

# Relatório Final de Atividades

Bolsa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq

Título: Redação de um Texto sobre as Experiências de Ampère  
com Materiais de Baixo Custo

Aluno: Fabio Miguel de Matos Ravanelli

RA: 060553

E-mail: famatos@ifi.unicamp.com.br

Orientador: Prof. Dr. André Koch Torres de Assis

E-mail: assis@ifi.unicamp.br

Homepage: [www.ifi.unicamp.br/~assis](http://www.ifi.unicamp.br/~assis)

Instituto de Física 'Gleb Wataghin' — UNICAMP  
Campinas, SP

Vigência: 01 de Agosto de 2008 a 31 de Julho de 2009

## Sumário

<b>1</b>	<b>Resumo</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Realização e Aprimoramento das Experiências de Ampère com Materiais de Baixo Custo</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Biografia de Ampère</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Materiais Utilizados nas Experiências que Reproduzimos</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Textos Produzidos Durante este Projeto</b>	<b>10</b>
6.1	Experiência da Hélice de Ampère . . . . .	11
6.2	Atração e Repulsão entre Condutores Retilíneos Paralelos . . . . .	12
6.3	Experiência da Espira de Inclinação . . . . .	12
6.4	Caso de Equilíbrio do Fio Sinuoso . . . . .	13
6.5	Caso de Equilíbrio das Correntes Anti-Paralelas . . . . .	15
<b>7</b>	<b>Produção Científica</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Perspectivas de Continuidade ou Desdobramento do Trabalho</b>	<b>16</b>
<b>9</b>	<b>Outras Informações</b>	<b>16</b>
<b>10</b>	<b>Apoio</b>	<b>17</b>
<b>11</b>	<b>Conclusão</b>	<b>17</b>
<b>12</b>	<b>Agradecimentos</b>	<b>17</b>
	<b>Referências</b>	<b>18</b>

## 1 Resumo

No decorrer das atividades desta bolsa de iniciação científica procedeu-se inicialmente a um aprimoramento das experiências que já haviam sido produzidas durante a vigência da Bolsa PIBIC/CNPq anterior, que durou de Agosto de 2007 a Julho de 2008, com o projeto “Experiências de Ampère com Materiais de Baixo Custo”. Também tentou-se realizar a reprodução de algumas experiências de Ampère que não haviam sido feitas durante o Projeto anterior. Dentre estas destaca-se a experiência do caso de equilíbrio das correntes ortogonais.

Aprofundou-se os estudos de alguns textos relativos ao projeto. Entre estes citamos:

- A tradução dos primeiros artigos fundamentais de Oersted, Biot, Savart e Ampère que dão origem à ciência do eletromagnetismo: [1], [2] e [3].
- Alguns artigos lidando com a reprodução das experiências de Oersted e de Ampère com materiais de baixo custo: [4], [5] e [6].
- Trabalhos discutindo a vida e a obra de Ampère: [7], [8] e [9].
- A tradução comentada da principal obra de Ampère, *Teoria dos Fenômenos Eletrodinâmicos, Deduzida Unicamente da Experiência*: [10].

As experiências realizadas e aprimoradas durante este Projeto foram as seguintes:

- Experiência da Hélice de Ampère
- Experiência da Espira de Inclinação
- Espira Reagindo ao Magnetismo Terrestre
- Caso de Equilíbrio do Fio Sinuoso
- Atração e Repulsão entre Condutores Retilíneos Paralelos
- Caso de Equilíbrio das Correntes Anti-Paralelas
- Caso de Equilíbrio da Não-Existência de Rotação Contínua
- Interação entre Condutores Retos Fazendo um Ângulo entre Si
- Atração e Repulsão entre um Ímã e um Fio com Corrente
- Caso de equilíbrio das correntes ortogonais

Os principais objetivos deste Projeto eram a elaboração de uma biografia sobre Ampère, além de uma série de textos descrevendo como reproduzir as principais experiências realizadas por Ampère com materiais de baixo custo. Tudo isto foi realizado de acordo com o planejado.

## 2 Introdução

André-Marie Ampère (1775-1836) foi um dos principais nomes do eletromagnetismo. James Clerk Maxwell, por exemplo, chamou-o de ‘Newton da eletricidade,’ [11, Vol. 2, artigo 528, pág. 175]. O principal resultado de suas pesquisas foi a obtenção de uma lei de força entre elementos de corrente com a qual conseguia descrever todas as experiências de interação entre condutores com corrente constante. Maxwell, no mesmo

parágrafo e página citados acima, mencionou que esta fórmula de Ampère ‘tem de sempre permanecer como a lei cardeal [mais importante] da eletrodinâmica.’

As pesquisas de Ampère para chegar em sua lei de força tiveram início em 1820, após a descoberta de H. C. Oersted (1777-1851) de que uma bússola sofre um giro ou deflexão quando é colocada paralela a um longo fio retilíneo conduzindo uma corrente constante, [1]. Como preparação para este projeto o bolsista estudou este artigo e fez uma reprodução das experiências de Oersted com materiais de baixo custo seguindo o trabalho de Chaib e Assis, [6].

