a conflict map as an instructional tool to change student alternative conceptions in simple series electric-circuits, *International Journal of Science Education*, 25, 3, 307-327.

Vieira, J.S., Quillfeldt, J.A., Selistre, L.F., Rios, L.H.R., Schmitz, S.R., & Steffani, M.H. (1986). Conservação de corrente elétrica num circuito elementar: o que os alunos pensam a respeito, *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 3, 1, 12-16.

Vygotsky, L.S. (2003). *Pensamento e linguagem*. São Paulo: Martins Fontes.

Webb, P. (1992). Primary science teachers' understandings of electric current, *International Journal of Science Education*, 14, 4, 423-429.

Appendix

We here transcribe the test proposed by Silveira, Moreira & Axt (1989).

IMPORTANT: DO NOT MAKE MARKS ON THE QUESTION SHEET. ANSWER ONLY ON THE ATTACHED ANSWER SHEET.

In all questions of this test it is assumed that the light bulbs are alike. The brightness of the light bulbs increase when the intensity of the electric current increases. The battery presented has negligible electric resistance.

1) As for the circuit of Figure 1, one can state that:

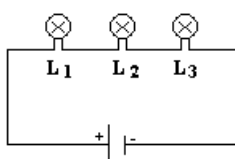


Figure 1

- a) L1 is brighter more than L2 and this one is brighter than L3.
- b) L3 is brighter than L2 and this one is brighter than L1.
- c) The three have the same brightness.

2) In the circuit of Figure 2, R is a resistor. In this circuit:

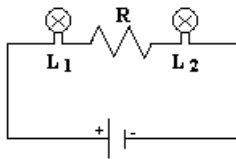


Figure 2

- a) L1 and L2 have equal brightness.
- b) L1 is brighter than L2.
- c) L2 is brighter than L1.

3) In the circuit of Figure 3, R is a resistor. In this circuit:

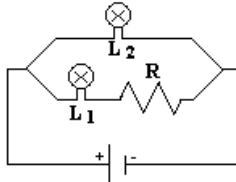


Figure 3

- a) L1 has the equal brightness as L2.
- b) L2 is brighter than L1.
- c) L1 is brighter than L2.

4) In circuit of Figure 4, S is an open switch. Closing it:

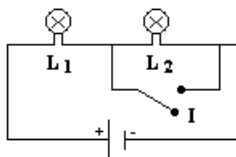


Figure 4

- a) The brightness of L1 increases.
- b) The brightness of L1 remains the same.
- c) The brightness diminishes.

5) In circuits of Figures 5 and 6, the light bulb L, the resistor R and the battery are exactly the same. In these situations:

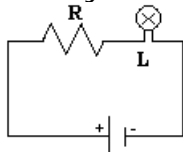


Figure 5

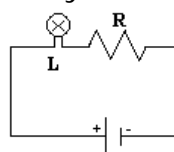


Figure 6

- a) L is brighter in the circuit of Figure 5.
- b) L has equal brightness in both circuits.
- c) L is brighter in circuit of Figure 6.

6) In the circuit of Figure 7, R is a resistor and S is an open switch. Closing the switch:

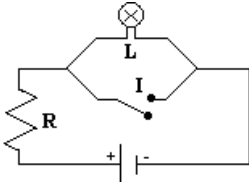


Figure 7

- a) L is brighter in the circuit of Figure 5.
- b) L has equal brightness in both circuits.
- c) L is brighter in circuit of Figure 6.

7) In the circuit of Figure 8, R1 and R2 are two resistors. The black box can have resistors, batteries or a combination of both. In order for the current in R1 to be the same as the intensity of the current in R2, the black box:

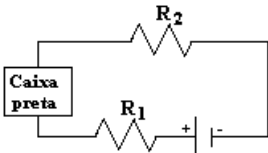


Figure 8

- a) Should have only resistors.
- b) Should have at least one battery.
- c) Could have any association of resistors and batteries.

8) In the circuit of Figure 9, L is a light bulb, R is a resistor, C a discharged capacitor and S an open switch. Closing the switch:

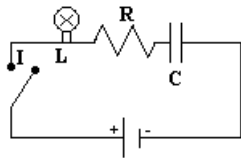


Figure 9

- a) L starts to shine and keeps shining while the switch is closed.
- b) L will not shine while the capacitor is not charged.
- c) L may shine during part of the charging process of the capacitor.

Questions 9 and 10 refer to the circuit of Figure 10.

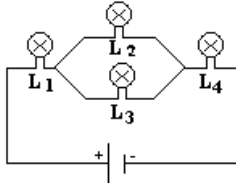


Figure 10

- 9) In the circuit of Figure 10, the brightness of L1 is:
 - a) The same as the of L4.
 - b) Higher than the one of L4.
 - c) Lower than the one of L4.
- 10) In the circuit of Figure 10, the brightness of L2 is:
 - a) The same as the one of L4.
 - b) Higher than the one of L4.
 - c) Lower than the one of L4.

The circuit of Figure 10 has been modified, for the light bulb L3 was taken out. The new circuit is, therefore, the one shown in Figure 11.

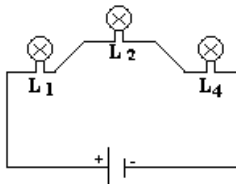


Figure 11

- 12) When we compare the brightness of L1 in the circuits of Figures 10 and 11, it is:
 - a) Higher in circuit of Figure 11.
 - b) Lower in the circuit of Figure 11.
 - c) The same in both.
- 13) When we compare the brightness of L4 in the circuits of Figures 10 and 11 it is:
 - a) Higher in Figure 11.
 - b) Higher in Figure 11.
 - c) The same in both.

13) In the circuit of Figure 12:

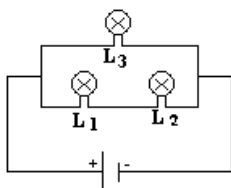


Figure 12

- a) L1 brights more than L2 and than L3.
- b) L1 and L2 have the same brightness which is smaller than the one of L3.
- c) L1, L2 and L3 bright equally

14) In the circuit of Figure 13, when the switch is open, the light bulbs L3 and L4 stop shining, although L2 brights. What happens to light bulbs L1 and L5?

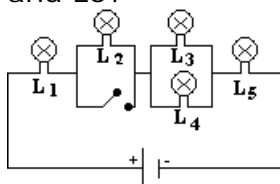


Figure 13

- d) Neither L1, nor L5 bright.
- e) L1 brights and L5 does not bright.
- f) L1 and L5 brig.

A seguir transcrevemos trabalho apresentado no Girep 2008 – The International Research Group on Physics Teaching, aceito para publicação no livro de conferências do Girep 2008.

INVESTIGATING THE LEARNING OF RLC CIRCUITS WITH THE AID OF COMPUTER-BASED ACTIVITIES

Pedro Fernando Teixeira Dorneles
Eliane Angela Veit
Marco Antonio Moreira

ABSTRACT

The purpose of this study was to get some insight about using computational simulations and modeling activities to promote a better students' conceptual understanding of RLC circuits. The theoretical framework adopted was Ausubel's meaningful learning. We elaborated four computer-based tasks, which take into account difficulties commonly experienced by students in learning RLC circuits, to serve as a potential aid to a group of engineering students (experimental group). Significant statistical differences were found between the experimental group students' performance in a conceptual test when compared to the control group, exposed only to the traditional classes. Students' answers to some open-ended questions were also used to assess their conceptual learning. Our results indicate that the computer-based activities, besides facilitating the learning of physics concepts involved in RLC circuits, promoted the interactivity and engagement of the students with their own learning, turning the classroom environment into a privileged space for an active and meaningful learning.

KEYWORDS:

INTRODUCTION

Electricity has been known as a basic subject in physics education, at all levels, mainly due to its great relevance in our everyday lives, recently restated by Ronen and Eliahu (2000). Probably because of that, simple electric circuits are one of the most researched contents of physics related to students' learning difficulties (e.g., ref.(Cohen, Eylon and Ganiel, 1983; McDermott and Shaffer, 1992; Duit and Rhöeneck, 1998; Engelhardt and Beichner, 2004)), and many are the studies of alternatives for helping students to overcome these difficulties with the support of the traditional laboratory (e.g., ref.(Shaffer and McDermott, 1992)) and, more recently, with the use of computational resources (Ronen and Eliahu, 1999; Ronen and Eliahu, 2000; Zacharia and Anderson, 2003; Zacharia, 2005; Zacharia, 2007). The persistence on the study of simple electric circuits is justified by the fact that research findings show that, even after formal teaching, many conceptual difficulties, misconceptions and mistaken reasoning are still detected in the students. However, in order to have some understanding of the technological application that affects our everyday lives, such as telephone, television, radio, computer and microwave oven, it would be desirable that capacitive and inductive circuits were studied, besides circuits with only batteries and resistive elements. Circuits that consist of resistor, capacitor and inductor (RLC¹) open new perspectives of learning because of their inherent dynamic character, in contrast to simple circuits, in which the attention is focused on the steady states. Moreover, RLC circuits broaden the universe of study from electricity to electromagnetism, and allow connections with other physics subjects. For instance, one may explore the analogy between the spring-mass system and the mechanical resonance phenomenon, turning out the teaching of electromagnetism more attractive to the students, and hopefully more meaningful to them.

¹ We generically called RLC circuits, circuits of type RC, RL, LC and RLC.

Three studies of students' learning difficulties on RLC circuits (Eylon and Ganiel, 1990; Greca and Moreira, 1998; Thacker, Ganiel and Boys, 1999) and some new possibilities of theoretical and experimental approaches (Faleski, 2006; Ross and Venugopal, 2006; Hellen and Lanctot, 2007; Magno, Araújo, Lucena, Montarroyos and Chesman, 2007) were found in the literature. However we did not find proposals regarding the use computational resources as an aid to overcome the students' difficulties with RLC circuits. This motivated us to start a project with this goal. The aim of this first study was to investigate possible benefits of the use of computer-based activities to help students to understand the dynamic behavior of the electromagnetic quantities involved in RLC. In this paper, results of a pedagogical experience made with engineering students of a Brazilian public university are presented.

PRIOR STUDIES

Among the various studies reported in the literature about the use of computer-based simulations in the teaching of physics, we outline three that deal with contents of electricity (Ronen and Eliahu, 2000; Finkelstein, Adams, Keller, Kohl, Perkins, Podolefsky and Reid, 2005; Zacharias, 2007).

Ronen and Eliahu (2000) developed a study to investigate the role of computer-based simulations as instructional resource to help students on filling the existing gap between theory and reality. The study involved two groups of students who performed two tasks: to draw a diagram of a real circuit and to build real circuits which would work according to certain specifications. One of the groups had at its disposal an open simulation environment to help them in the development of such tasks. Significant differences were found between the groups that solved the tasks with or without the simulations. The use of simulations contributed to improve their ability in designing and interpreting diagrams that represent real circuits, besides motivating and increasing the confidence of the students.

Finkelstein, Adams, Keller, Kohl, Perkins, Podolefsky and Reid (2005) investigated the possibility of substituting a computer simulation for real laboratory equipment in the teaching of simple electric circuits. The students who used computer-based simulations instead of laboratory equipments had better performance in the resolution of conceptual questions on simple circuits and, surprisingly, developed better ability of handling real components. In the same subject, Zacharias (2007) has shown that the integration between real experimentation and virtual experimentation in the teaching of simple electric circuits can favor a better conceptual understanding of the students in comparison to students who use only real experimentation.

Regarding learning difficulties in RLC circuits, we present in Table 1 a synthesis of the conceptual and reasoning difficulties that students usually have (Eylon and Ganiel, 1990; Greca and Moreira, 1998; Thacker, Ganiel and Boys, 1999). Also various misconceptions are pointed out in these references and summarized in Table 2.

LOOKING FOR A MEANINGFUL LEARNING

Our purpose in using computational simulations and modeling activities was to offer potential aid to help students achieve meaningful learning. According to Ausubel's theory (Ausubel, 2000), it occurs when the new information interacts – nonarbitrarily and nonverbatimly - with relevant anchoring ideas (*subsumers*) present on the individual's cognitive structure. Two basic conditions must be satisfied for meaningful learning: i) the student must have in his/her cognitive structure appropriate subsumers and ii) the learner should present a disposition to link the new material to her/his cognitive structure in a substantive and nonarbitrary way.

Regarding the first condition, the learning material developed has close connection with the subject learned before in the course and specially takes into account difficulties commonly experienced by students in learning RLC circuits pointed out in the literature. For the second condition, we tried to motivate the students with computer-based activities. At the end, to check whether the students had in fact achieved meaningful learning instead of rote learning, we applied conceptual multiple choice tests and open-ended questions rather than quantitative re-hashes of homework-type problems.

Table 1 – Synthesis of the usual students difficulties in the study of RLC circuits (Eylon and Ganiel, 1990; Greca and Moreira, 1998; Thacker, Ganiel and Boys, 1999).

	Concepts	Difficulties
RC Circuits	Electric current	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Understand that during the processes of charging and discharging the electric current magnitude decays exponentially. ▪ Take into account the spatial conservation of the electric current.
	Electric charge	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Understand the charging and discharging processes of the capacitor. ▪ Understand the relation between electric charge and electric current.
	Potential difference	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relate the potential difference across the capacitor to the amount of charge stored and the potential difference across the resistor to the magnitude of the electric current.
LC and RLC Circuits	Electric charge and electric current	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relate the magnitude of the electric current to the amount of electric charge stored in the capacitor in terms of time. ▪ Identify the direction of the magnetic field lines in the inductor during the processes of charging and discharging of the capacitor.
	Electromagnetic field	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Understand the behavior of the electric, magnetic and electromagnetic energies during a complete oscillation.

Table 2 – Typical misconceptions that students have in the study of RLC circuits (Eylon and Ganiel, 1990; Greca and Moreira, 1998; Thacker, Ganiel and Boys, 1999).

Students...
<p>... think that the current is consumed when passing through an electric resistance (Thacker, Ganiel and Boys, 1999).</p> <p>... believe that in an RC circuit:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) the electric current is constant in both sides of the capacitor, as long as the potential provided by the battery and the electric resistance remain constant (Eylon and Ganiel, 1990); b) the magnitude of the electric current is zero, because the capacitor represents a break in the circuit (Eylon and Ganiel, 1990; Thacker, Ganiel and Boys, 1999); c) when the capacitor is completely charged the electric current will remain constant and non-zero (Eylon and Ganiel, 1990); d) the order of the elements matters (Thacker, Ganiel and Boys, 1999); e) the electric charges jump from one plate of the capacitor to the other (Thacker, Ganiel and Boys, 1999); <p>... mechanically reproduce the bar graphs which are in the textbook on the stored energies in a LC circuit, not being able to represent even the direction of the magnetic field lines in the inductor during a complete oscillation (Greca and Moreira, 1998).</p> <p>... develop a mechanical reasoning based on formulae, not wondering about what physically happens in RLC circuits (Greca and Moreira, 1998; Thacker, Ganiel and Boys, 1999).</p>

RESEARCH METHODS

The research question was: can the use of computational simulation and modeling make students have a better conceptual understanding of the dynamic behavior of the electromagnetic quantities involved in RLC circuits in comparison to the understanding of students only exposed to traditional teaching?

The study took place during the teaching of RLC circuits in the Physics II-C course (electricity and magnetism for engineering students) offered by the Department of Physics of the Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil, during the second semester of 2005, in a total of four classes of 1h40min each.

Research design

We decided for a quantitative evaluation with a conceptual multiple choice initial and final tests, and a qualitative evaluation, having as basis the responses given by the students in the printed guides collected at the end of the classes, and in a question of an examination at the end of the course. To evaluate how the students feel about the computer-based activities, we planned to collect written testimonies after the end of the course via electronic mail.

The study was developed according to a non-equivalent control group research design (Campbell and Stanley, 1963) shown in Table 3, because there was no possibility to random assignment. The experimental group was formed by a class with 26 students, and 31 students of two other classes were taken to compose the control group. All classes used the same textbook and performed the same lab experiments.

Table 3. Research quasi-experimental design

	Design
Experimental group	$O_1 X O_2$
Control group	$O_1 O_2$
O_1 initial test; O_2 final test; X computer-based activities	

Instructional materials

We chose software Modellus because “the user can write mathematical models, almost always the same way as he would on paper” (Teodoro, Vieira and Clérigo, 2007) facilitating the construction of computer-based models by the students themselves. Another important aspect is that Modellus allows the interaction of the students with the computer-based models in real time, allowing, also, the observation of multiple (conceptual) experiments simultaneously (Teodoro, 1998).

Based on the learning difficulties presented in section II (Table 1), we established the objectives to be achieved by the students after the teaching of RLC circuits (Table 4) and we designed three computer-based simulation activities and one modeling² activity in order to help them to achieve these objectives³.

In our models, representing RLC circuits, as usual, we assume that the resistors are ohmic, the conductive wires and the batteries have negligible electric resistance. The first computer-based simulation activity performed by the students on an RC circuit is illustrated in Figure 1 and described in Table 5. In order to explain the behavior of the curve in the graph charge versus time shown in Figure 1 – in which the capacitance was suddenly decreased, when the capacitor was near to its maximum charge – the students must perceive that: i) before this change the potential differences across the capacitor and in the battery is almost the same; ii) when the capacitance is suddenly decreased the potential in C turns out greater than the potential difference provided by the battery; iii) the electric potential of the capacitor plate with charge +q becomes greater than the electric potential of the positive terminal of the battery and the electric potential of the plate with charge –q becomes smaller than the electric potential in the negative terminal of the battery and iv) this changes to the opposite side the direction of the

² We call simulation activities those activities in which the student has autonomy to insert initial values to the variables and to modify parameters, but do not have autonomy to change the core of the computational model modifying the most basic elements, iconic and mathematical, which constitute it. In computational modeling, besides being able to act upon the variation of initial parameters and values, the student has access to the basic elements. He/she can also build his/her own computational models and create ways to represent them.

³ Available at: <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/circuitos>.

electric current in the circuit and yield a discharging process in the capacitor until the electric potentials in the capacitor and in the battery becomes the same again.

The third simulation questioned about the behavior of the electromagnetic energy in a series RLC circuit, without battery but with the capacitor fully charge at the beginning. All the students previewed that electromagnetic energy would decay exponentially with time. However, when interacting with the computer-based simulations students perceived differences between the expected exponential decay and the observed energy dissipation curve (Figure 2). The simulation also gives to them the possibility to change the position of a switch – to open and close the circuit – and to vary the value of R. By analyzing, then, the electric, magnetic and electromagnetic energy as function of time the students were able to associate the “plateau” observed on the energy dissipation curve to the moments of zero electric current in the RLC circuit and progressively they were able to explain it. To some students the analogy with a mechanical system – a projectile vertically thrown with air resistance – contributed to a better understanding of this.

Details of the expressive activity of computational modeling are shown in Table 5. The students were free to actually change the mathematical models to reflect different models of the behavior of the RL circuit components. We expected that the students would write in Modellus, typically, what is in Figure 3, and create cursors that would allow changing the values of R and L continually⁴.

The instructional material includes printed guides for the students designed to be used according to the POE (Predict, Observe, Explain) method proposed by White and Gunstone (Tao and Gunstone, 1999; Zacharias, 2005). Initially the students are asked to predict the dynamic behavior of some electromagnetic quantity involved in the RLC circuit presented in the computer screen. Next, they have the possibility to interact with the computational resource in order to generate results to observe what effectively happens, and then they are asked to explain the divergences and convergences between what was predicted and what effectively happened.

Table 4 – Objectives to be achieved by the students in the study of RLC circuits.

Given a	The student should...
RC circuit	<ol style="list-style-type: none"> 1. understand the charging and discharging processes of the capacitor; 2. notice that the magnitude of the electric current decays exponentially with time during the charging and discharging processes of the capacitor; 3. grasp that the electric current is not consumed along the circuit; 4. grasp that the magnitude of the potential difference: <ol style="list-style-type: none"> a) in R, is proportional to the magnitude of the electric current and b) in C, is proportional to the amount of stored charge in the capacitor;
RL circuit	<ol style="list-style-type: none"> 5. be able to notice that the magnitude of the electric current in the circuit does not reach its maximum value immediately;
LC circuit	<p>... be able to</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. interpret the dynamical behavior of the amount of charge stored in the capacitor; 7. interpret the dynamical behavior of the magnitude of the electric current; 8. grasp the dynamical behavior of the electric field between the plates of the capacitor to the magnitude of the electric current; 9. grasp the dynamical behavior of the magnetic field in the inductor to the amount of electric charge stored in the capacitor;
LC or RLC circuit	<ol style="list-style-type: none"> 10. be able to notice the dynamical behavior of the electric, magnetic and electromagnetic energies

⁴ In case the students have not yet created any models that involve differential equations before, one may, as we have done, give them a model for the RC circuit, so that they understand and modify it in such a way to turn it adequate for a RL circuit.

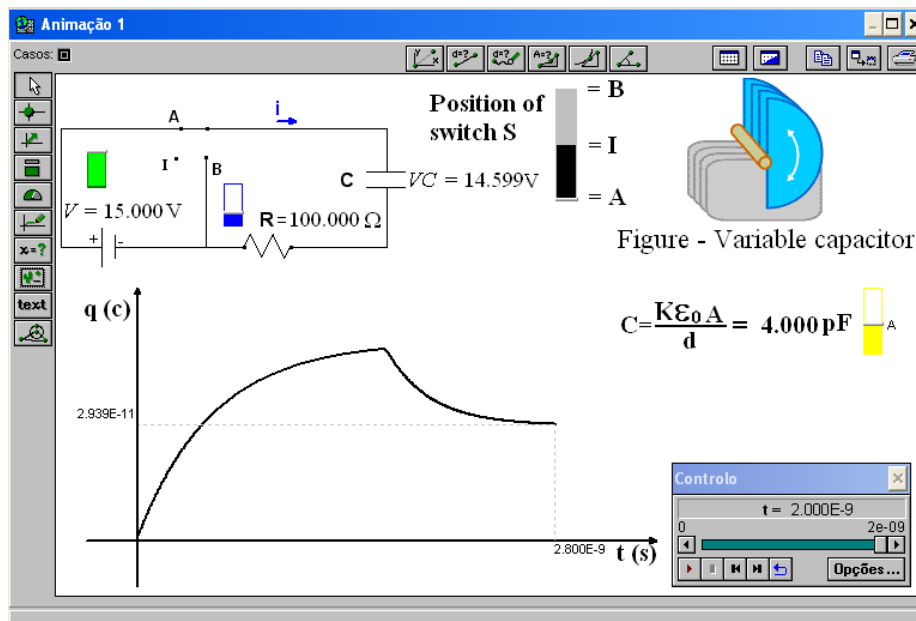


Figure 1 – Illustrative screen of an activity performed by the students.

Table 5 – Details of a computer-based simulation on a RC circuit.

General description	Running the simulation, the charging of the capacitor begins and the graph charge versus time is drawn, allowing for the student to study the dynamical behavior of the amount of electric charge stored in the capacitor when changing the capacitance of the capacitor C , the potential difference provided by the battery and the electric resistance in resistor R (Figure 1). It is also possible to observe the <u>discharging</u> of the capacitor when changing the position of switch I .
Activity goals	Given a RC circuit the student must: <ul style="list-style-type: none"> - understand the behavior of the charge on the capacitor when it is charging and discharging; - be able to physically describe the graph of the amount of charge stored in the capacitor versus time, when the potential difference provided by the battery or the capacitance of the capacitor are suddenly altered during the charging process of the capacitor; - notice that the magnitude of the electric current decays exponentially with time during the <u>processes of charging and discharging</u> of the capacitor.
Concepts	Electric charge, electric current, electric resistance, potential difference and capacitance.
Questions proposed to the students	Attention: answer items “a and b” before running the model. Consider that the capacitor C is being charged. <ol style="list-style-type: none"> a) Sketch the curve which represents the charge of the capacitor in terms of time for a situation in which the potential difference provided by the battery V is suddenly: <ol style="list-style-type: none"> i) increased ii) reduced, when capacitor C is in the beginning of the charging process iii) reduced, when capacitor C is close to its maximum charge. b) Sketch the curve which represents the charge of the capacitor in terms of time to a situation in which the capacitance of the capacitor is suddenly: <ol style="list-style-type: none"> i) increased ii) reduced, when capacitor C is being charged iii) reduced, when capacitor C is close to its maximum charge. <p>In this model it is possible to vary the electric resistance of resistor R, the</p>

	<p>potential difference provided by the battery V and the capacitance of capacitor C by altering the area A (through the respective rolling bars close to them).</p> <p>c) Run the simulation, and manipulate values V and C trying to create the graphs drawn in items “a and b”. Explain the differences between the graphs observed and the ones predicted by your, in case there was a difference.</p> <p>d) What happens to the variation rate of the amount of charge $q(t)$ stored in the capacitor during the process of charging (switch I in position A) in a situation in which the electric resistance in R is suddenly: i) increased ii) reduced.</p> <p>e) Sketch the graphs of the variation rate of the amount of charge $q(t)$ stored in the capacitor during the processes of charging and discharging. Which physical quantity this variation represents?</p>
--	--

The activities require constant interaction of the students with the computer, of the students among themselves and, occasionally, with the teacher. The interaction with the simulations occur with the use of “scroll bars” and “buttons”, as well as by changing the initial values and/or the value of some parameter of the model.

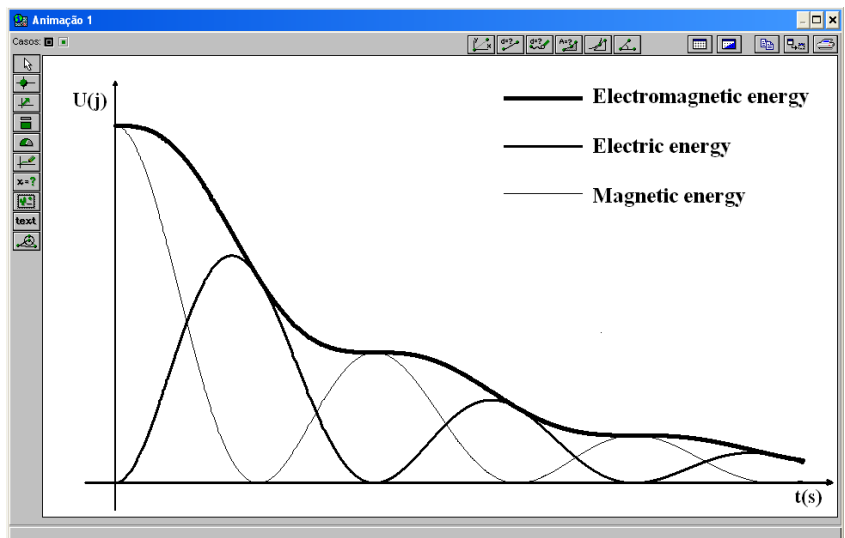


Figure 2 – Screen of a computer-based simulation representing an RLC showing the electromagnetic, magnetic, and electric energies as a function of time.

Table 6 – Details of the computer-based modeling activity proposed to the students

General description	In this activity we provide the mathematical equations which constitute a computational model of an RC circuit (Figure 3), in order to help students to construct a computational model of an RL circuit that represents the behavior of the electric current, of the inductance and of the potential difference across the resistor and across the inductor as a function of time
Objectives of the activity	Given an RL circuit the student should be able to: <ul style="list-style-type: none"> - notice that the magnitude of the electric current in the circuit does not reach its maximum value immediately; - identify the dynamical behavior of the magnitude of the electric current and of the potential difference across R and L, as well as the inductance L.
Concepts	Electric current, potential difference and inductance
Questions proposed to the students	<p>a) the model window shown in Figure 3 is one of a model of an RC circuit. Based on it, build a model of an RL circuit.</p> <p>b) Insert in the Animation window of the model built, a bar to vary the inductance in the inductor L. Afterwards, discuss the alterations in the electric current and in the potential difference across R and in L when altering the inductance in L.</p>

The screenshot shows a window titled "Modelo" with a toolbar containing mathematical symbols like x^n , \sqrt{x} , π , e , Δx , $x \sim$, and $\ln x$, along with an "Interpretar" button. The main area contains the following equations:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{E}{R} - \frac{q}{C \times R}$$

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$VR = i \times R$$

$$VC = \frac{q}{C}$$

Figure 3 – Mathematical model for the RC circuit written in Modellus.

Procedures

During the four classes of this study the students of the experimental group worked with the computer-based activities in pairs in a computer laboratory, with one PC per pair. We started each class with a brief theoretical exposition (less than 30 min) about the most important concepts involved in the activities to be worked and, in the remaining time, the students interacted with the computational resources to answer questions formulated as driven queries or ‘challenges’ in the printed guides. At the end of each class, the students were asked to hand back just one answered guide per pair, for evaluation purposes. From the second class on, before the theoretical exposition, we coordinated a discussion with all the students about the activity worked in the previous class.

The students from the control group were exposed to the traditional expositive classes. Both groups, also, had traditional experimental classes.

Instruments

The purpose of an initial test for experimental and control groups was to serve as a covariate in the analysis of the final test results. We chose a conceptual test about simple electric circuits consisting of 13 multiple-choice questions designed by Silveira, Moreira and Axt (1989). Content validity was established by a group of physics teachers when the test was created and we applied it to 110 engineering students from UFRGS in 2005 to obtain the reliability coefficient of the instrument (Cronbach’s alpha), resulting in 0.85. See appendix for a sample of the test’ items.

None of the studies mentioned in section II presented a diagnostic test to evaluate whether the students had scientific conceptions on electromagnetic quantities typical of RC, RL, LC and RLC circuits. Then, based on the difficulties pointed out in the literature (Eylon and Ganiel, 1990; Greca and Moreira, 1998; Thacker, Ganiel and Boys, 1999), we constructed and validated another test with 17 items. In the appendix, we are showing, as examples, two items of this test. Each item has five alternatives, one of which is coherent with scientific conceptions, while the other four might be coherent with misconceptions or mistaken reasoning that students usually commit regarding these circuits (Table 1). The test was previously examined by a group of four physics teachers experts in the subject to obtain content validity, and then applied to 110 engineering students from UFRGS intending to calculate the reliability coefficient of the instrument, which resulted in 0.80. After this study, we developed a new version (version 1.1) and applied it to 137 students to recalculate the Cronbach alpha coefficient, which resulted in 0.81. The test ended up with 15 items.

RESULTS AND DISCUSSION

Data has been collected with the application of the initial test (Silveira, Moreira and Axt, 1989) on simple electric circuits on the first day of classes of the course and the final test at the last day of the course. The comparison between the experimental and the control groups in these tests are shown in

Table 7. As there is a difference between these mean scores, with statistical significance level measured through the t-test as $p < 0,001$, we carried out an analysis of the Variance and Covariance – NOVA/ANCOVA (Finn, 1997) – using as covariable the data collected with the initial test (Silveira, Moreira and Axt, 1989). The adjusted means in the final test for experimental and control groups are also shown in Table 7.

Table 7– Comparison of mean score between experimental and control groups in the initial and final tests. The last three columns show the adjusted means.

Group	Initial test (13 items)			Final test (15 items)					
	Mean total score	Standard deviation	Right answer %	Mean total score	Standard deviation	Right answer %	Adjusted mean final test	F	Statistical Significance level
Exper.	4.8	2.2	37%	12.4	1.5	82%	12.7	21.90	0.000
Control	7.0	2.1	54%	9.5	3.2	63%	9.2		

Based in these results we concluded that the performance on the conceptual test of the students who worked with the computer-based activities (experimental group) was better than the performance of the students who were submitted only to traditional teaching (control group).

In order to attempt to probe the details of the reasoning students were using, we analyze students' written responses. Here we comment just the results of this analysis for a question of the exam, namely a question related to a sudden reduction of the potential difference across the capacitor, shown in Fig.1, which is propitious for a conceptual reasoning. The responses of the 26 students were analyzed by two of us and were categorized according to the kind of argument that they used: conceptual or formula based one. The students (except two) used qualitative arguments instead of formula based one, and most of them (15 in 26) got the correct answer to this question with correct reasoning. It seems to us that the computer-based activities fostered a conceptual reasoning instead of the rote use of formulae, which is very common in our students.

Another important result is that during the classes we observed that in order to answer the conceptual questions presented in the printed material, the students from the experimental group interacted constantly with the computational resources to generate and test their hypothesis. They also interacted among each other either to find a consensual answer among them all or to help a classmate having difficulty. This certainly contributed in the understanding of the students of the dynamic behavior of physical quantities present in the RLC circuits. Below are two samples of students' statements about the experimental treatment:

“In the simulations it was possible to change the circuits' parameters and see what happened instantaneously. This ended up illustrating the situation, which was good for the understanding, specially of graphs.” (Student 9).

“I positively outline the greater understanding of the subjects approached in class, which become much clearer during the computer-based classes and the interactivity that these classes promote, bringing the student closer to physics” (Student 3).

Based on our class notes and on the opinion of the students about the experiment, we believe that in the present study we promoted situations capable of stimulating the interaction and the engagement of students to their own learning, making the classroom environment into a privileged space for active and meaningful learning.

CONCLUSIONS

Much research has been done to investigate the learning of simple electric circuits however there is a lot to be done with respect to the learning of RLC circuits. We propose to approach this subject using

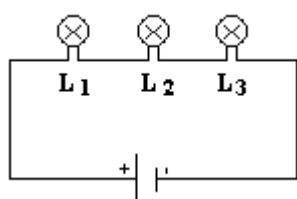
computer-based activities (simulation and modeling ones) as a potential aid to help students to achieve a meaningful learning of the dynamical behavior of the circuits. The quantitative results on a conceptual test show that there was statistically significant difference in the performance of the students who worked with the computer in comparison to the performance of the students who were exposed only to the traditional teaching. The analysis of the students' written responses to open-ended questions shows that most of the experimental group students got the correct answer with correct reasoning. Then, the answer to the research question is yes, the use of computational simulation and modeling can promote a better students' conceptual understanding of the dynamic behavior of the electromagnetic quantities involved in RLC circuits in comparison to that of students only exposed to traditional teaching. However there is a limitation for this conclusion: it is not possible to disentangle the effects of i) working with the computer-based activities; ii) increasing students' interactions with themselves and with the teacher, and iii) making the students active subjects of their own learning.

Anyway, the results shown in this paper seem encouraging to us, and we have as future perspective to develop a study with the objective of investigating the integration between the proposed computer-based activities and experimental ones.

Appendix.

Sample test items about simple circuits (Silveira, Moreira and Axt, 1989)

The circuit shown in Figure 1, R is a resistor, and L_1 and L_2 represents light bulbs. In this circuit:

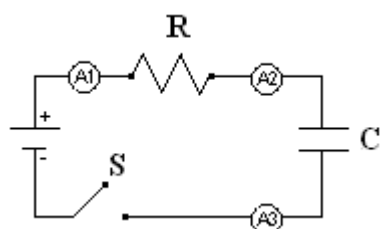


- a) L_1 e L_2 have the same brightness.
- b) L_1 brights more than L_2 .
- c) L_2 brights more than L_1 .

Figure 1

Sample test items about RLC circuits.

1) The circuit shown in Figure 2 is made of a resistor R, a capacitor C initially discharged, an electric switch S and three ammeters (A1, A2 and A3). When closing switch S, which of the alternatives best represents the magnitude of the electric current i_1 , i_2 and i_3 measured in the ammeters, while the capacitor is being charged?



- a) $i_1 = i_2 > i_3$
- b) $i_1 > i_2 > i_3$
- c) $i_1 = i_2 > (i_3 = 0)$
- d) $i_1 = i_2 = i_3 = 0$
- e) $i_1 = i_2 = i_3 \neq 0$

Figure 2

2) In the circuit of Figure 3, R is a resistor, C a capacitor initially discharged and S an open electric switch. When closing the switch, one can state that while the capacitor is being charged, the potential difference magnitude across R:

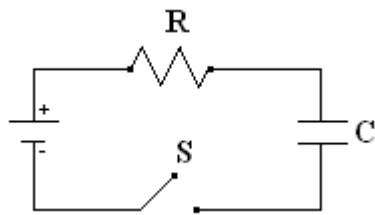


Figure 3

- a) remains zero.
- b) increases.
- c) is the same as the one provided by the battery.
- d) reduces.
- e) is the same as the potential difference across C.

REFERENCES

- Ausubel, D. P. (2000). *Acquisition and retention of knowledge: A cognitive view*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Campbell, D. T. and Stanley, J. C. (1963). *Experimental and quasi-experimental designs for research on teaching*. In N. L. Gage (Ed.), *Handbook of research in teaching* (pp. 171-246). Chicago: Rand McNally.
- Cohen, R., Eylon, B. S. and Ganiel, U. (1983). Potential difference and current in simple electric circuits: a study of students' concepts. *American Journal of Physics*, 51(5), 407–412.
- Duit, R. and Rhöeneck, C. V. (1998). Learning and understanding key concepts in electricity. In A. Tiberghien, Jossem, E., Barojas, J. (Ed.), *Connecting research in physics education* (pp. 1-10). Ohio: ICPE Books.
- Engelhardt, P. V. and Beichner, R. J. (2004). Students' understanding of direct current resistive circuits. *American Journal of Physics*, 72(1), 98-115.
- Eylon, B. S. and Ganiel, U. (1990). Macro-micro relationship: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. *International Journal of Science Education*, 12(1), 79-94.
- Faleski, M. C. (2006). Transient behavior of the driven RLC circuit. *American Journal of Physics*, 74(5), 429-437.
- Finkelstein, N. D., Adams, W. K., Keller, C. J., Kohl, P. B., Perkins, K. K., Podolefsky, N. S. and Reid, S. (2005). When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 1(1), 010103-1 010103-8.
- Finn, J. D. (1997). *Analysis of variance and covariance.*, Pergamon, Cambridge.
- Greca, I. M. and Moreira, M. A. (1998). Modelos mentales y aprendizaje de Física en electricidad y magnetismo. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(2), 289-303.
- Hellen, H. E. and Lanctot, M. J. (2007). Nonlinear damping of the LC circuit using antiparallel diodes. *American Journal of Physics*, 75(4), 326-330.
- Magno, W. C., Araújo, A. E. P., Lucena, M. A., Montarroyos, E. and Chesman, C. (2007). Probing a resonant circuit with a PC sound card. *American Journal of Physics*, 75(2), 161-162.
- Mcdermott, L. C. and Shaffer, P. S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, 60(11), 994-1003.

Ronen, M. and Eliahu, E. (2000). Simulation - a bridge between theory and reality: the case of electric circuits. *Journal of Computer Assisted Learning*, 16(1), 14-26.

Ronen, M. and Eliahu, E. M. (1999). Simulation as a home learning environment - student's views. *Journal of Computer Assisted Learning*, 15(4), 258-268.

Ross, R. and Venugopal, P. (2006). On the problem of (dis)charging a capacitor through a lamp. *American Journal of Physics*, 74(6), 523-525.

Shaffer, P. S. and Mcdermott, L. C. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part II: design of instructional strategies. *American Journal of Physics*, 60(11), 1003-1013.

Silveira, F. L., Moreira, M. A. and Axt, R. (1989). Validação de um teste para verificar se o aluno possui concepções científicas sobre corrente elétrica em circuitos simples. *Ciência e Cultura*, 24(11), 1129-1133.

Tao, P. K. and Gunstone, R. F. (1999). The process of conceptual change in force and motion during computer-supported physics instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(7), 859-882.

Teodoro, V. D. (1998). From formulae to conceptual experiments: interactive modelling in the Physical Sciences and in Mathematics. *International CoLos Conference New Network-Based Media in Education*, Maribor, Slovenia.

Teodoro, V. D., Vieira, J. P. and Clérigo, F. C. (2007). *Modellus*, interactive modelling with mathematics. Available at: <http://poenix.sce.fct.unl.pt/modellus>.

Thacker, B. A., Ganiel, U. and Boys, D. (1999). Macroscopic phenomena and microscopic processes: student understanding of transients in direct current electric circuits. *American Journal of Physics*, 67(7), S25-S31.

Zacharia, Z. C. (2005). The impact of interactive computer simulations on the nature and quality of postgraduate science teachers' explanations in physics. *International Journal of Science Education*, 27(14), 1741-1767.

Zacharia, Z. C. (2007). Comparing and combining real and virtual experimentation: an effort to enhance students' conceptual understanding of electric circuits. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(2), 83-169.

Zacharia, Z. C. and Anderson, R. (2003). The effects of an interactive computer-based simulation prior to performing a laboratory inquiry-based experiment on students' conceptual understanding of physics. *American Journal of Physics*, 71(6), 519-640.

Simulação e modelagem computacionais no auxílio à aprendizagem significativa de conceitos básicos de eletricidade. Parte II - circuitos RLC

(Computational modelling and simulation activities to help a meaningful learning of electricity basic concepts.
Part II - RLC circuits)

Pedro F.T. Dorneles¹, Ives S. Araujo e Eliane A. Veit

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Recebido em 21/11/2006; Revisado em 14/2/2008; Aceito em 12/6/2008; Publicado em 18/9/2008

Neste artigo analisamos o comportamento da energia eletromagnética em circuitos do tipo RLC. Discutimos as principais dificuldades dos alunos na aprendizagem de conceitos básicos envolvidos neste tipo de circuito e apresentamos dois produtos oriundos de um trabalho de pesquisa: i) um conjunto de atividades de simulação e modelagem computacionais, propostas com o software *Modellus*, levando em conta tais dificuldades, com o objetivo de auxiliar o aluno a superá-las e ii) um teste sobre a compreensão de conceitos físicos envolvidos em circuitos RLC.

Palavras-chave: simulação computacional, modelagem computacional, concepções alternativas, circuitos RLC, energia eletromagnética, ensino de física.

In this paper we analyze the behavior of electromagnetic energy in RLC circuits, discussing the main student's difficulties on basic concepts involved and presenting two products originated in a research work: i) a set of computational modelling and simulation activities, developed with the software *Modellus*, taking into account such difficulties to help students to surpass them and ii) a test about the understanding of physics concepts involved in RLC circuits.

Keywords: computational modelling, computational simulation, misconceptions, RLC circuits, physics instruction.

1. Introdução

“Vivemos hoje na era da informação”. Talvez nenhuma outra área da física tenha contribuído tanto quanto o eletromagnetismo para tornar verdadeira essa afirmativa. Aparelhos telefônicos, televisores, rádios, computadores e uma vasta diversidade de outros dispositivos eletro-eletrônicos exemplificam, com muita propriedade, diversas aplicações tecnológicas interessantes do conhecimento sobre fenômenos eletromagnéticos. Grosso modo, compreender cientificamente hoje o mundo que nos cerca passa pela compreensão básica destes fenômenos.

Dentre os diversos tópicos interessantes de serem abordados nesse contexto, o estudo do comportamento dinâmico de circuitos RLC é um dos que mais se destaca. Seja como ponto de partida para um estudo mais aprofundado sobre o fenômeno de ressonância - fundamental para o entendimento de vários outros fenômenos mecânicos, acústicos e eletromagnéticos - ou mesmo

para o funcionamento dos aparatos tecnológicos mencionados anteriormente (tais como os sintonizadores presentes em aparelhos de rádio e televisão). Uma compreensão adequada do funcionamento de circuitos RLC pode servir como fonte de motivação e interesse para o aprendizado do eletromagnetismo e também como conhecimento relevante para aprendizagens futuras.

Tendo isso em mente, buscamos no presente trabalho realizar um apanhado das principais dificuldades de aprendizagem que os alunos manifestam em relação ao entendimento de circuitos RLC e apresentar um conjunto de atividades de simulação computacional, visando a superação destas dificuldades. O foco dessas atividades está na compreensão do comportamento dinâmico apresentado por grandezas físicas relevantes nesse tipo de circuito. Além destes objetivos, apresentamos também um teste elaborado para avaliar o grau de compreensão sobre o conteúdo alcançado pelos alunos.²

¹E-mail: pdorneles@if.ufrgs.br.

²O desenvolvimento das atividades computacionais e do referido teste foi efetuado dentro do contexto de uma pesquisa em ensino de física realizada pelo primeiro autor deste trabalho, para sua dissertação de mestrado [1].

Como indicado no título do próprio artigo, o presente trabalho compõe a segunda parte da divulgação de uma abordagem de ensino voltada para o estudo de circuitos elétricos. Na primeira parte [2], foram abordados apenas circuitos simples, suas dificuldades de compreensão e as atividades computacionais desenvolvidas. Optamos pela divisão em duas partes, por entendermos que, apesar da similaridade teórica e metodológica existente entre os materiais desenvolvidos, a inexistência de um teste na literatura sobre circuitos RLC, a falta de um apanhado das principais dificuldades enfrentadas pelos alunos e a discussão sobre materiais que permitam a explicitação do comportamento dinâmico de variáveis associadas ao circuito RLC sejam especialmente úteis aos professores ao abordar o conteúdo.

Na próxima seção discutiremos o comportamento da energia eletromagnética em um circuito RLC sem fonte, porque, apesar de sua importância, esse tópico não costuma ser abordado apropriadamente em vários livros de física geral. Nas seções posteriores apresentamos um breve relato dos principais trabalhos de pesquisa sobre as dificuldades na aprendizagem de circuitos RLC, o material didático e o teste desenvolvidos. Ao final temos comentários gerais sobre o trabalho realizado.