Ampère interpretou esta experiência como sendo devida a uma interação direta entre condutores com corrente constante, supondo para isto a existência de correntes microscópicas no interior dos ímãs. Logo em seguida conseguiu mostrar que um fio em espiral conduzindo uma corrente constante era atraído ou repellido por um ímã cilíndrico, simulando assim a atração ou repulsão entre dois ímãs, dependendo da orientação de seus pólos magnéticos. Substituindo o ímã por um segundo fio em espiral com corrente constante, conseguiu mostrar a atração ou repulsão entre as duas espirais.

Isto levou Ampère a buscar uma interação entre longos fios retilíneos paralelos conduzindo correntes constantes. Ele teve sucesso nesta busca e mostrou que correntes de mesmo sentido se atraem e que correntes fluindo em sentidos opostos se repelem. Seus dois primeiros artigos descrevendo estas experiências, [12] e [13], já se encontram parcialmente traduzidos para o inglês, [7]. O primeiro deles já se encontra totalmente traduzido para o português, [3].

Para obter uma expressão matemática que expressasse a interação entre duas correntes nestes casos e em outros mais complicados, realizou uma série de experiências famosas. Seu principal trabalho contendo os resultados de seis anos de intensas pesquisas experimentais e teóricas foi publicado em 1826 com o título de “Teoria dos Fenômenos Eletrodinâmicos Deduzida Unicamente da Experiência.” Estudamos a tradução para o português desta obra, [10].

Um dos objetivos deste Projeto de iniciação científica foi o de tornar a obra de Ampère mais conhecida para os estudantes brasileiros. Com este intuito redigimos uma pequena biografia de Ampère contendo suas principais contribuições para o eletromagnetismo. Também escrevemos textos contendo uma descrição de suas experiências mais relevantes e mostrando como reproduzi-las utilizando materiais de baixo custo.

### **3 Realização e Aprimoramento das Experiências de Ampère com Materiais de Baixo Custo**

Durante o atual projeto foi necessário inicialmente o aprimoramento de algumas das experiências já realizadas durante a Bolsa PIBIC/CNPq anterior. Alguns contatos elétricos estavam instáveis. Se esta situação se perpetuasse, a descrição das experiências bem como a reprodução dos experimentos por outros estudantes poderia ser comprometida e até inviabilizada. Melhoramos os contatos elétricos dos diversos elementos do circuito (contatos da pilha com os fios, da bateria de carro com os fios, assim como dos fios condutores com as espiras móveis). Também tentou-se diminuir os atritos em várias montagens. Melhorou-se também as espiras astáticas. Isto é essencial para possibilitar a reprodução das experiências de Ampère.

Além disso, tentou-se a reprodução de algumas experiências novas que não havíamos feito durante o Projeto anterior. Trabalhamos na construção de uma agulha imantada de inclinação, na reprodução da experiência da ponte de Ampère e na experiência do caso de equilíbrio das correntes ortogonais.

### **4 Biografia de Ampère**

Durante este Projeto redigimos uma biografia de Ampère. Apresentamos a seguir um resumo daquilo que escrevemos.

André-Marie Ampère, Fig. 1, nasceu em 20 de janeiro de 1775 em Lyon, na França. Até os sete anos de idade a família de Ampère passava a maior parte do tempo em sua cidade natal, exceto nos meses de verão quando iam para a casa de campo que ficava na vila de Poleymieux. Em 1782 o pai de Ampère decidiu se estabelecer em Poleymieux para dedicar-se mais na educação de seu filho, [9, págs. 8 a 10].



Figura 1: André-Marie Ampère.

A educação de Ampère foi muito influenciada pelas teorias educacionais de Rousseau, [9, pág. 11] e [8]. Seu pai educou Ampère com base no livro *Émile*, [14], de Rousseau, que defendia uma educação livre. Ampère sempre foi auto-didata e nunca chegou a freqüentar formalmente uma escola. Seu pai dava-lhe total liberdade para estudar o que quisesse, seguindo seus próprios interesses. Além disso, lhe fornecia todas as condições para uma boa educação, como acesso a uma vasta biblioteca e aulas particulares com alguns tutores.

O interesse de Ampère por matemática começou prematuramente. Segundo a sua própria autobiografia, seu interesse começou aos 13 anos de idade, quando ele começou a ler os textos elementares, [9, pág. 16].

A partir de 1789, com o advento da revolução francesa, começa a acontecer uma série de tristes fatos na vida de Ampère. Primeiro, a sua irmã mais velha, Antoniette, morre aos 20 anos de idade, em 2 de março de 1792, [9, pág. 21]. Antoniette lhe fez companhia constante na sua juventude e sempre permaneceu em suas memórias sobre sua estada em Poleymieux. Mesmo muito tempo depois de sua morte, Ampère continuava escrevendo poesias em memória dela.

Já no ano seguinte ocorre a morte de seu pai em 23 de novembro. Isto teve um efeito devastador na vida de Ampère. Seu pai foi a figura masculina mais significativa na sua vida. Tal fato provocou uma melancolia permanente na vida de Ampère, [9, págs. 23].