2. Energia eletromagnética em um circuito RLC em série sem fonte

A aprendizagem de circuitos elétricos do tipo RLC, no nosso entender, necessariamente deveria incluir a compreensão do comportamento dinâmico da energia eletromagnética. Porém, alguns livros de física geral como: Serway e Jewett [3], Tipler e Mosca [4] e Young *et al.* [5] sequer abordam este tópico e outros, por exemplo, Halliday *et al.* [6] e Nussenzveig [7] limitam a discussão a situações em que a resistência é muito pequena (amortecimento fraco). Nesse caso, consideram que a frequência angular de oscilação de um circuito RLC é aproximadamente igual à frequência angular de oscilação de um circuito LC (sem resistência) e concluem que a energia eletromagnética em circuitos RLC decai exponencialmente com o tempo. No entanto, é bem conhecido que a dissipação de energia no circuito é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente elétrica e que esta varia senoidalmente com o tempo. Então, a dissipação de energia deve apresentar máximos e mínimos, coincidentes com os máximos e mínimos da intensidade de corrente elétrica. De particular interesse nessa discussão qualitativa são os instantes de tempo em que a intensidade de corrente elétrica é nula e, portanto, também a dissipação de energia é nula. Esses instantes devem corresponder a pontos em que a derivada da curva da energia eletromagnética em função do tempo é nula e pode-se prever que esta curva tenha qualitativamente a forma mostrada na Fig. 1, apresentando patamares em torno desses instantes. No caso em que a resistência é muito pequena, como considerado

por Halliday *et al.* [6] e Nussenzveig [7], há pouca dissipação de energia durante uma oscilação completa, os patamares se tornam imperceptíveis e tem-se um decaimento exponencial na medida em que o tempo tende a infinito. Porém, por que não discutir situações em que a resistência não é tão pequena? Consideramos oportuno explorar essa questão e para isso passamos a descrever quantitativamente a energia eletromagnética no circuito apresentado na Fig. 2.

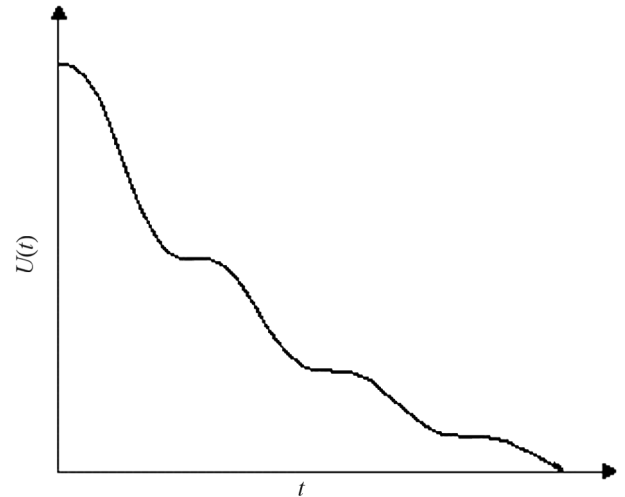


Figura 1 - Comportamento da energia eletromagnética $U(t)$ em função do tempo (t) em circuitos RLC.

Neste circuito, R representa um resistor, C um capacitor, L um indutor e I uma chave interruptora. Vamos desprezar efeitos de radiação e a resistência elétrica dos fios condutores e do indutor, e considerar o resistor ôhmico.

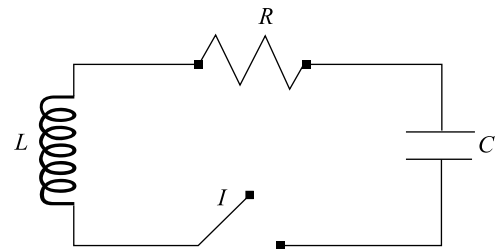


Figura 2 - Circuito RLC em série.

Para expressar a energia eletromagnética $U(t)$ em termos da resistência elétrica (R) do resistor, da indutância (L) do indutor e da capacitância (C) do capacitor, partimos da expressão para a energia elétrica armazenada no capacitor ($U_E(t)$), que é proporcional ao quadrado da quantidade de carga elétrica ($q(t)$) armazenada no capacitor, e da energia magnética armazenada no indutor ($U_B(t)$), que é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente elétrica ($i(t)$) no circuito, conforme mostra a Eq. (1) [7].

$$U(t) = U_E(t) + U_B(t) = \frac{1}{2C}q^2(t) + \frac{1}{2}Li^2(t). \quad (1)$$

Vamos admitir que o capacitor do circuito mostrado na Fig. 2 está inicialmente carregado. A partir do instante em que o interruptor é fechado ($t = 0$), a energia eletromagnética no circuito não permanecerá constante, em decorrência da dissipação de energia no resistor na forma de calor (efeito Joule). A taxa de variação de energia eletromagnética no circuito terá, então, a forma

$$\frac{dU(t)}{dt} = -i^2(t) R. \quad (2)$$

Derivando a Eq. (1) em relação ao tempo, substituindo na Eq. (2) e expressando a intensidade da corrente elétrica pela quantidade de carga elétrica que atravessa uma seção reta do resistor por unidade de tempo, encontramos a equação diferencial que descreve o comportamento da quantidade de carga armazenada no capacitor

$$L \frac{d^2q(t)}{dt^2} + R \frac{dq(t)}{dt} + \frac{1}{C} q(t) = 0. \quad (3)$$

Esta equação diferencial possui três tipos de soluções gerais

$$\text{i) } \left(\frac{R}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC}, \quad \text{circuito subamortecido} \quad (4)$$

$$\text{ii) } \left(\frac{R}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}, \quad \text{circuito criticamente} \quad (5)$$

amortecido,

$$\text{iii) } \left(\frac{R}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC}, \quad \text{circuito superamortecido.} \quad (6)$$

Como é de nosso interesse analisar o comportamento da energia armazenada no circuito durante várias oscilações, vamos nos deter no caso subamortecido, onde R é pequeno, mas não necessariamente muito pequeno, como suposto por Halliday *et al.* [6] e Nussenzveig [7]. Consideremos que os valores de R, L e C , sejam tais que a expressão

$$R < \sqrt{\frac{4L}{C}} \quad (7)$$

seja válida, mas não tão pequenos que tornem possível a seguinte aproximação, usada nas Refs. [6, 7]

$$\left(R - \sqrt{\frac{4L}{C}}\right) \approx -\sqrt{\frac{4L}{C}}. \quad (8)$$

Para este caso, subamortecido, a solução geral da Eq. (3) é

$$q(t) = A e^{-\frac{R}{2L} t} \cos(\omega t + \phi), \quad (9)$$

onde ω , frequência angular de oscilação do circuito, tem a forma

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}. \quad (10)$$

Lembrando que a intensidade da corrente elétrica no circuito pode ser expressa pela quantidade de carga elétrica que atravessa uma seção reta do resistor por unidade de tempo, a solução geral para a intensidade da corrente elétrica é

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -A e^{-\frac{R}{2L} t} \left[\frac{R}{2L} \cos(\omega t + \phi) + \omega \sin(\omega t + \phi) \right]. \quad (11)$$

As soluções particulares dependem das condições iniciais. Para o problema em discussão não há corrente no circuito no instante inicial, pois o interruptor é fechado neste instante, e o capacitor está inicialmente carregado. Então, $q(0) = q_0$ e $i(0) = 0$ e encontramos a constante de fase ϕ e a constante de integração A

$$\phi = \arctan\left(-\frac{R}{2L\omega}\right), \quad (12)$$

e

$$A = \frac{q_0}{\cos(\phi)}. \quad (13)$$

Então a solução particular é dada por

$$q(t) = \frac{q_0}{\cos(\phi)} e^{-\frac{R}{2L} t} \cos(\omega t + \phi) \quad (14)$$

e

$$i(t) = -\frac{q_0}{\cos(\phi)} e^{-\frac{R}{2L} t} \left[\frac{R}{2L} \cos(\omega t + \phi) + \omega \sin(\omega t + \phi) \right]. \quad (15)$$

As Eqs. (14) e (15), respectivamente, representam as oscilações de carga e de corrente em circuitos RLC, onde observa-se que essas grandezas físicas variam senoidalmente com o tempo, diferentemente dos circuitos simples, em que a intensidade da corrente elétrica atinge um valor estacionário. Para analisarmos qualitativamente estas oscilações inicialmente vamos apresentar a principal característica de um circuito que contém um indutor. Um indutor em um circuito elétrico se opõe às variações da intensidade de corrente elétrica no circuito. Sendo assim, em um circuito LC ou RLC nunca ocorrem saltos na intensidade de corrente elétrica no circuito. Então, no instante em que o interruptor é fechado ($t = 0$), no circuito mostrado na Fig. 2, o capacitor começa a se descarregar e o módulo da intensidade da corrente elétrica irá tender para um valor máximo. No instante em que o capacitor estiver totalmente descarregado a corrente elétrica será máxima e tenderá a zero, mas não imediatamente, devido ao indutor. Como a corrente continuará no mesmo sentido,

o capacitor começará a ser carregado com polaridade invertida. Quando a intensidade de corrente elétrica for nula o capacitor estará totalmente carregado e terá se passado meia oscilação. Então ele voltará a se descarregar e a intensidade da corrente elétrica irá começar a crescer até atingir um máximo. Neste instante o capacitor estará totalmente descarregado. Novamente a corrente elétrica será máxima e tenderá a zero. Então, o capacitor começará a carregar-se e quando a corrente for nula no circuito o capacitor estará totalmente carregado e com a mesma polaridade inicial. Neste instante terá se passado uma oscilação completa. Se a resistência elétrica no circuito fosse desprezível estas oscilações permaneceriam infinitamente, mas neste caso em que há resistência elétrica as oscilações de carga e de corrente elétrica estarão presentes no circuito até o instante em que a energia eletromagnética for diferente de zero.

Encontradas as expressões para $q(t)$ e $i(t)$, finalmente podemos nos deter no comportamento das energias em um circuito RLC sem fonte subamortecido. Usando as Eqs. (14) e (15) encontramos as energias elétrica (U_E) e magnética (U_B), dadas por

$$U_E = \frac{1}{2C} \frac{q_0^2}{\cos^2(\phi)} e^{-\frac{R}{L}t} \cos^2(\omega t + \phi) \quad (16)$$

e

$$U_B = \frac{1}{2} \frac{Lq_0^2}{\cos^2(\phi)} e^{-\frac{R}{L}t} \left[\left(\frac{R}{2L} \right)^2 \cos^2(\omega t + \phi) + \frac{R\omega}{L} \cos(\omega t + \phi) \sin(\omega t + \phi) + \omega^2 \sin^2(\omega t + \phi) \right]. \quad (17)$$

Substituindo as Eqs. (16) e (17) na Eq. (1), chegamos à expressão geral para a energia eletromagnética U

$$U = \frac{1}{2} \frac{q_0^2}{\cos^2(\phi)} e^{-\frac{R}{L}t} \left[\frac{4L + R^2}{4LC} \cos^2(\omega t + \phi) + R\omega \cos(\omega t + \phi) \sin(\omega t + \phi) + \omega^2 L \sin^2(\omega t + \phi) \right]. \quad (18)$$

Para visualizar graficamente esta expressão, geramos com o *Modellus* o gráfico apresentado na Fig. 3, correspondente ao caso em que $R = 1,5 \text{ k}\Omega$, $C = 0,10 \text{ }\mu\text{F}$, $L = 3,46 \text{ H}$ e $q_0 = 2,20 \text{ }\mu\text{C}$ onde se verifica que o perfil da curva coincide com o previsto na Fig. 1. Também são mostradas as contribuições para a energia elétrica no capacitor e a energia magnética no indutor, podendo-se observar que os patamares na energia eletromagnética ocorrem em torno dos pontos em que a energia elétrica armazenada no capacitor é máxima e, como consequência, a energia armazenada no indutor é nula, conforme previsto.

Conforme mencionado anteriormente, nos dois livros de física geral que localizamos abordando este

tema, estes patamares não são mencionados, provavelmente porque a discussão se limita a valores de resistência que satisfazem a Eq. (8), e neste caso a variação da energia, numa boa aproximação, decai exponencialmente. Por exemplo, no Halliday *et al.* [6], 5ª ed., consta a seguinte expressão para a energia eletromagnética

$$U = \frac{q_0^2}{2C} e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (19)$$

Nas edições mais atuais desse livro, a Eq. (19) foi retirada, mas consta na 7ª ed. que: "...a energia do campo magnético oscila de acordo com um termo proporcional ao quadrado do seno e que a energia total diminui exponencialmente com o tempo." [8, p. 298]. Que, no caso geral de subamortecimento, a energia total em um circuito RLC não diminui exponencialmente, acabamos de demonstrar. Quanto à energia magnética, é verdade que a Eq. (17) pode ser escrita em termos do quadrado da função seno, porém com argumento distinto do que aparece na energia elétrica (Eq. (16)). Especificamente, tem-se

$$U_B = \frac{1}{2} \frac{Lq_0^2\omega^2}{\cos^4(\phi)} e^{-\frac{R}{L}t} \sin^2(\omega t). \quad (20)$$

De modo que a soma da energia elétrica e magnética não se reduz a uma dependência exponencial com o tempo, como ocorre no caso de amortecimento fraco.

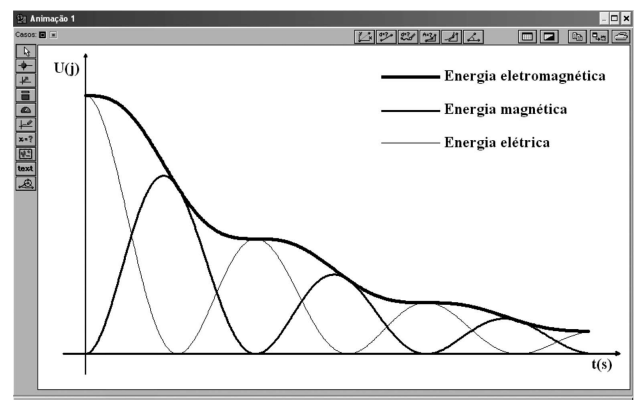


Figura 3 - Gráfico das energias eletromagnética, elétrica e magnética em função do tempo em um circuito RLC subamortecido com os seguintes valores para os parâmetros: $R = 1,50 \text{ k}\Omega$, $C = 0,10 \text{ }\mu\text{F}$, $L = 3,46 \text{ H}$ e $q_0 = 2,20 \text{ }\mu\text{C}$.

O circuito RLC é tradicionalmente comparado com o sistema mecânico massa-mola [3-9], no que diz respeito, por exemplo, à equação diferencial que o descreve, ao comportamento das soluções, às componentes das energias envolvidas (elétrica e magnética em um caso, cinética e potencial no outro). Estranha-nos que não costume ser feita semelhante comparação no caso da energia eletromagnética total armazenada no sistema. Na verdade, não localizamos nenhuma referência em que esta comparação seja feita, e tampouco alguma referência que discuta os patamares na dissipação da

energia eletromagnética para um sistema subamortecido. Para o sistema oscilante mecânico, os livros de Thornton e Marion [10] e Nussenzveig [11] discutem os patamares de energias que ocorrem nos instantes de tempo em que a velocidade do objeto que oscila é nula.

3. Revisão da literatura

Em nossa revisão da literatura [1], na qual buscamos estudos sobre circuitos que contenham resistores, capacitores e indutores (RLC³), encontramos seis publicações [9, 12-16], sendo que apenas quatro [12-14, 16] investigam a aprendizagem dos alunos. As demais se referem ao *ensino* desses circuitos, mas não focam a atenção na *aprendizagem dos alunos*. Mais recentemente constam algumas novas possibilidades de abordagens teóricas e experimentais para o ensino [17-20].

Nos estudos de Eylon e Ganiel [12] e Thacker *et al.* [16] foi investigado se os alunos são capazes de associar fenômenos macroscópicos que ocorrem em circuitos RC com processos microscópicos. No primeiro estudo, após o ensino destes circuitos, foi aplicado um teste constituído de quatro questões para 92 alunos, com o objetivo de identificar suas principais dificuldades de aprendizagem sobre o tema. Alguns alunos que responderam o teste foram entrevistados para explorar com maior detalhe a natureza dessas dificuldades e suas origens. Os autores verificaram que muitos alunos não utilizam os conceitos de corrente elétrica, carga elétrica e diferença de potencial em suas descrições dos processos microscópicos que ocorrem em circuitos elétricos. Então, desenvolveram um segundo estudo [16] em que buscaram identificar as concepções dos alunos sobre a relação entre fenômenos macroscópicos transientes em circuitos do tipo RC e os processos microscópicos que podem explicar estes fenômenos. Para tanto, compararam o desempenho de dois grupos de alunos universitários, que responderam um questionário. Um grupo, formado por 90 alunos, estudou por um texto tradicional,⁴ enquanto que o outro, formado por 29 alunos, usou um texto que enfatiza modelos de processos microscópicos.⁵ A partir da análise do desempenho dos dois grupos e também do estudo de Eylon e Ganiel [12], os autores concluem que o desempenho dos alunos, cuja instrução enfatizou o desenvolvimento de modelos de processos microscópicos, foi superior aos demais alunos. A partir de considerações qualitativas em suas análises, estes alunos foram capazes de desenvolver modelos conceituais coerentes para descrever suas observações. Já os alunos que estudaram pelo texto tradicional, foram capazes de resolver apenas problemas quantitativos que não exigiam mais do que a memorização de fórmulas e a manipulação algébrica adequada de algumas equações. Esse resultado está de acordo com os

resultados encontrados nos estudos de Greca e Moreira [13, 14], cujo principal objetivo não foi o ensino de circuitos RLC e sim investigar o entendimento dos alunos sobre o conceito de campo eletromagnético quando resolvem problemas e questões teóricas. Em uma questão teórica sobre um circuito RLC, vários alunos que passaram apenas pelo ensino tradicional, foram capazes de apresentar somente afirmações soltas, como por exemplo: “Bueno, este é um circuito RLC, não sei o que se passa. Tendo as fórmulas, alguma deve me servir” [13]. Para Greca e Moreira [14] os alunos trabalham com “a articulação da estrutura matemática do eletromagnetismo”, sem o objetivo de entender o que ocorre fisicamente.

Segundo Eylon e Ganiel [12] a ausência de uma integração entre fenômenos macroscópicos e processos microscópicos impede que os alunos desenvolvam a capacidade de tratar um circuito elétrico como um sistema. Temos também como objetivo propor aos alunos uma metodologia de ensino que propicie o desenvolvimento de raciocínios sistêmicos. Para isso, no entanto, não estamos investindo na integração entre fenômenos macroscópicos e processos microscópicos e sim propondo atividades computacionais que possibilitem aos alunos a interação com representações dinâmicas de circuitos RLC visando um melhor entendimento sobre o comportamento das grandezas macroscópicas presentes nesses circuitos.

4. Dificuldades de aprendizagem de circuitos RLC

A seguir analisaremos as principais dificuldades de aprendizagem identificadas nestes estudos [12-14, 16] apontando semelhanças e diferenças em relação às dificuldades observadas na aprendizagem de circuitos simples, que sintetizamos em trabalho anterior [2].

4.1. Dificuldades conceituais e concepções alternativas

Uma das concepções alternativas mais freqüentes na aprendizagem de circuitos simples é conceber que *a corrente elétrica em um circuito elétrico é consumida* ao percorrer um caminho em que há resistência elétrica [2]. Essa concepção também se manifestou no estudo realizado por Thacker *et al.* [16] sobre a aprendizagem de circuitos RC. Questionados sobre a intensidade da corrente elétrica nos amperímetros A1 e A2 mostrados na Fig. 4, apenas 50% dos 90 alunos que usaram o texto tradicional responderam que a intensidade de corrente elétrica em A1 é a mesma que em A2. Esses resultados corroboram estudos anteriores [21-23] que mostram que

³Designamos genericamente como circuitos RLC, circuitos do tipo RC, RL, LC e RLC.

⁴D. Halliday; R. Resnick e J. Walker, *Fundamentals of Physics 3* (Wiley, Nova York, 1986).

⁵R. Chabay e B. Sherwood, *Electric and Magnetic Interactions* (Wiley, Nova York, 1995).

mesmo após o estudo de circuitos simples muitos alunos continuam apresentando a concepção alternativa sobre o consumo da corrente elétrica.

Outra das principais dificuldades dos alunos no estudo de circuitos simples é compreender que a intensidade da corrente elétrica não depende somente das características da fonte, mas também da resistência equivalente entre os seus terminais. No caso da aprendizagem dos circuitos RLC, os alunos apresentam, adicionalmente, dificuldades em entender o caráter dinâmico inerente ao comportamento das grandezas eletromagnética nestes circuitos, por exemplo, não são capazes de explicar porque durante os processos de carga e descarga de um capacitor em um circuito RC a intensidade da corrente elétrica no circuito decai exponencialmente com o tempo. Uma questão típica apresentada por Eylon e Ganiel [12] para identificar essa dificuldade, questiona como é o comportamento da corrente elétrica ao longo do circuito mostrado na Fig. 4, quando o interruptor I for fechado. As respostas incorretas de 20 alunos foram categorizadas e os autores verificaram que: i) 35% dos alunos consideraram que “o capacitor representa uma interrupção no circuito” e conseqüentemente o circuito permanecerá aberto e nenhuma corrente elétrica poderá fluir ($i_1 = i_2 = 0$);⁶ ii) 10% dos alunos *desconsideraram o efeito do capacitor completamente* e responderam que $i_1 = i_2 =$ constante, argumentando que “a diferença de potencial e a resistência elétrica são constantes”; iii) 25% dos alunos tiveram “dificuldades para analisar o efeito do capacitor no circuito”, respondendo que “quando o capacitor estiver completamente carregado, a corrente elétrica é constante e a resistência elétrica também” ou que “ i_1 decresce, pois $i = q/t$ ”; iv) 30% dos alunos adotaram uma “visão seqüencial do fluxo de corrente elétrica”, argumentando que a corrente elétrica pode fluir do terminal positivo da bateria até a placa B do capacitor, mas não pode atravessá-lo ($i_1 = 0$; $i_2 \neq 0$).

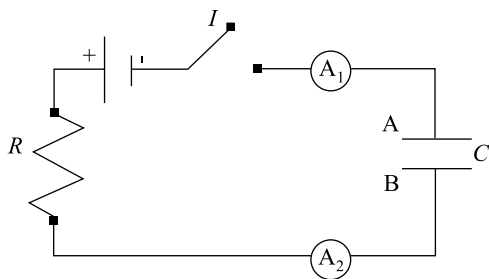


Figura 4 - Representação de um circuito RC, para verificar a compreensão dos alunos sobre o comportamento da corrente elétrica ao longo do circuito [12-16].

Segundo Thacker *et al.* [16] muitos alunos não são capazes de compreender os processos de carga e descarga de um capacitor em um circuito RC. Muitos alunos pensam que as cargas elétricas saltam de uma placa para a outra do capacitor ou consideram que a ordem dos elementos no circuito é relevante, argumentando que o capacitor carrega-se de carga elétrica que só pode fluir por uma parte do circuito.

Neste trabalho apresentamos exemplos de atividades computacionais que possibilitam uma visão mais imediata da medida de grandezas físicas envolvidas em circuitos RLC. Em qualquer instante de tempo os alunos podiam observar simultaneamente o comportamento da intensidade da corrente elétrica, da resistência elétrica, das diferenças de potencial ao longo do circuito e da quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor. Com isso, esperamos que os recursos computacionais possam auxiliá-los a compreender os efeitos transientes característicos desses circuitos.

4.2. Raciocínios errôneos

No estudo de circuitos simples os alunos têm a tendência de apresentar raciocínios locais e seqüenciais em vez de sistêmicos ou holísticos. Muitos alunos analisam partes do circuito sem se preocupar com o restante, não captam que uma alteração em um ponto qualquer do circuito provoca alterações instantaneamente ao longo do circuito [2]. No estudo de circuitos RLC estes raciocínios errôneos nem chegam a transparecer porque predomina o raciocínio mecânico, baseado unicamente em fórmulas [13, 14, 16]. Nesse caso o principal objetivo é encontrar as soluções particulares das equações diferenciais que descrevem o comportamento das grandezas físicas presentes nos circuitos em questão sem se aprofundar na sua interpretação conceitual. Um exemplo disso pode ser encontrado no estudo de Greca e Moreira [14], em que os alunos, ao descreverem o comportamento do campo elétrico no capacitor e o do campo magnético no indutor em um circuito LC durante uma oscilação completa, reproduzem mecanicamente as equações matemáticas e os gráficos de barra que estão no livro-texto, para as energias armazenadas em um circuito LC, mas não conseguem representar nem sequer o sentido das linhas de campo magnético no indutor durante uma oscilação completa.

Apresentamos na Tabela 1 uma síntese das dificuldades conceituais que os alunos usualmente apresentam [12-14, 16]. Nessas referências várias concepções alternativas e raciocínios errôneos foram identificados (Tabela 2).

⁶ i_1 é a corrente elétrica que passa pelo amperímetro A1 e i_2 é a corrente elétrica que passa por A2.

Tabela 1 - Síntese das principais dificuldades conceituais identificadas nas Refs. [12-14, 16].

	Conceitos	Dificuldades
Circuitos RC	Corrente elétrica	Compreender que durante os processos de carga e descarga a intensidade da corrente elétrica decai exponencialmente. Considerar a conservação espacial da corrente elétrica.
	Carga elétrica	Compreender os processos de carga e descarga do capacitor. Entender a relação entre carga elétrica e corrente elétrica.
	Diferença de potencial	Relacionar a diferença de potencial no capacitor com a quantidade de carga armazenada e a diferença de potencial no resistor com a intensidade de corrente elétrica.
Circuitos LC e RLC	Carga elétrica e corrente elétrica	Relacionar a intensidade da corrente elétrica com a quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor em função do tempo. Identificar o sentido das linhas de campo magnético no indutor, durante os processos de carga e descarga do capacitor.
	Campo eletromagnético	Compreender o comportamento das energias elétrica, magnética e eletromagnética, durante uma oscilação completa.

Tabela 2 - Síntese das principais concepções alternativas e raciocínios errôneos identificados nas Ref. [12-14, 16].

Os alunos ...
...pensam que a corrente se desgasta ao passar por uma resistência elétrica [16].
...acreditam que em um circuito RC:
a) a corrente elétrica é constante em ambos os lados do capacitor, desde que a diferença de potencial fornecida pela fonte e a resistência elétrica permaneçam constantes [12];
b) a intensidade de corrente elétrica é nula, pois o capacitor representa uma interrupção no circuito [12, 16];
c) quando o capacitor estiver totalmente carregado a corrente elétrica permanecerá constante e não-nula [12];
d) a ordem dos elementos importa [16];
e) as cargas elétricas saltam de uma placa para a outra do capacitor [16].
...reproduzem mecanicamente os gráficos de barra que estão no livro-texto, para as energias armazenadas em um circuito LC, não conseguindo representar nem sequer o sentido das linhas de campo magnético no indutor, durante uma oscilação completa [14].
...desenvolvem um raciocínio mecânico, baseado em fórmulas, sem se preocupar com o que ocorre fisicamente em circuitos RLC [13, 14, 16].

5. Estratégia didática e materiais instrucionais

Baseados nas dificuldades conceituais apresentadas na Tabela 1, estabelecemos objetivos a serem alcançados pelos alunos (Tabela 3) ao final do estudo de circuitos RLC. Para auxiliá-los a atingir tais objetivos, propusemos um conjunto de quatro atividades computacionais que requerem constante interação dos alunos entre si, com os recursos computacionais e com o professor, ao responderem questões conceituais presentes nos guias de cada atividade.

Para estimular a interatividade e o engajamento dos alunos em seu próprio aprendizado, concebemos os guias baseados em dois métodos de ensino que podemos denominar de método colaborativo presencial e PIE⁷ (Predizer, Interagir e Explicar) que estão relacionados com a dinâmica das aulas. O método colaborativo presencial está ancorado nos princípios de diferenciação progressiva e reconciliação integradora propostos por Ausubel [24] e consiste em abordar os conceitos físicos mais gerais envolvidos na matéria de ensino durante uma exposição inicial, de aproximadamente 30 min, para serem progressivamente diferenciados e reconci-

liados no restante da aula com a participação ativa dos alunos. Na primeira parte de cada aula aplicamos o princípio de conservação de energia no circuito a ser trabalhado durante a aula, buscando encontrar as equações diferenciais que descrevem o comportamento das grandezas físicas presentes no circuito e apresentamos as soluções particulares para cada grandeza. A seguir, os alunos trabalharam em pequenos grupos, duplas ou trios, para responderem as questões conceituais presentes no guia desenvolvido para cada atividade computacional, realizando, então, a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora dos conceitos físicos abordados. Nesse momento os alunos devem gradativamente captar o significado físico das soluções particulares das equações diferenciais apresentadas no início da aula. O método que denominamos de PIE consiste em os alunos inicialmente fazerem previsões sobre o comportamento das grandezas físicas presentes em um circuito elétrico representado em um diagrama. A seguir, os alunos interagem com a simulação computacional para gerar resultados, avaliar o que efetivamente ocorre e, finalmente, explicar as divergências e convergências de suas previsões em relação ao que foi observado.

⁷ Adaptado do método POE – Predizer, Observar e Explicar – proposto por White e Gunstone (*apud* Tao e Gunstone [25]).

Tabela 3 - Objetivos a serem alcançados pelos alunos ao final do ensino de circuitos RLC.

Dado um:	O aluno deverá ser capaz de:
Circuito RC	<ol style="list-style-type: none"> 1. descrever o comportamento da quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor durante os processos de carga e descarga; 2. descrever o comportamento da intensidade da corrente elétrica no circuito durante os processos de carga e descarga do capacitor; 3. entender que a corrente elétrica não é consumida ao longo do circuito; 4. descrever o comportamento das diferenças de potencial ao longo do circuito;
Circuito RL	<ol style="list-style-type: none"> 5. perceber que a intensidade de corrente elétrica no circuito não atinge seu valor máximo imediatamente e entender o porquê disso;
Circuito LC ou RLC	<ol style="list-style-type: none"> 6. interpretar o comportamento da quantidade de carga armazenada no capacitor em função do tempo; 7. interpretar o comportamento da intensidade da corrente elétrica em função do tempo; 8. relacionar o comportamento do campo magnético no indutor com a quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor em função do tempo; 9. relacionar o comportamento do campo elétrico entre as placas do capacitor com a intensidade de corrente elétrica do circuito em função do tempo; 10. perceber o comportamento das energias: elétrica, magnética e eletromagnética em função do tempo.

Atualmente não há um consenso na literatura sobre a distinção entre atividades de simulação e de modelagem computacional no ensino de física. No presente trabalho consideramos *atividades de simulação computacional* aquelas em que o aluno tem autonomia para inserir valores iniciais para variáveis, alterar parâmetros, mas não tem autonomia para modificar o cerne do modelo computacional, ou seja, acesso aos elementos mais básicos, matemáticos ou icônicos, que o constituem. Em atividades de *modelagem computacional*, além de poder atuar sobre a variação de parâmetros e valores iniciais, o aluno tem acesso a estes elementos básicos, podendo fazer alterações nos modelos computacionais previamente construídos ou construir seu próprio modelo. Há consenso na literatura quanto à classificação em atividades exploratórias, àquelas em que o aluno explora alguma simulação computacional construída por outro, e atividades expressivas, àquelas em que o aluno cria um modelo computacional, a partir de elementos básicos, matemáticos ou icônicos. Usamos como ferramenta para as atividades computacionais o software *Modellus* [26], de distribuição gratuita, por possibilitar que o aluno construa, reflita e interaja com representações analíticas, analógicas e gráficas de objetos matemáticos. A interface deste software é intuitiva, facilitando a interação dos alunos em tempo real, permitindo, também, observar múltiplos experimentos (conceituais) simultaneamente [2].

A série completa, contendo três atividades de simulação computacional e uma atividade de modelagem computacional, está disponível gratuitamente na internet [27]. Para cada atividade, são detalhados os objetivos a serem alcançados, os conceitos a serem trabalhados, uma descrição geral do modelo e os enunciados das questões propostas para os alunos (que se encontram nas janelas “Notas” de cada modelo). Em todos os circuitos considerados admitimos que os resistores são ôhmicos, os fios condutores e as fontes possuem resistência elétrica desprezível. Como ilustração das atividades propostas, discutimos a primeira sugerida aos

alunos e apresentamos, em detalhes, a terceira e quarta.

A primeira atividade trata-se de uma simulação computacional sobre um circuito RC, com um capacitor de capacitância variável (Fig. 5). Muitos alunos costumam apresentar previsões errôneas, não sendo capazes de traçar corretamente a curva que representa a carga do capacitor em função do tempo para uma situação em que a capacitância do capacitor C é repentinamente diminuída quando o capacitor está próximo de sua carga máxima. Durante a interação dos alunos com a simulação observa-se que gradativamente eles percebem que: i) antes da alteração em C o módulo da diferença de potencial no capacitor e entre os extremos da fonte eram praticamente iguais; ii) ao diminuir a capacitância a diferença de potencial em C torna-se maior do que a diferença de potencial fornecida pela fonte; iii) o potencial elétrico na placa do capacitor com carga elétrica $+q$ torna-se maior do que o potencial no terminal positivo da fonte e o potencial na placa com carga $-q$ fica menor do que o potencial no terminal negativo da fonte; iv) isto faz com que a corrente elétrica inverta de sentido no circuito e o capacitor descarregue até que as diferenças de potencial no capacitor e na fonte se igualem novamente.

Atividade III: trata-se de uma atividade expressiva de modelagem computacional sobre circuitos RL

a) Objetivos a serem alcançados: item 5 apresentado na Tabela 3.

b) Conceitos a serem trabalhados: corrente elétrica, diferença de potencial e indutância.

c) Descrição geral do modelo

Nesta atividade esperamos que os alunos escrevam na janela “Modelo” do *Modellus*, tipicamente, o que consta na Fig. 6 e na janela “Animação”, criem barras que permitam alterar o valor de L continuamente. Apesar de que desejaríamos que o aluno construísse o modelo computacional sem o nosso auxílio, nossa experiência com atividades expressivas mostra que eles

levam muito tempo, principalmente no caso em que não tenham anteriormente criado algum modelo que envolva equação diferencial. Para evitar isto, apresentamos um modelo computacional já construído de um circuito RC, para que o compreendam e o modifiquem de modo a torná-lo adequado para um circuito RL.

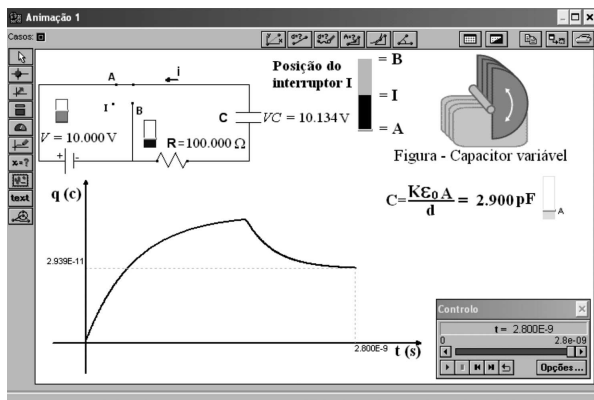


Figura 5 - Tela ilustrativa da janela “Animação 1” do modelo *cirRLC1.mdl*.

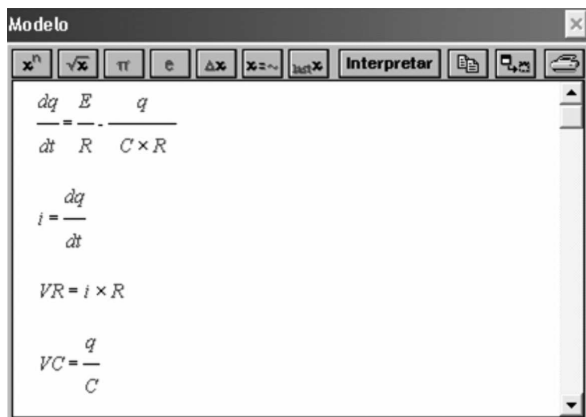


Figura 6 - Tela ilustrativa da janela “Modelo” mostrando as equações que representam um circuito RC

d) Enunciado das questões propostas aos alunos

- a) A janela “Modelo” mostrada na Fig. 6 é de um modelo de um circuito RC. Com base neste, construa um modelo computacional de um circuito RL (Fig. 7).
- b) Insira na janela Animação, do modelo construído, uma barra para variar a indutância no indutor L . Após discuta as alterações na corrente elétrica e na diferença de potencial em R e em L ao alterar a indutância em L .

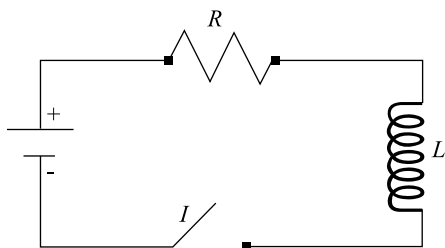


Figura 7 - Representação de um circuito RL.

Vários alunos ao alterarem a indutância do indutor inicialmente pensam que a intensidade de corrente elétrica máxima no circuito se modifica. Para esses alunos, sugere-se a inserção de mais duas barras de rolagem no modelo, para variar a resistência elétrica do resistor R e a diferença de potencial fornecida pela fonte, a fim de que, com uma visão mais geral do circuito, tenham melhores condições de captar que: i) a intensidade de corrente elétrica máxima no circuito não depende da indutância do indutor e sim apenas da diferença de potencial fornecida pela fonte e da resistência elétrica do resistor; ii) o indutor se opõe às variações de intensidade de corrente elétrica no circuito; iii) quanto maior (menor) a indutância maior (menor) será o tempo que a intensidade de corrente elétrica no circuito levará para se estabilizar.

Atividade IV: trata-se de uma atividade de simulação computacional exploratória, cuja tela principal é apresentada na Fig. 8

- a) **Objetivos a serem alcançados:** itens 6-10 da Tabela 3.
- b) **Conceitos a serem trabalhados:** carga elétrica, corrente elétrica, energia elétrica, energia magnética e energia eletromagnética.

c) Descrição geral do modelo

Ao executar o modelo computacional, o capacitor, que se encontrava totalmente carregado, inicia o processo de descarga. O aluno pode observar o comportamento dinâmico do circuito a partir dos valores das diferenças de potencial no capacitor C e no indutor L . Ou observar na janela “Animação” 1 (Fig. 8) ou na janela “Gráfico” (Fig. 9) os gráficos: das energias elétricas e magnéticas, da corrente elétrica, da quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor. Existe a possibilidade do circuito ser resistivo ou não, alterando o valor da resistência elétrica no resistor através da respectiva barra de rolagem próxima ao mesmo.

d) Enunciado das questões propostas aos alunos

Atenção: responda o item “a e b” antes de executar o modelo. Considere que o capacitor C esteja completamente carregado, quando o interruptor I é fechado em A.

- a) Esboce os seguintes gráficos:
 - i) quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor C em função do tempo;
 - ii) corrente elétrica em função do tempo;
 - iii) energia elétrica no capacitor C em função do tempo para uma situação em que a resistência elétrica em R é repentinamente:

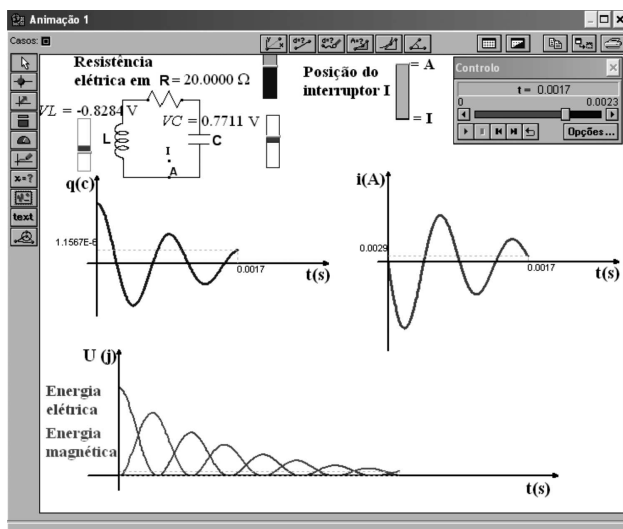


Figura 8 - Tela ilustrativa da janela “Animação 1” do modelo *cirRLC.mdl*.

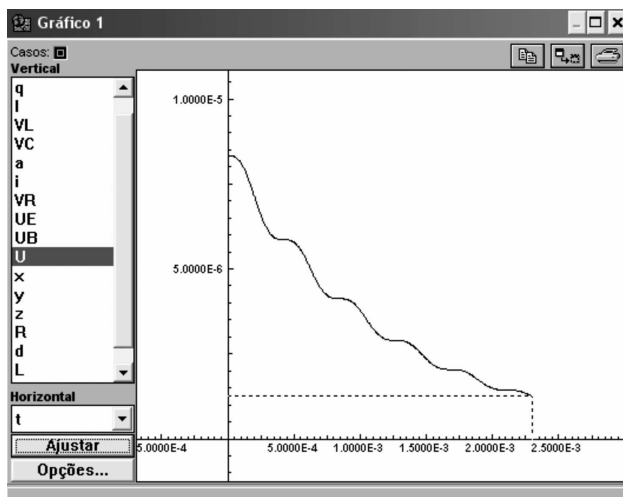


Figura 9 - Tela ilustrativa da janela “Gráfico” do modelo *cirRLC.mdl*, representando o comportamento da energia eletromagnética (U) no circuito, com resistência elétrica não-nula, em função do tempo (t).

- aumentada
- diminuída
- iv) energia magnética no indutor L em função do tempo para uma situação em que a resistência elétrica em R é repentinamente:

- aumentada
- diminuída

b) Em que condições não há conservação da energia eletromagnética. Por quê?

Neste modelo é possível variar a resistência elétrica do resistor R (através da barra de rolagem próxima ao mesmo).

c) Execute o modelo, se necessário manipule o valor de R de modo a criar os gráficos traçados nos itens “a” e “b”. Explique as diferenças entre os gráficos observados e os previstos por você, caso tenha havido alguma

diferença.

d) Qual o comportamento do campo magnético (B) no indutor nos intervalos de tempo em que a carga está aumentando? Explique.

e) Qual o comportamento do campo elétrico (E) entre as placas do capacitor nos intervalos de tempo em que a corrente elétrica está diminuindo? Explique.

Nesta simulação exploramos, principalmente, o comportamento da energia eletromagnética em um circuito RLC em série, sem fonte e com o capacitor inicialmente carregado. Quando trabalhamos esta simulação com os alunos, todos predisseram que a energia decaía exponencialmente com o tempo.⁸ Porém, quando interagiram com a simulação perceberam diferenças entre o decaimento exponencial e a curva de dissipação de energia observada na Fig. 3. Como resultado das discussões em grupo sobre o comportamento observado para as energias elétrica, magnética e eletromagnética em função do tempo, gradativamente a maior parte deles foi capaz de explicar os patamares presentes na curva de dissipação de energia, associando-os aos instantes de tempo em que a corrente elétrica é nula no circuito. Para muitos estudantes a analogia com um sistema massa-mola resistivo e com o movimento de um projétil lançado verticalmente com resistência do ar, contribuiu significativamente para o entendimento da questão.

6. Instrumento para avaliação da aprendizagem de circuitos RLC

Buscando desenvolver um instrumento de medida de conhecimento, capaz de avaliar o conhecimento dos alunos sobre circuitos RLC, construímos e validamos um teste, constituído por 17 itens, pois não encontramos na literatura nenhum outro que permitisse avaliar concepções científicas sobre o comportamento das grandezas eletromagnéticas típicas destes circuitos, por parte dos alunos. Todos os itens do teste possuem cinco alternativas, sendo que uma delas é coerente com as concepções científicas, enquanto as outras quatro podem ser coerentes com concepções alternativas ou com raciocínios errôneos que os alunos costumam apresentar sobre os circuitos em questão. Cada item do teste está relacionado com os objetivos a serem alcançados pelos alunos e com as atividades computacionais concebidas no presente estudo (Tabela 4). Por exemplo, o item 2 busca avaliar se os alunos captaram que a corrente elétrica não é consumida ao longo de um circuito (objetivo 3, Tabela 3) e os itens 3 e 4 avaliam se os alunos são capazes de descrever o comportamento das diferenças de potencial ao longo de um circuito RC (objetivo 4). Os conceitos físicos abordados nestes itens do teste (2-4) são explorados nas questões conceituais presentes no guia do aluno da Atividade II.

⁸Também vários professores universitários declararam que desconheciam a existência dos patamares de energia eletromagnética.

Tabela 4 - Relação entre os objetivos a serem alcançados pelos alunos ao passarem pelo ensino de circuitos RLC, os itens do teste e as atividades computacionais concebidas neste estudo.

Objetivos	Itens do teste	Atividades
1	1, 5, 7, 14	Atividade I
2	6, 8	
3	2	Atividade II
4	3, 4	
5	9	Atividade III
6	10	Atividade IV
7	11	
8	12	
9	13	
10	15-17	

Na elaboração do teste levamos em conta, além dos objetivos de aprendizagem (Tabela 3), duas características básicas de um instrumento de medida de conhecimento, relacionadas com a confiabilidade dos valores medidos, quais sejam, a validade [28] e a fidedignidade [29].

Com o objetivo de verificar se o teste pode ser considerado uma amostra representativa do conteúdo que desejamos medir, inicialmente, solicitamos o parecer de um grupo de quatro doutores em física da UFRGS, especialistas no assunto, sobre a relevância dos objetivos a serem medidos com o teste e a representatividade dos itens em relação ao ensino de circuitos RLC, satisfazendo assim a validação de conteúdo [28]. Posteriormente, para obter o coeficiente de fidedignidade e, se fosse o caso, identificar itens que deveriam ser excluídos por não se relacionarem satisfatoriamente com os demais, aplicamos o teste em 110 alunos de cursos de Engenharia da UFRGS, após o estudo de circuitos RLC. Esses alunos cursavam a disciplina de Física II-C (Eletromagnetismo) oferecida pelo Departamento de Física, no segundo semestre de 2004. Os resultados da aplicação do teste são apresentados na Tabela 5.

O coeficiente de fidedignidade de um teste refere-se à estabilidade, à reprodutibilidade, à precisão das médias com ele obtidas, isto é, ao grau de consistência dos valores medidos e pode ser estimado a partir do coeficiente alfa de Cronbach (Cronbach, 1951, *apud*. Moreira e Silveira [29]). Segundo Moreira e Silveira [29] o valor mínimo aceitável para um coeficiente de fidedignidade dependerá da utilização que se fará com os escores gerados pelo instrumento. Quando se deseja utilizar os escores gerados pelo instrumento para comparar grupos em médias, como no presente caso, pode-se tolerar coeficientes da ordem de 0,7. Logo o coeficiente alfa de 0,80 encontrado é satisfatório, mas como o item 8 possui uma baixa correlação com os demais decidimos desenvolver uma nova versão (versão 1.2, apresentada no Apêndice) que foi aplicada em 137 alunos de cursos de Engenharia da UFRGS que cursaram a disciplina Física II-C, no primeiro semestre de 2005, e o coeficiente alfa de Cronbach resultou em 0,81. Nesta nova versão todos os itens do teste obtiveram boa correlação com os demais e mantivemos a mesma relação com os

objetivos de aprendizagem e com as atividades computacionais que apresentamos na Tabela 4.

Tabela 5 - Coeficiente alfa, correlação item-total e coeficiente alfa se o item especificado na primeira coluna da tabela for eliminado do teste sobre circuitos RLC.

Item	Coeficiente $\alpha = 0,80$	
	Correlação item-total	Coef. α se o item for eliminado
1	0,44	0,78
2	0,26	0,80
3	0,48	0,78
4	0,48	0,78
5	0,35	0,79
6	0,51	0,78
7	0,44	0,78
8	0,06	0,81
9	0,22	0,80
10	0,53	0,78
11	0,53	0,78
12	0,49	0,78
13	0,31	0,79
14	0,30	0,79
15	0,46	0,78
16	0,35	0,79
17	0,47	0,78

7. Considerações finais

Circuitos envolvendo capacitores e indutores, além de resistores, abrem novas perspectivas no estudo do eletromagnetismo devido ao seu caráter inerentemente dinâmico. Enquanto a eletricidade governa os circuitos simples, com apenas resistores, circuitos RLC são regidos pelo eletromagnetismo, ampliando consideravelmente o espectro de aplicações tecnológicas, assim como o universo conceitual a ser explorado pelo aluno.

Tradicionalmente o ensino de circuitos RLC, em nível de física geral, é focado na solução de equações diferenciais e na interpretação de suas soluções sem a necessária ênfase nos aspectos conceituais. Como resultado, os alunos são capazes, com frequência, de resolver mecanicamente os problemas propostos, sem a adequada compreensão conceitual sobre o comportamento das grandezas físicas envolvidas [12-14, 16]. Repetese, assim, o quadro observado em relação ao estudo de circuitos simples: após a instrução, os alunos continuam cometendo erros conceituais gravíssimos, mesmo quando são capazes de fornecer a solução numérica correta para o problema [21-23]. As mais severas dificuldades enfrentadas no estudo de circuitos simples podem, então, voltar a aparecer no estudo de circuitos RLC [16, 21-23]. Desta forma, o ensino destes circuitos pode ser propício, também, para a retomada de conceitos básicos do eletromagnetismo, como a conservação de energia e de corrente elétrica.

Visando contribuir para a melhoria do ensino desse tópico, no presente trabalho apresentamos uma síntese das principais dificuldades de aprendizagem apresentadas pelos alunos no estudo de circuitos RLC, baseada em uma revisão da literatura, e um teste que permite

avaliar a compreensão dos alunos sobre este conteúdo. Acreditamos que estas contribuições podem, *per se*, auxiliar os professores que trabalham com o ensino desses circuitos. Adicionalmente, apresentamos uma série de atividades computacionais, concebidas para auxiliar os alunos na compreensão dos fenômenos dinâmicos presentes nos circuitos RLC, e esclarecemos as estratégias didáticas que adotamos na sua implementação. Tais atividades caracterizam-se pela interatividade dos alunos entre si, com o professor e com o material instrucional. O trabalho em pequenos grupos (2 ou 3 alunos) e a exigência de entrega, ao final da aula, de uma única cópia por grupo das questões respondidas, provoca o debate entre os alunos, forçando a negociação de significados, para que cheguem a uma resposta consensual, a ser entregue. Os resultados de uma investigação que realizamos em uma das aplicações deste material [30] mostram que houve melhorias estatisticamente significativas no desempenho dos alunos que trabalharam com as atividades computacionais (grupo experimental), em comparação com alunos expostos apenas ao ensino tradicional (grupo de controle). Sob o ponto de vista qualitativo, os alunos do grupo experimental

mostraram maior desenvoltura na capacidade de argumentação e maior disposição para um raciocínio conceitual, em vez de meramente se valerem de fórmulas. Esses resultados positivos não podem ser atribuídos, entretanto, somente ao uso dos recursos computacionais, pois a estratégia didática, fomentando grande interação dos alunos entre si e com o professor e monitores, é um fator importante que não pode ser isolado.

A título de conclusão, ressaltamos que ao propormos o uso de recursos computacionais no ensino de circuitos RLC não estamos excluindo o laboratório didático de física, pelo contrário, estamos buscando novas situações, complementares a ele, que propiciem aos alunos oportunidades de interação com representações dinâmicas, que favoreçam a exploração dos fenômenos de natureza dinâmica presentes nesses circuitos. Também estamos proporcionando situações que dificilmente seriam exploradas sem os recursos computacionais, como a variação da capacitância durante o processo de carga de um capacitor e a análise da dissipação de energia eletromagnética em um circuito RLC subamortecido.

Apêndice

Neste apêndice reproduzimos o teste sobre circuitos RLC versão 1.2.

Importante: não faça marcas nas folhas de questões Responda apenas na folha de respostas

Este teste é constituído por 17 questões de múltipla escolha com cinco alternativas. Dentre as alternativas escolha apenas uma, a que melhor responde à questão, assinalando-a na grade em anexo. Em todas as questões deste teste admite-se que os resistores são ôhmicos e os fios condutores e fontes possuem resistência elétrica desprezível.

1) No circuito da Fig. 1, R é um resistor, C um capacitor inicialmente carregado e I um interruptor aberto. Ao fechar o interruptor em B , pode-se afirmar que:

- a quantidade de carga armazenada no capacitor permanecerá constante com o tempo
- a quantidade de carga armazenada no capacitor aumentará com o tempo
- a capacitância do capacitor C aumentará com o tempo
- a quantidade de carga armazenada no capacitor diminuirá com o tempo
- a capacitância do capacitor C diminuirá com o tempo

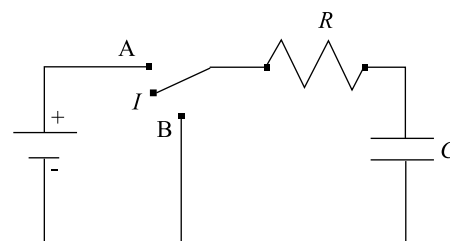


Figura 1 -

2) O circuito mostrado na Fig. 2 é formado por um resistor R , um capacitor C inicialmente descarregado, um interruptor I e três amperímetros (A_1 , A_2 e A_3). Ao fechar o interruptor I , qual das alternativas está de acordo com os valores das intensidades de corrente elétrica i_1 , i_2 e i_3 medidas nos amperímetros, enquanto o capacitor estiver sendo carregado?

- $i_1 = i_2 > i_3$
- $i_1 > i_2 > i_3$
- $i_1 = i_2 > (i_3 = 0)$
- $i_1 = i_2 = i_3 = 0$
- $i_1 = i_2 = i_3 \neq 0$

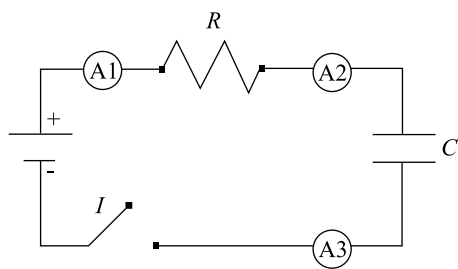


Figura 2 -

3) No circuito da Fig. 3, R é um resistor, C um capacitor inicialmente descarregado e I um interruptor aberto. Ao fechar o interruptor, pode-se afirmar que enquanto o capacitor estiver sendo carregado o módulo da diferença de potencial em R :

- a) permanece nulo
- b) aumenta
- c) é igual à fornecida pela fonte
- d) diminui
- e) é igual à diferença de potencial em C

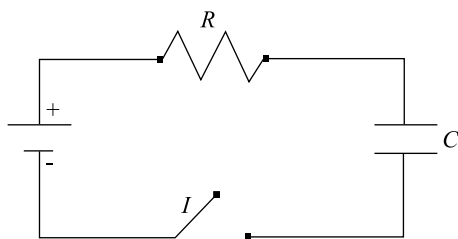


Figura 3 -

4) No circuito da Fig. 4, R é um resistor, C um capacitor totalmente carregado. O módulo da diferença de potencial entre os pontos 1 e 2 é:

- a) maior que a diferença de potencial entre os pontos 2 e 3
- b) igual à diferença de potencial entre os pontos 2 e 3
- c) nulo
- d) maior que a diferença de potencial entre os pontos 3 e 1
- e) igual à diferença de potencial entre os pontos 3 e 1

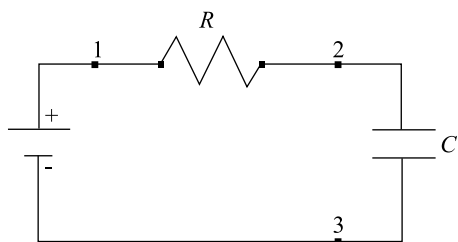


Figura 4 -

As questões 5 a 8 se referem ao circuito da Fig. 5.

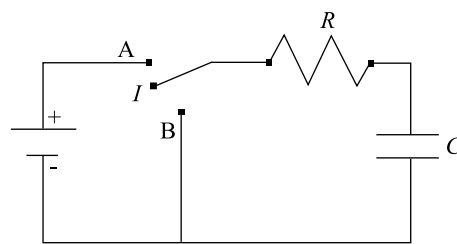


Figura 5 -

5) O capacitor C está inicialmente descarregado (interruptor I fechado na posição B). Ao fechar o interruptor I na posição A, qual das alternativas melhor representa o comportamento da quantidade de carga $Q(t)$ armazenada no capacitor em função do tempo?

- a) decai exponencialmente com o tempo
- b) decresce linearmente com o tempo
- c) aproxima-se linearmente com o tempo da quantidade de carga máxima que o capacitor C pode armazenar em suas placas, neste circuito
- d) mantém-se constante com o tempo
- e) aproxima-se exponencialmente com o tempo da quantidade de carga máxima que o capacitor C pode armazenar em suas placas, neste circuito

6) O capacitor C está inicialmente descarregado (interruptor I fechado na posição B). Ao fechar o interruptor I na posição A, qual das alternativas melhor representa o comportamento da corrente elétrica total do circuito em função do tempo $i(t)$?

- a) decai exponencialmente com o tempo
- b) decresce linearmente com o tempo
- c) cresce linearmente com o tempo
- d) mantém-se constante em um intervalo de tempo inicial e depois decai exponencialmente com o tempo
- e) cresce exponencialmente com o tempo

7) O capacitor C está inicialmente carregado (interruptor I fechado na posição A). Quando o interruptor I passa para a posição B, qual das alternativas melhor representa o comportamento da quantidade de carga $Q(t)$ armazenada no capacitor em função do tempo?

- a) diminui exponencialmente com o tempo
- b) decresce linearmente com o tempo
- c) cresce linearmente com o tempo
- d) aproxima-se exponencialmente com o tempo da quantidade de carga máxima que o capacitor C pode armazenar em suas placas, neste circuito
- e) cresce exponencialmente com o tempo

8) O capacitor C está inicialmente carregado (interruptor I fechado na posição A). Ao fechar o interruptor I na posição B, qual das alternativas melhor representa o comportamento da intensidade da corrente elétrica total do circuito em função do tempo $i(t)$?

- a) cresce linearmente com o tempo
- b) decresce linearmente com o tempo
- c) decai exponencialmente com o tempo

- d) mantém-se constante em um intervalo de tempo inicial e depois decai exponencialmente com o tempo
- e) cresce exponencialmente com o tempo

9) No circuito da Fig. 6, R é um resistor, L um indutor e I um interruptor. Ao fechar o interruptor, pode-se afirmar que:

- a) a corrente elétrica em R diminuirá linearmente com o tempo
- b) a corrente elétrica em R aumentará com o tempo até se estabilizar
- c) a corrente elétrica em R permanecerá constante com o tempo
- d) a corrente elétrica em R se comporta de modo semelhante ao que teríamos se houvesse um capacitor no lugar do indutor L
- e) a corrente elétrica em R se comporta de modo semelhante ao que teríamos se houvesse um resistor no lugar do indutor L

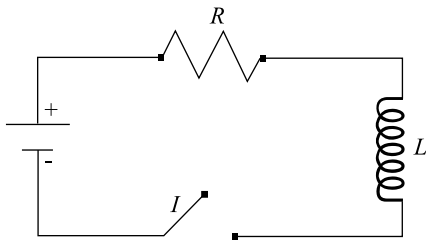


Figura 6 -

As questões 10 a 14 se referem ao circuito da Fig. 7.

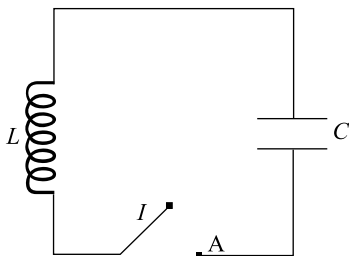
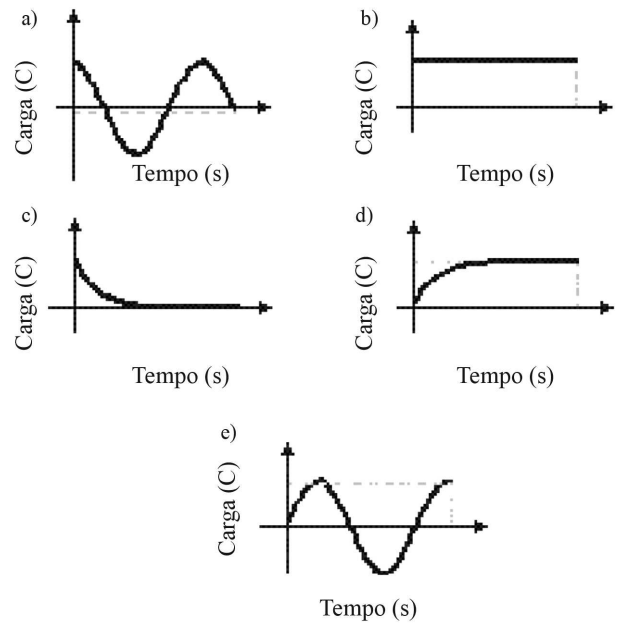
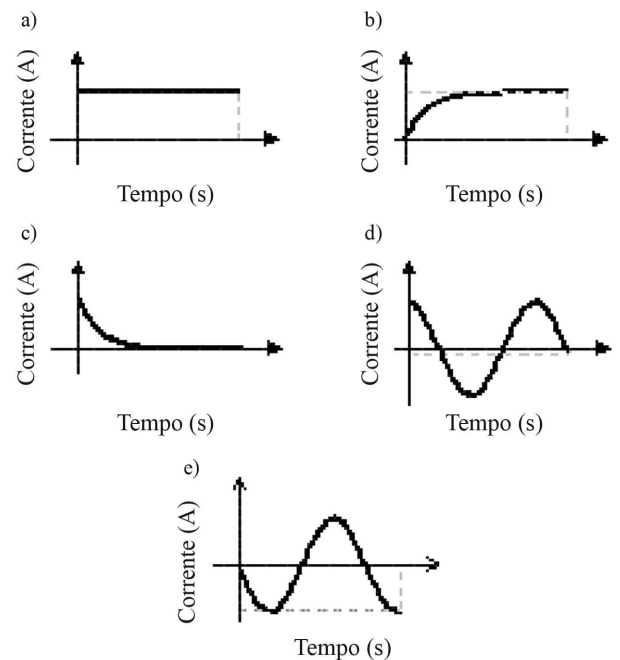


Figura 7 -

10) O capacitor C está inicialmente carregado. Qual gráfico representa a quantidade de carga $Q(t)$ armazenada no capacitor em função do tempo, quando I é fechado na posição A?



11) O capacitor C está inicialmente carregado. Qual gráfico poderia representar a corrente elétrica no circuito em função do tempo $i(t)$, quando I é fechado na posição A?



12) Quando a quantidade de carga armazenada no capacitor C estiver diminuindo com o tempo, qual das alternativas melhor representa o comportamento do campo magnético (B) no indutor L ?

- a) diminui com o tempo
- b) aumenta com o tempo
- c) mantém-se constante em um intervalo de tempo inicial e depois cresce com o tempo
- d) mantém-se constante em um intervalo de tempo inicial e depois decresce com o tempo
- e) mantém-se constante com o tempo

13) Quando a intensidade de corrente elétrica no circuito estiver aumentando com o tempo, qual das alternativas melhor representa o comportamento do campo elétrico (E) entre as placas do capacitor C ?

- a) mantém-se constante com o tempo
- b) mantém-se constante em um intervalo de tempo inicial e depois decresce com o tempo
- c) aumenta com o tempo
- d) diminui com o tempo
- e) mantém-se constante em um intervalo de tempo inicial e depois cresce com o tempo

14) O capacitor C é removido do circuito mostrado na Fig. 7, em um instante de tempo em que o mesmo se encontra totalmente carregado, e mantido isolado. Pode-se afirmar que:

- a) o capacitor C se descarregará imediatamente
- b) o capacitor C permanecerá carregado
- c) a diferença de potencial entre as placas do capacitor C será nula
- d) a carga líquida no capacitor C será não-nula
- e) o campo elétrico no capacitor C decrescerá exponencialmente com o tempo

As questões 15 a 17 se referem aos circuitos das Figs. 8.a e 8.b. Desprezando efeitos de radiação nestes circuitos, escolha a melhor alternativa.

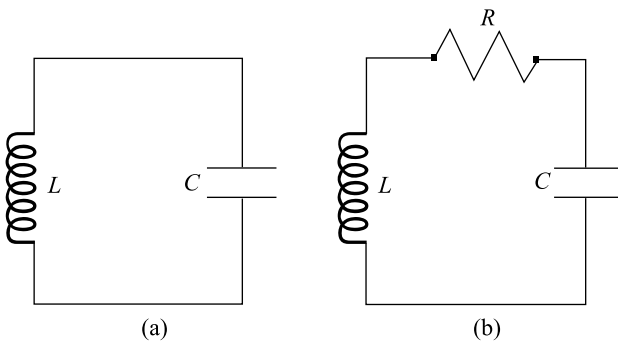
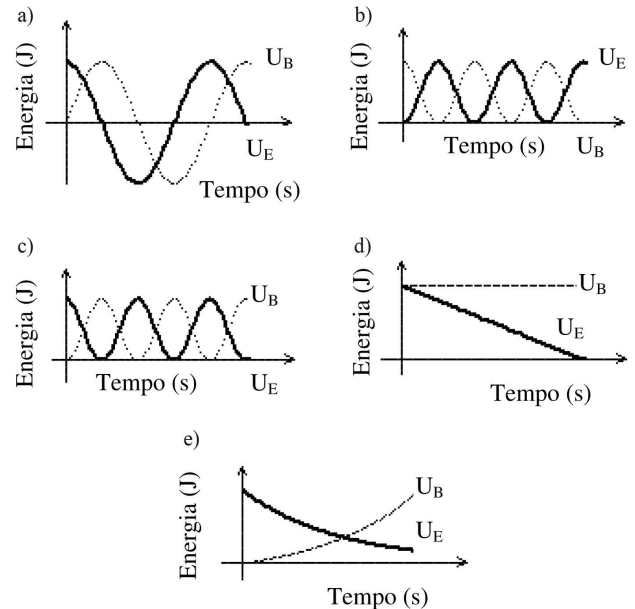


Figura 8 -

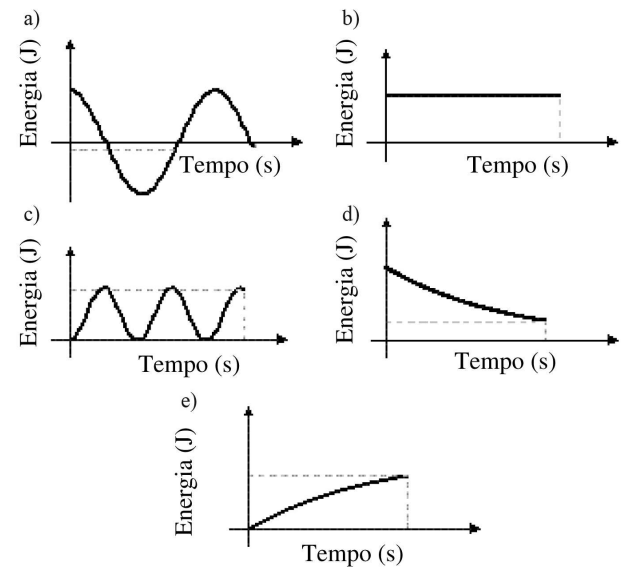
15) Nos circuitos mostrados nas Figs. 8.a e 8.b o capacitor C (inicialmente carregado) e o indutor L são exatamente os mesmos (R na Fig. 8.b é um resistor.). Pode-se afirmar que:

- a) a energia eletromagnética nos dois circuitos é conservada
- b) a energia eletromagnética do circuito mostrado na Fig. 8.a é conservada
- c) a energia eletromagnética do circuito mostrado na Fig. 8.b é conservada
- d) a energia elétrica em C do circuito mostrado na Fig. 8.a permanece constante
- e) a energia magnética em L do circuito mostrado na Fig. 8.a permanece constante

16) Qual gráfico representa a energia elétrica (U_E) no capacitor C e a energia magnética (U_B) no indutor L , no circuito mostrado na Fig. 8.a, considerando que em $t_0 = 0$ o capacitor encontra-se totalmente carregado?



17) Qual gráfico representa a energia eletromagnética, no circuito mostrado na Fig. 8.a ?



Agradecimentos

Agradecemos ao árbitro pelas críticas pertinentes, que provocaram nova versão do artigo. Trabalho parcialmente financiado pelo CNPq.

Referências

- [1] P.F.T. Dorneles, *Investigação de ganhos na aprendizagem de conceitos físicos envolvidos em circuitos elétricos por usuários da ferramenta computacional Modellus*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (2005).
- [2] P.F.T. Dorneles, I.S. Araujo e E.A. Veit, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 487 (2006).
- [3] R.A. Serway e J.W. Jewett, *Princípios de Física III - Eletromagnetismo* (Ed. Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2004), 1^a ed.
- [4] P.A. Tipler e G. Mosca, *Física: Para Cientistas e Engenheiros II - Eletromagnetismo* (Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2006), 5^a ed.
- [5] H.D. Young, F.W. Sears e M.W. Zemansky, *Física III: Eletromagnetismo* (Ed. Pearson Addison Wesley, São Paulo, 2004), 10^a ed.
- [6] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentals of Physics: Extended* (Ed. John Wiley & Sons, Nova York, 1997), 5^a ed.
- [7] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica 3 - Eletromagnetismo*, (Ed. Edgar Blucher, São Paulo, 1997), 1^a ed.
- [8] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física III - Eletromagnetismo* (Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2006), 7^a ed.
- [9] S. Krapas e A.M. Borges, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **15**, 47 (1998).
- [10] S.T. Thornton e J.B. Marion, *Classical Dynamics of Particles and Systems* (Ed. Brooks/Cole, Belmont, 2004), 5^a ed.
- [11] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica 2 - Fluidos - Oscilações e Ondas - Calor* (Ed. Edgar Blucher, São Paulo, 2002), 4^a ed.
- [12] B.S. Eylon e U. Ganiel, *International Journal of Science Education* **12**, 79 (1990).
- [13] I.M. Greca e M.A. Moreira, *Investigações em Ensino de Ciências* **1**, 95 (1996).
- [14] I.M. Greca e M.A. Moreira, *Enseñanza de las Ciencias* **16**, 289 (1998).
- [15] D.M. Redondo e V.L. Líbero, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **18**, 137 (1996).
- [16] B.A. Thacker, U. Ganiel e D. Boys, *American Journal of Physics* **67**, S25 (1999).
- [17] M.C. Faleski, *American Journal of Physics* **74**, 429 (2006).
- [18] H.E. Hellen e M.J. Lanctot, *American Journal of Physics* **75**, 326 (2007).
- [19] W.C. Magno, A.E.P. Araújo, M.A. Lucena, E. Montarroyos and C. Chesman, *American Journal of Physics* **75**, 161 (2007).
- [20] R. Ross e P. Venugopal, *American Journal of Physics* **74**, 523 (2006).
- [21] R. Duit e C.v. Rhöneck, in *Connecting Research in Physics Education*, editado by A. Tiberghien, E. Jossen, and J. Barojas (ICPE Books, Ohio 1998), p. 1-10.
- [22] P.V. Engelhardt e R.J. Beichner, *American Journal of Physics* **72**, 98 (2004).
- [23] L.C. McDermott e P.S. Shaffer, *American Journal of Physics* **60**, 994 (1992).
- [24] D.P. Ausubel, *Aquisição e Retenção de Conhecimentos* (Ed. Plátano, Lisboa, 2003).
- [25] P.-K. Tao and R.F. Gunstone, *Journal of Research in Science Teaching* **36**, 859 (1999).
- [26] V.D. Teodoro, J.P. Vieira e F.C. Clérigo, *Modellus, Interactive Modelling with Mathematics*. Disponível em <http://phoenix.sce.fct.unl.pt/modellus> (acesso em 5/1/2008).
- [27] P.F.T. Dorneles, I.S. Araujo e E.A. Veit, *Circuitos Elétricos: Atividades de Simulação e Modelagem Computacionais como o Modellus*. Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/circuitos> (acesso em 5/1/2008).
- [28] H.M. Vianna, *Testes em Educação* (Ed. Ibrasa, São Paulo, 1987), 6^a ed.
- [29] M.A. Moreira e F.L. Silveira, *Instrumentos de Pesquisa em Ensino e Aprendizagem* (Ed. EDIPUCRS, Porto Alegre, 1993).
- [30] P.F.T. Dorneles, E.A. Veit e M.A. Moreira, *Investigating the Learning of RLC Circuits with the Aid of Computer-Based Activities* (submetido ao Girep 2008).

ANEXO C

Neste anexo apresentamos a atividade experimental da Aula 1 do terceiro estudo.

AULA 1: CIRCUITOS RC¹

Atividade experimental

I. – Introdução

O circuito RC mais simples é aquele constituído por um capacitor inicialmente carregado com uma tensão V_0 descarregando sobre um resistor, conforme esquema ao lado. A *lei das malhas* de Kirchhoff aplicada ao circuito nos fornece

$$V_C(t) = i(t)R . \quad (1)$$

A corrente no resistor é devida à carga que sai do capacitor, ou seja,

$$i(t) = -\frac{dQ(t)}{dt} , \quad (2)$$

onde o sinal representa o fato, que a carga do capacitor está diminuindo. A tensão instantânea no capacitor é dada por

$$V_C(t) = \frac{Q(t)}{C} . \quad (3)$$

Substituindo as eqs. (2) e (3) na eq.(1) temos

$$\frac{Q(t)}{C} = -R\frac{dQ(t)}{dt} \rightarrow \frac{dQ(t)}{Q(t)} = -\frac{1}{RC}dt . \quad (4)$$

Definindo $RC \equiv \tau$ e integrando ambos os lados da eq. acima obtemos

$$\ln Q(t) + A = -\frac{t}{\tau} + B , \quad (5)$$

com A e B constantes de integração. Reescrevendo, temos

$$Q(t) = ke^{-\frac{t}{\tau}} , \quad \text{com} \quad k = e^{(B-A)} . \quad (6)$$

A constante k pode ser facilmente determinada, pois para $t = 0$ a carga no capacitor é $Q_0 = V_0C$. Assim, $k = Q_0 = V_0C$ e a solução se escreve

$$Q(t) = Q_0e^{-\frac{t}{\tau}} , \quad \text{ou por (3)} \quad (7)$$

$$V(t) = V_0e^{-\frac{t}{\tau}} . \quad (8)$$

O processo de carga de um capacitor conectado em série com um resistor também será estudado. Nesta situação uma fonte de tensão contínua \mathcal{E} é introduzida na malha da figura 1. A *lei das malhas* de Kirchhoff resulta em:

$$\mathcal{E} - i(t)R - V_C(t) = 0 , \quad \text{ou} \quad (9)$$

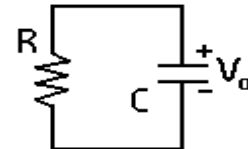


Figura 1

Fig1. Esquema da descarga de um capacitor sobre um resistor.

¹ Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/fis01202/index_lab.html> Acesso em 20 fev. 2010.

$$\mathcal{E} - R \frac{dQ(t)}{dt} - \frac{Q(t)}{C} = 0 . \quad (10)$$

A solução da equação diferencial (10) deve satisfazer as condições $Q(t = 0) = 0$ e $Q(t = \infty) = Q_0$ (carga máxima). As equações e as soluções de cada caso estão resumidas na tabela abaixo.

	carga	descarga
Equação diferencial:	$\mathcal{E} = R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C}$	$R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0$
solução	$Q(t) = \mathcal{E}C \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$	$Q(t) = \mathcal{E}C e^{-\frac{t}{RC}}$
	$V_C(t) = \mathcal{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$	$V_C(t) = \mathcal{E} e^{-\frac{t}{RC}}$
$t = RC \rightarrow$	$V_C(RC) = 0,63\mathcal{E}$	$V_C(RC) = 0,37\mathcal{E}$

Neste experimento verificaremos as relações dos processos de *carga* e *descarga* de um capacitor em um circuito *RC* e sua respectiva *constante de tempo* τ definida acima.

II. – Objetivos: Ao término desta atividade você deverá ser capaz de:

- 1 – determinar a *constante de tempo* de um circuito *RC*–série nas situações de *carga* e *descarga* do capacitor;
- 2 – determinar a capacitância de um capacitor através de um circuito *RC*–série;
- 3 – descrever os procedimentos experimentais necessários para as determinações anteriores.

III. – Procedimento experimental:

Nesta etapa da atividade, você determinará a *constante de tempo* de um circuito *RC*, com o auxílio de um multímetro, observando os processos de *carga* e *descarga* do capacitor existente. Ao realizar a leitura do texto, observe a figura que se encontra ao lado do texto em cada etapa.

I – CARGA

a) Com L_1 e L_2 ambas na posição 1, o voltímetro indica a tensão \mathcal{E} da fonte;

b) Abrindo a chave L_2 (posição 2), o capacitor C começa a carregar-se através da resistência interna R_V do voltímetro. Desta forma, o voltímetro marca, então, a cada instante, a tensão $V = \mathcal{E} - V_C$, onde V_C é a tensão entre as placas do capacitor. Logo, $V_C = \mathcal{E} - V$.

c) Use $\mathcal{E} = 12\text{ V}$ e faça 10 leituras de V em diferentes instantes de tempo t , ligando (em 1) e desligando (em 2) L_2 . Calcule V_C e complete a Tabela 1 adiante com os dados para o processo de *carga* do capacitor.

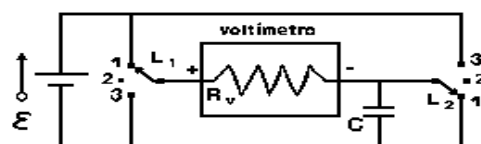


Figura 2

Fig2. Esquema da montagem do circuito

RC na configuração de carga.

II – DESCARGA

a) Desligue a fonte de tensão.

b) Inverta os fios (a polaridade!) do voltímetro e as ligações das chaves L_1 e L_2 , colocando ambas na posição 3 indicada ao lado.

c) Religue a fonte de tensão no mesmo valor $\mathcal{E} = 12\text{ V}$. Nesta situação o capacitor carrega-se quase que imediatamente, pois seus terminais estão ligados diretamente à fonte de tensão.

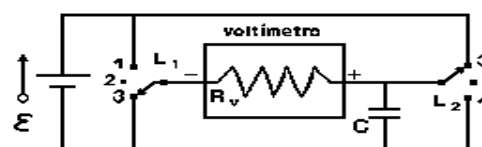


Figura 3

Fig.3 Esquema da montagem do circuito

RC na configuração de descarga.

d) Abrindo a chave L_2 (posição 2), o capacitor começa a descarregar-se através da resistência R_V . O voltímetro, assim, indica, a cada instante, o valor $V = V_C$ diretamente.

e) Novamente faça 10 medidas de V_C em diferentes tempos t ligando (em 3) e desligando (em 2) L_2 e complete a Tabela 2 adiante com os dados do processo de *descarga* do capacitor.

IV – Atividades práticas:

1 – Em papel milimetrado faça os gráficos $V_C \times t$ para estes dois processos (veja Fig.4).

2 – A partir dos gráficos, determine o valor experimental da *constante de tempo*, RC , primeiro para o processo de *carga* e então para o de *descarga* do capacitor.

3 – Do valor obtido para RC e do valor nominal da capacitância (indicado no capacitor), calcule o valor experimental da resistência interna R_V do voltímetro. Compare o valor calculado com valor indicado pelo fabricante. ¹

Tabela 1 – *CARGA*

V	$V_C = \mathcal{E} - V$	t

Tabela 2 – *DESCARGA*

$V_C = V$	t

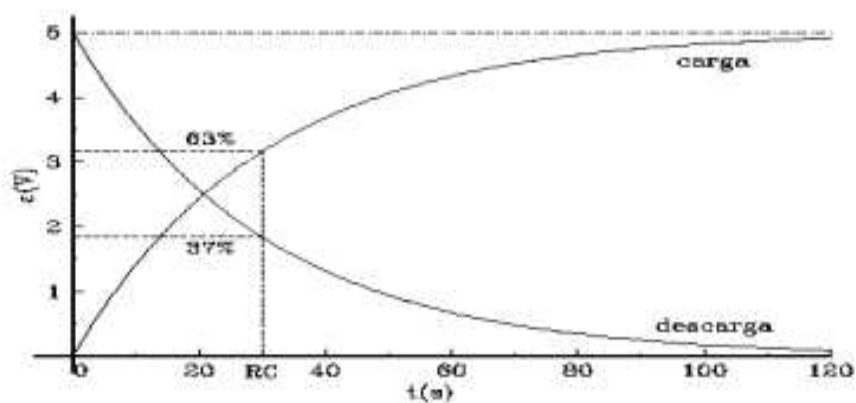


Fig.4 $V \times t$ nas situações de *carg*

¹Nos multímetros analógicos, R_V é obtida multiplicando-se o valor indicado pelo fabricante em um dos cantos do mostrador ($20.000\Omega / V$ para o modelo Hioki P-80 e $50.000\Omega/V$ para o modelo Hioki AF-205) pelo valor indicado na escala selecionada, no caso em questão, 5 .

ANEXO D

Neste anexo apresentamos o teste sobre a natureza da Ciência utilizado como pré e pós-teste no quarto estudo, baseado no teste INPECIP (Ruiz, Silva, Porlán e Mellado, 2005).

AFIRMATIVAS

A seguir aparecem 10 afirmativas¹ sobre como é produzido o conhecimento científico. Em cada uma das afirmativas você pode posicionar, em uma escala de cinco pontos, a extensão de sua concordância ou discordância segundo a seguinte codificação:

Faça um X na(s) letra(s) que melhor expressa(m) a sua opinião e evite marcar muitas vezes INDECISO.	CF	C	I	D	DF
1. Teorias científicas obtidas ao final de um processo metodológico rigoroso são um reflexo correto da realidade.					
2. Ao observar a realidade é impossível evitar certo grau de distorção introduzido pelo observador.					
3. O observador científico não deve desenvolver seu trabalho sob a influência de teorias prévias sobre o problema investigado.					
4. Toda investigação científica começa pela observação sistemática do fenômeno a ser estudado.					
5. O investigador está sempre condicionado, em sua atividade, pelas hipóteses que intui sobre o problema investigado.					
6. O conhecimento científico é produzido devido à capacidade dos seres humanos em delinear problemas e imaginar possíveis soluções dos mesmos.					
7. A eficácia e a objetividade do trabalho científico se alicerçam em seguir fielmente as seqüências do método científico: observação, hipóteses, experimentação e elaboração de teorias.					
8. Através do experimento o pesquisador comprova se a sua hipótese de trabalho é verdadeira ou falsa.					
9. As hipóteses científicas dirigem o processo de investigação científica					
10. A experimentação é utilizada em certos tipos de investigação científica, enquanto que em outros não.					

¹ Extraídas do teste INPECIP (Inventario de Creencias Pedagógicas y Científicas de Profesores). Ruiz C., Silva C., Porlán R. e Mellado V. Construcción de mapas cognitivos a partir del cuestionario INPECIP. Aplicación al estudio de la evolución de las concepciones de una profesora de secundaria entre 1993 y 2002. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias v. 4 n.1 (2005).

ANEXO E

Neste anexo apresentamos os guias que os alunos receberam no quarto estudo para desenvolverem as atividades computacionais¹.

AULA 2: FORÇA ELÉTRICA E CAMPO ELÉTRICO²

Atividade computacional: Simulação – nome do arquivo eletrônico:
Forca_campo.html

Atividade I – Cinco cargas de sinais desconhecidos são mostradas nesta simulação com os respectivos vetores representando as forças elétricas sobre cada carga (Figura 1). Quantas cargas têm o mesmo sinal? Você pode clicar sobre uma carga e arrastá-la para qualquer posição.

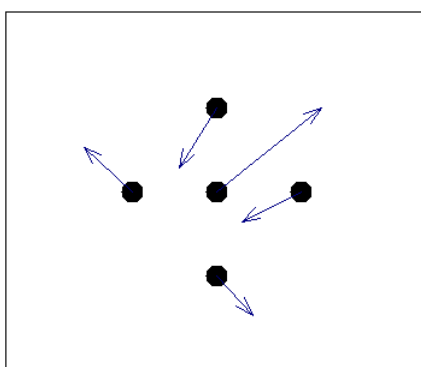
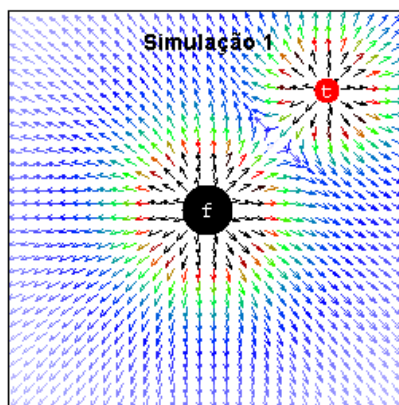


Figura 1 – Tela ilustrativa da atividade I.

Atividade II – Uma carga elétrica fixa e uma carga de “teste” são mostradas em cada simulação (Figura 2). Em qual das simulações a carga de “teste” é uma verdadeira carga de “teste”?



[Iniciar Simulação 1](#) [Iniciar Simulação 2](#) [Iniciar Simulação 3](#)

Figura 2 – Tela ilustrativa da atividade II.

¹ Os modelos computacionais estão disponíveis em:

<http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/circuitos/atividades_computacionais.zip> Acesso em 20 fev. 2010.

² Atividades adaptadas de: Chistian e Belloni (2004). Physlets Web-Based Interactive Physics Problems. Disponível em: <<http://webphysics.davidson.edu/physletprob/default.htm>> Acesso em 20 fev. 2010.

Atividade III – Uma esfera isolante carregada com uma quantidade de carga elétrica desconhecida distribuída uniformemente é mostrada nesta simulação (Figura 3). Os vetores representam a direção do campo elétrico e as cores dos vetores representam a intensidade do campo. Determine a carga elétrica sobre a esfera e o número de elétrons presentes na esfera. Quais são as idealizações que foram consideradas pelo autor desta simulação? A distância é medida em m e o campo elétrico em N/C.

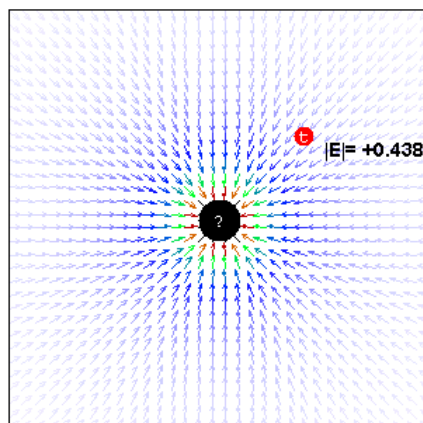


Figura 3 – Tela ilustrativa da atividade III.

Atividade IV - Quatro partículas carregadas são mostradas nesta simulação (Figura 4). Você pode clicar e arrastar qualquer uma dessas partículas. Qual(is) observação(ões) se pode fazer a respeito das partículas.

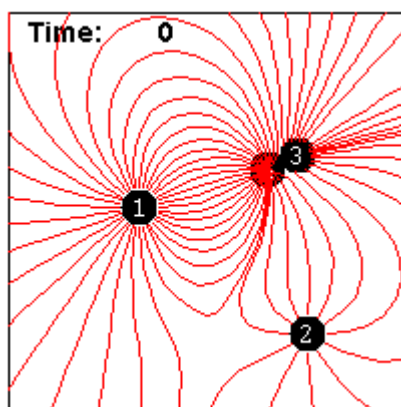


Figura 4 – Tela ilustrativa da atividade IV.

Atividade V – Uma partícula de 1mg com uma carga de $2\mu\text{C}$ é lançada em direção a um campo elétrico desconhecido como mostrado na Figura 5 (posição em metros e tempo em segundos). Encontre o módulo do campo elétrico. Quais são as idealizações que foram consideradas pelo autor desta simulação?

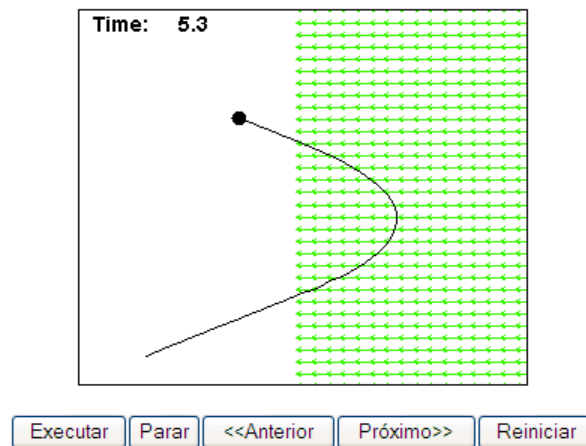


Figura 5 – Tela ilustrativa da atividade V.

Atividade VI - Uma carga desconhecida (Carga 1) é lançada para dentro de uma região contendo quatro cargas fixas (Figura 6). Uma das cargas é positiva (a vermelha). Determine o sinal das demais cargas.

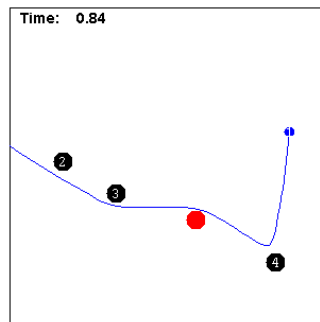


Figura 6 – Tela ilustrativa da atividade VI.

Atividade VII – Esta simulação contém duas cargas elétricas fixas e uma carga de teste (posição em metros e tempo em segundos). A carga de teste se move sob a ação do campo elétrico quando a simulação for executada (Figura 7).

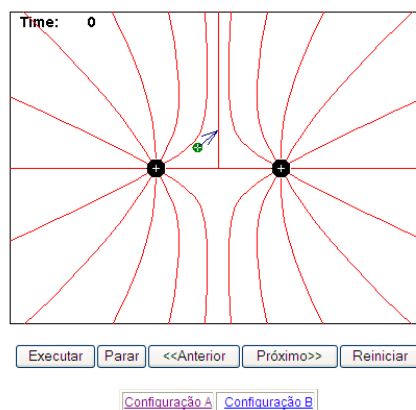


Figura 7 – Tela ilustrativa da atividade VII.

Questões

- 1) Usando a configuração A arraste a carga de teste para a posição $(-0.8 \text{ m}, 0 \text{ m})$ e faça uma previsão sobre a trajetória que a carga de teste irá seguir quando a simulação for executada.

- 2) Execute a simulação e explique as diferenças entre o que foi observado e o que foi previsto por você inicialmente, caso haja alguma diferença.
- 3) Reinicie a simulação e arraste a carga de teste para a posição (-1.0 m, 0.35 m). Da mesma forma que no item anterior, faça uma previsão sobre a trajetória da carga de teste quando a simulação for executada.
- 4) Execute a simulação e explique as diferenças entre o que foi observado e o que foi previsto por você, caso haja alguma diferença.
- 5) Usando a configuração B, qual será a trajetória da carga de teste se ela estiver na posição (-0.5 m, 0.5 m) quando a simulação for executada? E se estiver na posição (0.0 m, 1.3 m)?

Atividade VIII – Esta simulação contém cinco cargas elétricas fixas com seus respectivos vetores representando a força elétrica sobre cada carga (Figura 8). Você pode clicar e arrastar qualquer carga para mudar de posição. Quais cargas são positivas e quais são negativas? Iniciar.

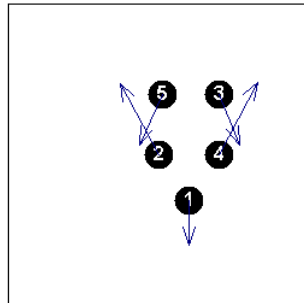


Figura 8 – Tela ilustrativa da atividade VIII.

Atividade IX – Nesta simulação as cargas elétricas 1 e 2 estão fixas e ao dar um clique duplo, dentro da simulação, linhas de campo são desenhadas (Figura 9). Quais afirmativas são verdadeiras? Justifique.

- 1) Ambas as cargas têm o mesmo sinal.
- 2) As cargas têm o mesmo módulo, mas têm sinais contrários.
- 3) O módulo da Carga 1 é maior do que o da Carga 2.
- 4) O módulo da Carga 2 é maior do que o da Carga 1.

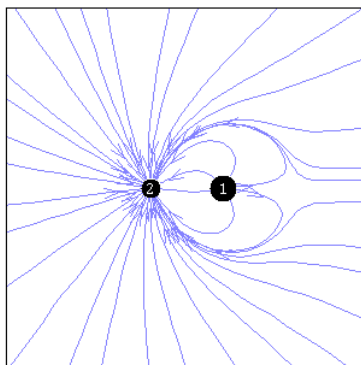


Figura 9 – Tela ilustrativa da atividade IX.

AULA 4: LEI DE GAUSS³

Atividade computacional: Simulação – nome do arquivo eletrônico: *lei_gauss.html*

Atividade I: Fluxo e superfícies gaussianas

O gráfico de barras mostra o fluxo, Φ , através de quatro superfícies gaussianas: verde, vermelha, laranja e azul, sendo a posição dada em metros, a intensidade do campo elétrico em newton/coulomb, e o fluxo em $N.m^2/C$. Note que esta animação mostra somente duas dimensões de um mundo tridimensional. Você precisará imaginar que os círculos que você vê são esferas e que os quadrados são na verdade cubos.

- 1) Comece movendo a superfície gaussiana verde. Qual é o fluxo quando a carga pontual está no interior da região limitada pela superfície?
- 2) Qual é o fluxo quando a carga pontual não está dentro da região limitada pela superfície?
- 3) E sobre a superfície vermelha?
- 4) Como o fluxo é a intensidade do campo elétrico vezes a área da superfície, por que o tamanho da superfície não importa?
- 5) Quando a carga não estiver dentro da superfície gaussiana o que acontecerá com o fluxo do campo elétrico? Por quê?
- 6) O formato da superfície gaussiana altera o valor do fluxo?
- 7) Mova a superfície gaussiana para um ponto onde o fluxo seja zero. O campo elétrico também é zero? Se o campo elétrico não é zero, porque o fluxo é zero?
- 8) O que acontece quando a superfície azul circunda apenas uma carga? O que acontece quando ela envolve ambas as cargas?

Atividade II: Fluxo e Lei de Gauss

Nesta atividade calcularemos o fluxo, Φ , através de três superfícies gaussianas: verde, vermelha e azul, sendo a posição dada em metros e a intensidade do campo elétrico em newton/coulomb. Note que esta animação mostra somente duas dimensões de um mundo tridimensional. Você precisará imaginar que os círculos que você vê são esferas.

³ ARAUJO, I. S. Simulação e modelagem computacionais como recursos auxiliares no ensino de Física geral. 2005. p.229. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

- 1) Mova a carga de teste ao longo de uma das superfícies gaussianas. Qual é a magnitude do campo elétrico sobre a superfície? Em qual direção ele aponta? Qual direção é normal à superfície gaussiana?
- 2) No caso de uma carga pontual no item anterior, qual é o ângulo entre o campo elétrico e o vetor normal à superfície?
- 3) Calcule o fluxo para a superfície que você escolheu. (Lembre-se da fórmula para a área da esfera.).
- 4) Calcule o fluxo para as outras duas superfícies.
- 5) Se a área da esfera aumenta com r^2 , como é possível que o fluxo permaneça o mesmo para os três casos?
- 6) Quais são a magnitude e o sinal da carga pontual?

Atividade III: Simetria e aplicações da Lei de Gauss

A lei de Gauss é sempre verdadeira, mas nem sempre é útil para encontrar o campo elétrico desejado em um problema. Isto não deve surpreender, por que para encontrar \vec{E} , usando uma equação como $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{liq}}{\epsilon_0}$; é preciso ser possível retirar

\vec{E} da integral, e para que isso aconteça, E precisa ser constante sobre a superfície. É aí que entra a simetria do problema. A Lei de Gauss só é útil para calcular campos elétricos quando a simetria é tal que você possa construir uma superfície gaussiana em que o campo elétrico seja constante sobre ela, e o ângulo entre \vec{E} e o vetor normal à gaussiana \vec{A} também não varie sobre esta superfície. Na prática isso significa que você deve escolher uma superfície gaussiana com a mesma simetria da distribuição de cargas.

- 1) Considere uma esfera em torno de uma carga pontual (clique no link). A carga de teste azul mostra a direção de \vec{E} . Há também um vetor apontando na direção da normal à superfície esférica. Movendo o vetor normal sobre a esfera e pondo a carga de teste em três pontos diferentes na superfície, encontre o valor de $\vec{E} \cdot d\vec{A} = E dA \cos \theta$ (assuma $dA = 1$) neste três pontos (Leia o valor de E na caixa de texto amarela). Eles são todos os mesmos? Por quê?
- 2) Ponha um cubo em torno da mesma carga pontual. A carga de teste agora mostra a direção do campo elétrico, e o menor ângulo (em graus) entre o vetor e um eixo vertical também é mostrado. Movendo os vetores normais ao cubo e colocando a carga de teste em três pontos diferentes no topo da superfície, encontre o valor de $\vec{E} \cdot d\vec{A} = E dA \cos \theta$ (assuma $dA = 1$) neste três pontos. Eles são todos os mesmos? Por quê?

- 3) No contexto de suas respostas acima, por que a esfera é uma melhor escolha do que o cubo como superfície gaussiana nesta aplicação da Lei de Gauss?
- 4) Vamos tentar outra configuração de carga. Coloque uma esfera em torno de uma placa carregada. (Admita que os círculos em cinza que você vê sejam longas barras carregadas que se estendem para dentro e para fora do plano da tela, sendo a placa carregada, uma seção de corte). O valor de $\vec{E} \cdot d\vec{A} = E dA \cos \theta$ pode ser o mesmo em qualquer dos três pontos carregados sobre a superfície gaussiana? Explique por que você poderia não querer usar a esfera para esta configuração?
- 5) Agora, ponha um cubo em torno da mesma placa carregada. (Admita que os círculos em cinza que você vê sejam longas barras carregadas que se estendem para dentro e para fora do plano da tela, sendo a placa carregada, uma seção de corte). Encontre o valor de $\vec{E} \cdot d\vec{A} = E dA \cos \theta$ em três pontos no topo da superfície. Ele é essencialmente o mesmo para os três pontos? Como será $\vec{E} \cdot d\vec{A} = E dA \cos \theta$ para as laterais?

AULA 16: LEI DE AMPÈRE⁴

Atividade computacional: Simulação – nome do arquivo eletrônico: *lei_ampere.html*

Atividade I: Placa Condutora

- 1) Uma placa condutora infinita pode ser vista como um conjunto de fios paralelos, que estão representados na Figura 10 como pontos. A placa e os fios são perpendiculares ao plano da página.



Figura 10 – Placa condutora infinita.

Na simulação a linha em azul representa o conjunto de fios que conduzem correntes elétricas para “dentro” ou para “fora” do plano da tela do computador de modo que juntos formam uma placa condutora. A simulação mostra o cálculo da integral de linha $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ (o valor é mostrado na tabela e no gráfico de barras) conforme você move o cursor (círculo com um sinal de adição dentro) bem como as coordenadas do mesmo. O retângulo em preto é um laço amperiano.

- a) O que as setas em verde estão representando? Em qual sentido a corrente está fluindo nos fios? Explique.

⁴ ARAUJO, I. S. Simulação e modelagem computacionais como recursos auxiliares no ensino de Física geral. 2005. p.229. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

- b) Se você mover o cursor ao longo da parte superior do laço amperiano, a integral será positiva ou negativa? Por quê?
- c) Mova o cursor para outro canto e zere a integral (“botão integral = 0”). Se agora você mover o cursor ao longo dos lados verticais do laço, qual será o valor desta integral comparado à parte de cima do laço? Por quê?
- d) Quem está gerando campo magnético sobre o laço amperiano?

Atividade II: Fios Condutores

- 2) Cada fio está conduzindo corrente para “dentro” ou para “fora” da tela do computador (a posição é dada em mm e a intensidade do campo magnético em mT). Ative a integral (o cursor se transformará em um lápis) e desenhe o caminho fechado para o qual será calculada a integral do campo magnético na direção do percurso adotado ($\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$). Você pode zerar a integral em qualquer ponto que desejar, “desligar” a integral e mover o cursor para outro ponto para recomençar. Para voltar à configuração inicial clique em “Reiniciar”. Dado:
- $$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{T}\cdot\text{m}}{\text{A}}.$$

- a) Encontre a intensidade e o sentido das correntes conduzidas por cada um dos quatro fios na animação.
- b) Envolver dois ou mais fios em um caminho fechado qualquer (laço amperiano), traçando no sentido horário. Haverá alguma diferença se você refizer o mesmo caminho, mas com o sentido anti-horário? Por quê?
- c) Envolver os fios rosa e amarelo com um laço amperiano. O que podemos afirmar sobre a corrente que conduzem? E sobre o campo magnético sobre o laço amperiano?

Atividade III: Solenóide

- 3) Um solenóide é formado por um longo fio condutor enrolado muitas vezes em torno de um cilindro. Esta simulação mostra uma seção de corte do solenóide (cilindro). Cada volta do fio circula por trás e em frente à tela do computador, de tal forma que o que vemos é um “tubo cortado” pela metade ao longo de seu eixo principal e visto de lado. A posição é dada em [cm], a corrente em [A] e a intensidade do campo em [mT]. Você pode usar a primeira barra de rolagem para mudar a corrente conduzida pelo fio e a segunda para encolher ou esticar o solenóide (imagine uma “mola-maluca”, com as pontas conectadas numa fonte de corrente), tendo em mente que o número de voltas permanece o mesmo. O retângulo em preto é um laço amperiano.

- a) Para qual (is) dos lados do laço amperiano $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$? Por quê?

- b) Para o(s) outro(s) lado(s), mostre que $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = BL$, onde L é o comprimento do lado e B é a intensidade do campo magnético naquele lado.
- c) Quanta corrente é envolvida pelo laço amperiano? Quanto vale n (número de voltas por unidade de comprimento) quando o solenóide está comprimido ao máximo? Quem gera o campo magnético sobre o laço amperiano?
- d) Qual é o número total de voltas do solenóide? Obtenha uma expressão para a intensidade do campo magnético em função do comprimento do solenóide (lembre-se que o número de voltas do solenóide permanece inalterado ao esticá-lo ou comprimi-lo.).

AULA 18: LEI DE FARADAY-LENZ⁵

Atividade computacional: Simulação – nome do arquivo eletrônico: *lei_faraday_lenz.html*

ATENÇÃO: Leia o enunciado das atividades 1 (2), selecione a simulação correspondente, mas NÃO a execute ainda. Tente responder as questões primeiro, buscando prever o que ocorrerá em cada situação, registrando tudo por escrito. Após, execute a simulação tentando explicar diferenças entre o observado e o previsto por você, se houverem diferenças, registre isso também por escrito.

Fluxo do campo magnético e tensão induzida (fem)

- 1) Uma espira está próxima a um fio condutor vertical conduzindo corrente de cima para baixo. Você pode mover a espira. A posição é dada em metros, a intensidade do campo magnético em mT, a fem em mV e o tempo em segundos. O fluxo através da espira e a fem induzida são mostradas no gráfico. A intensidade das cores vermelho e azul, representam a intensidade do campo nas proximidades do fio.

Como o fluxo através da espira e a fem induzida se comportam quando a espira:

- a) se aproxima e depois se afasta em relação ao fio?
- b) é deslocada em paralelo com o fio?
- c) O fluxo e a fem induzida se comportam de forma diferente quando a espira está no lado esquerdo, ao invés do lado direito? Explique.

⁵ Atividades traduzidas e adaptadas por Ives Solano Araujo de: Chistian e Belloni (2004). Physlets Web-Based Interactive Physics Problems.

Lei de Lenz

- 2) Considere a configuração inicial. O centro tem uma região sem campo, e os lados têm um campo magnético que aumenta linearmente “para dentro” da tela do computador (em azul) e “para fora” (em vermelho). A intensidade das cores representa a intensidade do campo magnético. Mova a espira da região em branco para a região azul.
- a) Descreva o que acontece com a corrente na espira.
 - b) Conforme você move a espira para a direita, o que acontece com o campo magnético externo que atua sobre ela, em termos de intensidade, direção e sentido? E o campo magnético induzido pela corrente como está orientado?
 - c) Posicione a espira na extrema direita da animação e leve-a lentamente até a região branca. Explique por que o sentido da corrente e esboce o campo magnético induzido por ela.
 - d) Explique, justificando, o que irá acontecer se você levar a espira da região branca para a região em vermelho?
 - e) Existe diferença entre mover a espira da região em azul para a região branca e mover a espira da região branca para a região em vermelho? Explique em termos da orientação dos campos magnéticos externo e induzido sobre a espira.
 - f) Explore as configurações A e B onde o campo magnético não é mostrado. Para cada configuração, descreva o respectivo campo magnético da forma mais completa possível.
 - g) Após completar sua descrição, diga quais dos campos magnéticos (campos 1, 2 ou 3) está relacionado com as configurações A e B.
 - h) Verifique suas respostas para g) adicionando uma espira nas animações para os campos.

Problemas sobre a Lei de Faraday-Lenz

- 3) Uma espira condutora com resistência de 200Ω é puxada com velocidade constante de uma região onde existe um campo magnético constante de 2 T apontando para fora da tela do computador para outra sem campo magnético (a posição é dada em metros e o tempo em segundos). Durante o intervalo de tempo mostrado na animação:
- a) Qual é o sentido e a intensidade da corrente na espira?
 - b) Uma força se faz necessária para puxar a espira para fora da região com campo magnético. Por quê? Esboce um diagrama de corpo livre da espira e explique a origem de cada força.

- c) Encontre a intensidade da força que foi exercida pela mão sobre a espira. Descreva o movimento subsequente da espira se a mesma força continuasse a atuar sobre ela na região sem campo magnético.
- 4) Uma espira, próxima a um fio longo transportando corrente, move-se de acordo com o caminho mostrado. A posição é dada em metros e o tempo em segundos. A corrente no fio é constante e está dirigida de baixo para cima.
- a) Nos instantes $t = 0,5$ s; $1,5$ s; $2,5$ s; $3,5$ s; e $4,5$ s, indique o sentido da corrente induzida na espira.
- b) Classifique em ordem crescente as intensidades das correntes induzidas na espira nos instantes de tempo $t = 0,5$ s; $1,5$ s; $2,5$ s; e $3,5$ s.

Referências

Material didático adaptado de: CHRISTIAN & BELLONI (2004) **Physlet Physics:** interactive illustrations, explorations, and problems for introductory Physics. Ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.

ANEXO F

Neste anexo apresentamos os roteiros experimentais utilizados no quarto estudo¹.

AULA 2: MEDIDAS ELÉTRICAS

I. – Introdução

Nas aulas de laboratório ao longo do curso você utilizará instrumentos de medida tais como multímetros e osciloscópios. O objetivo desta aula é permitir que você se familiarize com tais equipamentos e aprenda a utilizá-los na medida de grandezas elétricas.

II. – O Multiteste

O multiteste (ou multímetro) é um aparelho que permite a medida de diferentes grandezas elétricas, geralmente corrente, voltagem e resistência elétrica. A posição da chave seletora (em alguns modelos localizada no centro do aparelho e rotativa) identifica que tipo de medida será efetuada. A posição é identificada pela unidade da medida indicada; tensões contínuas (DC-V), tensões alternadas (AC-V), correntes contínuas e resistências elétricas (Ω) em diferentes escalas. Alguns multímetros são ainda capazes de medir frequência de onda alternada, capacitância, indutância e ganho de transistor.

II.1. – Considerações gerais para o uso correto de um multiteste:

As seguintes precauções deverão ser tomadas para evitar danos ao aparelho:

a) Quando medir uma voltagem ou corrente, dentre as escalas destinadas à medida da grandeza em questão, escolha sempre a escala mais elevada. Depois, se for o caso, selecione uma escala mais baixa e adequada a uma leitura mais precisa.

b) Observe a polaridade quando medir tensões ou correntes contínuas: o polo positivo da fonte deve ser ligado à ponteira positiva do multiteste.

c) No modo *Ohmímetro* o multiteste utiliza uma fonte de corrente interna. **Nunca meça resistência elétrica em um circuito que esteja sendo alimentado por uma fonte de tensão.** Desligue, antes, a fonte e um dos bornes do resistor (se necessário, para isolá-lo). O uso incorreto desta função poderá danificar o aparelho.

d) O multiteste deve ficar deitado sobre a mesa de trabalho para evitar quedas e, também, evitar leituras incorretas devido ao desequilíbrio mecânico do ponteiro.

Obs.: por razões óbvias, os itens que envolvem considerações sobre o ponteiro do multiteste perdem o sentido no caso de multímetros digitais.

e) **Não** pratique "*roleta-russa*" com o multiteste **enquanto ele estiver ligado**, isto é, **não gire o seletor** através de escalas muito baixas nas quais o aparelho possa ser danificado por excesso de voltagens (correntes).

f) A chave rotativa deve ser posicionada na função de medida adequada **antes de se conectar as pontas de prova ao dispositivo a ser testado.** Assegure-se de desconectar as pontas de prova dos pontos de teste antes de mudar a chave rotativa para uma nova função ou faixa.

¹ Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/fis01202/index_lab.html> Acesso em 20 fev. 2010.

II.2. – Leitura Correta das Escalas em Multímetros Analógicos

Para maior exatidão das leituras, você deverá:

a) ler perpendicularmente ao plano das escala. Caso contrário, você introduzirá erros de leitura devido à paralaxe, pois o ponteiro encontra-se afastado do plano da escala.

b) quando medir tensões ou correntes, selecione a escala na qual o ponteiro tenha a **maior deflexão possível**. Isto fará com que os erros de leitura sejam percentualmente menores.

c) quando medir resistência, selecione uma escala que evite leituras com o ponteiro na região de pouca deflexão, onde as divisões da escala estão mais concentradas.

d) antes de fazer qualquer medida, verifique o equilíbrio mecânico do ponteiro, isto é, verifique se o ponteiro está sobre os zeros à esquerda das escalas para medidas de tensões e correntes.

e) nas medidas de resistência deve-se *ajustar o "zero"*. Isto deve ser feito sempre que houver troca de escala.

II.3. – Atividades

a) Utilizando o multiteste analógico, meça a resistência de alguns dos resistores fornecidos. Compare com os valores nominais impressos nos próprios resistores.

b) Monte um circuito simples com alguns resistores em série, alimentado por uma bateria. Faça medidas das diferenças de potenciais nos resistores.

c) Repita as medidas acima com o multiteste digital.

III. – O Osciloscópio

O osciloscópio é um dos instrumentos de medida mais versáteis usados na eletrônica. O osciloscópio nos fornece num modo gráfico **diferenças de potencial em função do tempo**. A ordenada (eixo vertical) é a diferença de potencial entre dois pontos (ou a tensão de um ponto em relação a terra), e a abscissa é o tempo. Ou seja, a tela de um osciloscópio é um gráfico de uma função da tensão contra o tempo: $V(t) \times t$. Ele é portanto um instrumento próprio para observar as variações de tensão ao longo do tempo, informação que não pode ser obtida por um multiteste comum.

A calibração dos eixos é variável, a fim de ajustar o osciloscópio ao que queremos medir. Pode ser usado para medir tensões grandes ou pequenas, em intervalos de tempo que variam desde *segundos* (s) até *microsegundos* ($1 \mu s = 10^{-6}$ s). A tela do osciloscópio é dividida, e a cada divisão é dado um valor mais conveniente para o enquadramento do sinal a ser medido na tela. Por exemplo, se para o eixo vertical for atribuído o valor 2 Volts por divisão (2 VOLTS / DIV) significa que cada quadrado da tela vale 2 Volts na vertical. Da mesma maneira pode-se calibrar o eixo horizontal em segundos ou fração de segundos. A maioria dos osciloscópios possuem dois *canais*, ou seja, é possível observar dois sinais ao mesmo tempo. Para tanto existem duas ponteiros de medidas.

III.1 – Considerações gerais para o uso correto do osciloscópio

a) Você estará medindo diferenças de potencial com as ponteiros. Portanto escolha o mesmo ponto de referência para as duas ponteiros, caso contrário você poderá danificá-las.

b) Para determinar o valor absoluto de um diferença de potencial, gire os botões "VARIABLE" no sentido horário (até a máxima posição), *cal* (calibrado).

c) De modo análogo ajusta o eixo do tempo.

d) Algumas ponteiros possuem *atenuadores de tensão* (geralmente um fator dez). Não deixe de levar isto em conta quando estiver usando estas ponteiros. A atenuação não afeta a escala do eixo horizontal, somente a vertical.

III.2 – Atividades

Nesta atividade você usará um *gerador de funções*. É um equipamento que permite a aplicação de um sinal de tensão alternada de formas distintas (senoidal, quadrada, triangular, *etc.*), com frequência ajustável.

a) Conecte diretamente o osciloscópio no gerador de funções. Coloque o gerador no modo função senoidal e meça com o osciloscópio o sinal de saída do gerador para diferentes frequências. Mude a forma de onda (onda quadrada por exemplo) e repita o procedimento.

b) **Valor RMS (ou eficaz) e valor de pico.** Selecione no gerador de funções um sinal senoidal de amplitude $V_0 = 6V$ e frequência $f = 1kHz$. Observe no osciloscópio como a diferença de potencial na saída do gerador varia com o tempo. Você deve observar uma função do tipo $V = V_0 \sin(2\pi ft)$. Leia nos eixos vertical e horizontal da tela do osciloscópio os valores de tensão e tempo do período da onda.

Agora faça a medida com um multíteste. Você deve ter encontrado algo como $V = 4,24V$. Por que os valores são diferentes?

São diferentes porque o multíteste não mede a amplitude do sinal, mas sim o que se chama **valor RMS** (*Root Mean Square*) ou *valor médio quadrático* ou, ainda, *valor eficaz*.

O valor RMS da tensão senoidal é definido como *a voltagem cujo quadrado é igual a média do quadrado da voltagem senoidal*, isto é,

$$V_{RMS}^2 = \langle V^2 \rangle_{\text{médio}} = \langle V_0^2 \sin^2(2\pi ft) \rangle_{\text{médio}} \cdot \quad (1)$$

Uma vez que $1/2$ é o valor médio de $\sin^2(2\pi ft)$ em um período, temos

$$V_{RMS} = \sqrt{\langle V_0^2 \sin^2(2\pi ft) \rangle} = V_0 \sqrt{1/2} \quad (2)$$

ou,

$$V_{RMS} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \cdot \quad (3)$$

Neste caso $V_0 = 6V$ e $V_{RMS} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} = 4,24 V$.

AULA 5: CAMPO ELETROSTÁTICO

I. – Objetivos: Ao término desta atividade você deverá ser capaz de:

- 1 – entender, na prática, o que é uma *superfície equipotencial*;
- 2 – obter a configuração das *linhas de força* de um campo elétrico \vec{E} a partir das correspondentes superfícies equipotenciais;
- 3 – obter o campo elétrico \vec{E} a partir das variações do potencial nos eixos x e y ;
- 4 – descrever o comportamento do potencial elétrico e do campo elétrico no interior e na superfície de um condutor em equilíbrio eletrostático.

II. – Introdução:

A relação matemática entre o campo eletrostático $\vec{E}(\vec{r})$ num determinado ponto \vec{r} e o valor do potencial $V(\vec{r})$ neste mesmo ponto é

$$\vec{E} = -grad(V) . \quad (1)$$

Observe que enquanto V é uma função escalar da posição, o campo \vec{E} é uma função vetorial. O gradiente de V nada mais é do que a derivada do potencial V em relação às três direções x , y e z do espaço, multiplicada pelos correspondentes vetores unitários nestas direções, ou seja,

$$\vec{E} = -\frac{dV}{dx}\vec{i} - \frac{dV}{dy}\vec{j} - \frac{dV}{dz}\vec{k} . \quad (2)$$

No experimento a ser realizado hoje traçaremos as linhas de força do campo eletrostático. Estas linhas nada mais são do que curvas que acompanham os vetores \vec{E} em cada ponto do espaço, de modo que o vetor \vec{E} seja sempre tangente à curva no ponto. O multímetro não pode medir diretamente o vetor \vec{E} , mas sim diferenças de potencial. Por isso mediremos as linhas equipotenciais e a partir delas traçaremos as linhas de força do campo \vec{E} . Conforme estabelecido pela relação (2), as linhas de \vec{E} são traçadas ortogonais as linhas equipotenciais. Devem partir da região de maior potencial para a de menor potencial.

III. – Atividades práticas:

III.1 – Obter a configuração do campo elétrico de um **dipolo elétrico** colocado numa cuba com água.

A experiência consiste em aplicar-se uma diferença de potencial de 10 Volts entre dois eletrodos na forma de ponteiros submersos em água, como indicado na Figura 1. O potencial elétrico distribui-se uniformemente entre as duas ponteiros. Mede-se o potencial de vários pontos do líquido em relação a um dos eletrodos, fazendo-se num papel milimetrado um mapeamento da

região medida e, então desenhando-se as superfícies equipotenciais. Considere o potencial do eletrodo negativo como sendo nulo.

A seguir traçam-se as linhas de força do campo eletrostático como ortogonais das equipotenciais. As linhas assim obtidas assemelham-se bastante às linhas de força geradas por duas cargas puntiformes de sinais opostos, separadas pela mesma distância que separa os eletrodos. Estas linhas de força descrevem apenas qualitativamente o campo \vec{E} pois apenas indicam sua direção. A magnitude de \vec{E} seria maior nas regiões onde as linhas estão mais próximas.

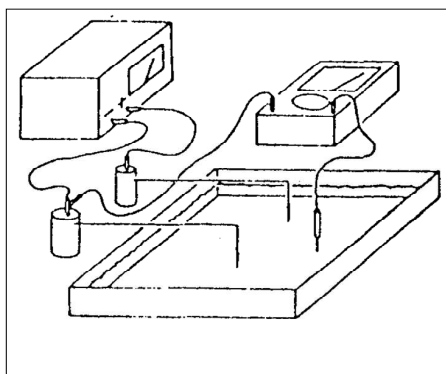


Figura 1. Montagem do experimento.

Para calcularmos o módulo de \vec{E} devemos somar vetorialmente as derivadas do potencial segundo as três direções, conforme a relação definida pela equação (2). Este cálculo simplifica-se bastante sobre o eixo x [quando definido como a reta que une os dois eletrodos]. Por quê? Faça um gráfico do potencial ao longo deste eixo x , entre os dois eletrodos, isto é, entre $x = -10$ e $x = +10$. Calcule agora a intensidade do vetor \vec{E} nos pontos $(-5,0)$, $(0,0)$ e $(+5,0)$. Com base no que aprendeu até agora, você tem condições de medir a intensidade do vetor campo elétrico em qualquer ponto. Que conjunto de medidas são necessárias para determinar a intensidade de \vec{E} no ponto $(+5,+5)$? Faça estas medidas e determine este valor.

III.2 – Obter a configuração do campo elétrico de duas **placas** metálicas planas, **paralelas**, com cargas iguais e de sinais contrários.

Repita a experiência anterior utilizando eletrodos de placas paralelas.

III.3 – Obter a configuração do campo elétrico de um **cilindro** metálico colocado no centro da região entre as placas do item anterior.

Coloque um cilindro metálico fechado na região entre os eletrodos de placas paralelas. Meça o potencial dentro e próximo ao lado externo do cilindro. Faça o mapa das linhas de corrente (ou força) próximo e dentro do condutor.

IV. – Procedimento experimental:

Para cada um dos esquemas acima:

1 – Com a fonte de tensão (contínua) constante, aplicar aproximadamente 10 V entre os condutores colocados na cuba.

2 – Fixar a ponteira negativa do voltímetro no eletrodo negativo e, com a ponteira positiva (sempre na posição vertical!), localizar na água pontos que tenham a mesma tensão (voltagem, potencial) em relação à ponteira fixa, considerada agora como o potencial de referência.

Cuidados especiais: evitar *curtos-circuitos*, isto é, contato entre os eletrodos positivo e negativo.

3 – Assinale estes pontos no papel milimetrado e os una por uma linha tracejada de modo a visualizar a projeção da superfície equipotencial medida. Construa, desta forma, um conjunto de linhas equipotenciais.

4 – A partir do conjunto de linhas equipotenciais, trace as correspondentes linhas de força do campo elétrico.

IV. – Trabalho a entregar:

1 – As três configurações do potencial e campo elétrico em papel milimetrado.

2 – Faça um gráfico do potencial ao longo do eixo x , entre os dois eletrodos, (entre $x = -10$ e $x = +10$). Calcule intensidade do vetor \vec{E} nos pontos $(-5,0)$, $(0,0)$ e $(+5,0)$.

3 – Faça as medias necessárias para determinar a intensidade de \vec{E} no ponto $(+5,+5)$ e determine este valor.

4 – Descreva V : (a) na superfície do cilindro; (b) no interior do cilindro.

5 – Levando em consideração que o cilindro é condutor, analise o que ocorre com suas cargas livres quando ele é submetido à diferença de potencial imposta pelas placas paralelas.

6 – Analise o comportamento das linhas de campo elétrico para a situação das partes 1 e 2 da experiência:

– a qual sistema de cargas pode ser comparada cada uma delas?

– qual a relação entre placas infinitas e as placas usadas no experimento? São equivalentes?

AULA 14: CIRCUITO RC COMO DIFERENCIADOR E INTEGRADOR

I. – Introdução

No experimento anterior, verificamos que um capacitor C sem carga inicial, quando ligado a uma fonte de tensão constante e através de um resistor R , carrega-se exponencialmente até atingir a tensão \mathcal{E} da fonte, obedecendo a equação

$$V_C(t) = \mathcal{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right), \quad (1)$$

onde $V_C(t)$ é a tensão entre as suas placas.

Reciprocamente, se o capacitor estiver carregado (possuir uma tensão inicial \mathcal{E}) e os seus terminais forem interligados por um resistor R , ele descarregar-se-á de acordo com a equação

$$V_C(t) = \mathcal{E} e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (2)$$

A constante $\tau = RC$, que determina a rapidez da carga ou da descarga, é chamada de constante de tempo capacitiva.

No presente experimento, faremos medidas de carga e descarga de capacitores, variando os valores da resistência e da capacitância. Verificaremos que, apesar das leis de carga e descarga serem sempre as dadas pelas relações (1) e (2) acima, elas podem determinar comportamentos diferentes do circuito, quando a tensão da fonte for ligada e desligada muitas vezes por segundo. Este é o caso, por exemplo, da aplicação de uma onda quadrada no circuito do capacitor e do resistor, ao invés de uma tensão \mathcal{E} constante como no capítulo anterior.

Esta onda quadrada, conforme mostra a figura 1, é produzida por um gerador de funções que tem a possibilidade de variar tanto a frequência como a amplitude da onda. No exemplo da figura 1, a onda possui uma amplitude de 1 volt, pico a pico, e um período T de 1 ms ($10^{-3}s$), ou seja, uma frequência $f = 1/T = 10^3s^{-1} = 10^3Hz = 1kHz$. Esta onda quadrada, pode ser pensada como se a fonte estivesse "ligada" no intervalo de tempo 0 a 0,5 ms e "desligada" entre 0,5 a 1,0 ms, e assim por diante.

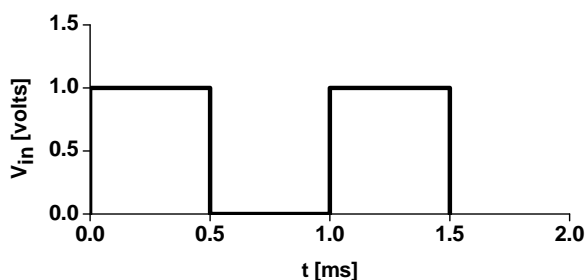


Fig.1 Onda quadrada.

II. – Procedimento experimental

1. O equipamento necessário para realizar o experimento é o seguinte:

- Gerador de funções (que gera uma onda quadrada).
- Capacitores e resistores: $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 4,7k\Omega$, $C_1 = 0,01\mu F$, $C_2 = 0,22\mu F$.
- Suporte de madeira para as conexões.
- Osciloscópio.

2. Em primeiro lugar, devemos escolher uma frequência conveniente, por exemplo, a da figura 1, cujo valor é de $1kHz$. Para tanto, devemos colocar as extremidades da ponteira do osciloscópio nos bornes de saída do gerador de funções, selecionar uma escala de tempo do osciloscópio tal que 1 ciclo de uma onda de $1kHz$ ocupe quase todo o eixo horizontal (eixo do tempo) do osciloscópio.

3. Feito isso, selecionamos $R = R_2$ e $C = C_1$ e ligamos a saída do gerador, o capacitor e o resistor em série.

4. A seguir, medimos as tensões do capacitor (V_C) e do resistor (V_R). Levamos em conta o fato, que o gerador e o osciloscópio possuem saída e entrada assimétricas. Por isso, precisamos cuidar para ligar sempre as pontas passivas juntas (cor preta). Caso contrário, podemos pôr em curto um dos dois componentes. Uma vez que as ponteiras pretas do osciloscópio e do gerador de funções estarão sempre ligadas juntas, precisaremos trocar a ordem entre o capacitor e o resistor, na ligação em série, para conseguirmos medir V_C ou V_R .

5. A tensão V_C no capacitor deverá ter aproximadamente a forma indicada na figura 2. A interpretação desta figura é dada com base no experimento anterior; no primeiro semiperíodo, quando a tensão da onda quadrada está "ligada", o capacitor se carrega de acordo com a relação dada por (1) e, antes da onda quadrada completar o meio período, ele se acha praticamente carregado; no segundo semiperíodo, quando a fonte está "desligada", ele descarrega-se conforme a relação (2).

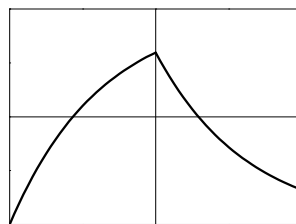


Fig.2 Tensão $V_C(t)$ no capacitor.

6. Meça as tensões V_C e V_R e faça gráficos $V_C(t)$ e $V_R(t)$.

7. Repita o procedimento para $R = R_1$ e $C = C_1$ depois para $R = R_2$ e $C = C_2$. Com isso, você poderá obter três gráficos para $V_C(t)$ e três para $V_R(t)$, além da tensão $V_{in}(t)$ da onda quadrada.

8. Em um papel milimetrado, coloque todos os gráficos conforme indicado na figura 3 preenchendo os parênteses com o valor de RC . Tome cuidado para que as escalas de tempo sejam coincidentes em todos os gráficos de uma mesma coluna.

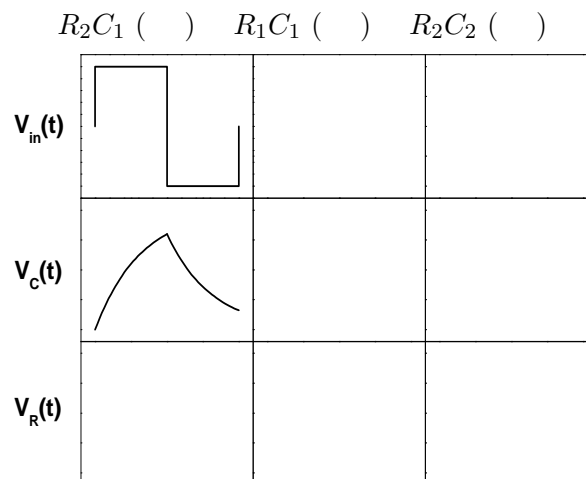


Fig.3 V_{in} , V_C e V_R em função do tempo para diferentes RC .

9. Interprete os gráficos de V_C .

10. Os gráficos de V_R , que dão a queda da tensão no resistor R, também nos informam sobre outra grandeza elétrica importante no circuito. Que grandeza é esta? Interprete estes gráficos em termos desta grandeza.

11. Existe uma relação entre as funções V_R e V_{in} da segunda coluna (para R_1 e C_1). Esta relação é um operador matemático que transforma a função V_{in} em V_R . Para $R_1 = 1k\Omega$ e $C_1 = 0,01\mu F$ a frequência do V_{in} ($1kHz$) é muito baixa, comparada com a frequência característica do circuito R_1C_1 ($\tau = 10^{-5}s$, $f_{R_1C_1} = 100kHz$). Em outras palavras o capacitor será carregado muito rápido e na relação

$$V_{in} = V_C + V_R, \quad (3)$$

V_C será aproximadamente igual a V_{in} ($V_C \approx V_{in}$). Temos ainda que

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = C \frac{dV_C(t)}{dt} \quad (4)$$

e

$$V_R = Ri(t) = RC \frac{dV_C(t)}{dt}. \quad (5)$$

Como $V_C \approx V_{in} \rightarrow \frac{dV_C(t)}{dt} \approx \frac{dV_{in}(t)}{dt}$ e então,

$$V_R = RC \frac{dV_{in}(t)}{dt}. \quad (6)$$

Podemos concluir, que medindo a corrente no circuito, ou respectivamente a queda de tensão no resistor, nós sabemos o **diferencial** do sinal da entrada V_{in} . Quando a variação do V_{in} é lenta, comparada com a constante de tempo num circuito RC , este circuito serve como "diferenciador" (veja Fig.4).

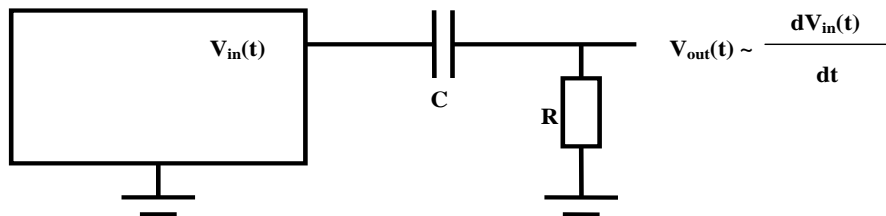


Fig.4 Circuito RC diferenciador.

12. Da mesma maneira, existe outro operador matemático, que relaciona o $V_C(t)$ e $V_{in}(t)$ na terceira coluna (para R_2 e C_2). Qual é a expressão para este outro operador? Encontre o critério, que caracteriza este comportamento e desenhe o circuito correspondente ao da Fig.4, que executa esta operação matemática.

13. Inclua no relatório as relações matemáticas, correspondentes ao comportamento do item 12, análogas às equações (3)-(6).

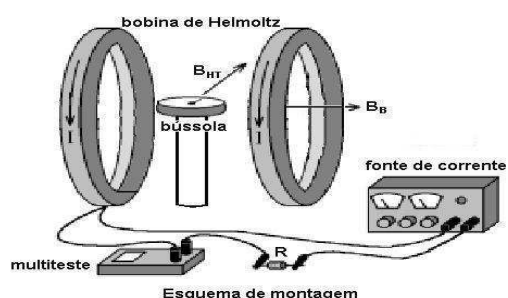
AULA 15: DETERMINAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE LOCAL

I. – Objetivos:

Ao término desta atividade você terá medido a componente horizontal do campo magnético terrestre local.

II. – Procedimento experimental:

O material disponível para a atividade é constituído de uma bobina de Helmholtz, uma fonte de corrente contínua, um multímetro operando como amperímetro e uma bússola.



III. – Considerações teóricas:

Sabemos que uma bússola orienta-se no campo magnético terrestre. Esta orientação pode ser modificada se algum campo magnético externo adicional for aplicado sobre ela. Neste caso a bússola procurará ficar orientada no campo magnético resultante da soma vetorial destes dois campos. A componente horizontal do campo magnético da Terra pode ser medido observando-se a mudança na orientação da bússola quando sobre ela for aplicado um campo magnético externo perpendicular ao campo magnético terrestre. Para produzir este campo magnético externo utilizaremos uma bobina de Helmholtz, que consiste de um par de bobinas comuns de mesmo raio R , alinhadas paralelamente uma a outra com os eixos coincidindo, e afastadas entre si de uma distância igual ao raio R . Tal arranjo é mostrado esquematicamente na figura acima. Com estas bobinas podemos produzir um campo magnético conhecido.

O valor do módulo do campo magnético \vec{B} ao longo do eixo de uma espira de raio R é:

$$B(x) = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 i R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$, e i é a corrente elétrica e x a distância medida a partir do centro de uma das bobinas e ao longo do eixo.

Mostre que o módulo do campo magnético \vec{B} no centro geométrico, ou seja, entre as duas espiras que compõe a bobina de Helmholtz é dado por:

$$B(x) = \frac{8Ni\mu_0}{R^5\sqrt{5}}$$

onde N é o número de espiras que compõe cada bobina.

Faça uma análise teórica da variação de \vec{B} no eixo das bobinas no intervalo $-R < x < +R$, colocando a origem do eixo x no centro geométrico.

IV. – Considerações de Natureza Prática:

O eixo da bobina deverá estar na posição horizontal e paralelo à direção leste-oeste, isto é, perpendicular ao eixo norte-sul.

A intensidade do campo magnético produzido pelas bobinas, \vec{B} , é função da corrente que circulará nas espiras. Se não houver corrente, a bússola colocada no interior da bobina de Helmholtz indicará a direção norte. Se a corrente aumentar, aparecerá um campo magnético perpendicular à componente horizontal de campo da Terra \vec{B}_{HT} , que fará a agulha da bússola girar de um certo ângulo. Quando a agulha estiver apontando a direção noroeste ou nordeste, isto é, estiver a 45° em relação à direção norte-sul, o campo da bobina será igual ao da componente horizontal do campo magnético da Terra. Na realidade, é possível determinar o valor do campo B_{HT} da Terra para qualquer que seja o ângulo de orientação da bússola.

Responda a seguinte questão:

Qual a relação entre os dois campos (campo da Terra, B_{HT} , e o campo magnético produzido pela bobina, B_B) e o ângulo da agulha da bússola com a direção Norte-Sul ?

V. – Procedimento Experimental:

Para termos uma maior precisão nas medidas é necessário alinharmos o eixo da bobina em relação aos eixos cardeais da Terra com bastante precisão. Para tanto executaremos um procedimento experimental, que deverá ser entendido por você:

1) Conecte a bobina de Helmholtz à fonte de tensão contínua, em série com um multímetro (operando como amperímetro) e com uma resistência de $100\ \Omega$. Coloque a bússola no centro da bobina.

2) Siga o procedimento abaixo para posicionar o eixo da bobina perpendicularmente à direção norte-sul.

2a) Com a fonte de corrente desligada (sem campo magnético), alinhe o eixo da bobina na direção norte-sul, isto é, torne o eixo da bobina paralelo á agulha da bússola;

2b) Em seguida faça passar pela bobina uma corrente de $100\ mA$;

ATENÇÃO: Para evitar super aquecimento no resistor de $100\ \Omega$ não ultrapasse os $100\ mA$ de corrente.;

2c) Essa corrente de $100\ mA$ faz com que o campo \vec{B}_B seja muito maior do que \vec{B}_{HT} , e a agulha da bússola ficará “presa” ao eixo da bobina;

2d) Faça uma rotação na bússola até que a agulha indique 90° ;

2e) Desligue a corrente e faça uma rotação de 90° em toda a bobina, a agulha passará a indicar 0° . O eixo da bobina estará então perpendicular ao eixo norte-sul.

3) Faça agora 9 (nove) medidas de valores da corrente na bobina para as quais a agulha assume ângulos θ entre 5° e 85° . Para $\theta = 45^\circ$ o campo produzido pela bobina será igual a componente horizontal do campo magnético da Terra.

4) Calcule os valores para a componente horizontal B_{TH} correspondente às nove medidas feitas. A média destes valores deverá fornecer a melhor expressão do valor experimental da componente horizontal do campo magnético terrestre.