Dezoito meses após a morte do pai, Ampère retomou as suas atividades, [9, pág. 24]. Foi influenciado por um renovado interesse em botânica e em um livro de poesias romanas intitulado *Corpus Poetarum Latinorum*.

Contudo, na primavera de 1796 a vida de Ampère toma uma nova direção. Ele conhece Catherine Antoniette Carron, com a qual casar-se-ia três anos mais tarde, [9, pág. 26]. Esta relação durou quatro anos. Estes foram os anos mais felizes da vida de Ampère, [8]. Em 12 de agosto de 1800 nasce o filho de Ampère, Jean Jacques.

Algumas das bases da vida profissional de Ampère também se formaram neste período. Ele começou a dar aulas de física, química e matemática, bem como publicou as suas primeiras memórias matemáticas, [9, pág. 32].

Em 1802 Ampère é indicado como professor para a *Bourg École Centrale*, em Ain, [15]. Nesta escola

ele passou boa parte de seu tempo ensinando física e química. Contudo, sua principal pesquisa foi em matemática. Escreveu um tratado de probabilidade intitulado “A teoria matemática dos jogos.” Esta obra foi submetida para a Academia de Ciências de Paris em 1803. Laplace notou um erro no trabalho de Ampère, explicando-o através de uma carta a Ampère. O trabalho foi então reimpresso. Este trabalho gerou uma amizade entre Ampère e outros cientistas da época, [9, pág. 63].

Sua esposa faleceu em julho de 1803. Ampère se sente culpado por ter vivido longe de sua mulher durante boa parte de seu casamento, decidindo deixar Lyon e ir para Paris.

Já neste período Ampère havia estabelecido uma reputação como professor de matemática e como pesquisador na área, sendo recomendado para o cargo de *Répétiteur* na *École Polytechnique* em 1804, [8].

Ampère casa-se novamente em primeiro de agosto de 1806 com Jeanne Potot. No entanto, mesmo antes do nascimento de sua filha em 6 de julho de 1807, o casal já estava vivendo com problemas. Separaram-se legalmente em 1808. A custódia da filha, Albine, ficou com Ampère, [9, págs. 128-129].

Também neste período foram feitas contribuições para a química. Por exemplo, ele teve participação na descoberta de alguns elementos químicos, como o cloro, o flúor e o iodo. Contudo, não teve tempo e recursos suficientes para desenvolver suas pesquisas, sendo que o crédito das descobertas foi dado a H. Davy (1778-1829), [8].

Até 1820 Ampère tinha adquirido uma certa reputação como matemático e químico. No entanto, se as suas pesquisas tivessem cessado neste ponto, certamente o nome de Ampère teria figurado na história da ciência de uma maneira não tão grandiosa quanto a que ocorreu pelas suas pesquisas que se sucederam a esta década, [8].

Em 1820 as atenções de Ampère mudaram completamente. Neste ano Hans Christian Oersted descobriu a deflexão de uma agulha imantada na presença de um fio conduzindo corrente constante. Tal experimento foi relatado em uma publicação em latim em 21 de julho de 1820, [1]. Esta experiência foi reportada na Academia de Ciências de Paris em 4 de setembro de 1820 por Arago. Ele repetiu a experiência em questão na Academia uma semana depois, em 11 de setembro, devido à descrença generalizada. Foi a partir daí que as pesquisas eletrodinâmicas de Ampère se iniciaram.

Oersted justificou a orientação da agulha imantada na presença do fio conduzindo corrente constante como sendo devida a um fluxo de fluido elétrico não só restrito ao interior do fio, mas também externo ao fio. Para Oersted, este fluxo fora do fio seria de forma helicoidal. As partículas magnéticas sofreriam uma resistência a este fluxo, sendo carregadas na direção deste. Em particular, as partículas magnéticas do pólo norte seriam carregadas na direção de propagação das cargas positivas do fluido elétrico, enquanto que as partículas do pólo sul seriam carregadas na direção de propagação das cargas negativas. Segundo Oersted, as cargas positivas e negativas se propagavam em sentidos contrários. Oersted não chegou a considerar a influência do magnetismo terrestre na orientação da agulha magnética.

Ampère descobriu que se a influência magnética terrestre fosse anulada, a agulha imantada se orientava perpendicularmente ao fio. Relatou isto à Academia em 18 de setembro de 1820, [9, pág. 238]. Em oposição à opinião da época, Ampère concluiu que não existe fluido magnético e que os efeitos magnéticos são produzidos por correntes elétricas no interior dos ímãs.

A partir daí Ampère começa a reproduzir todos os fenômenos magnéticos conhecidos utilizando apenas fios com corrente.

Foram demonstrados vários experimentos ao longo das semanas que sucederam à descoberta de Oersted. Já no dia 25 de setembro Ampère era capaz de produzir o fenômeno de atração e repulsão entre espirais com correntes, de modo análogo ao que ocorre com pólos magnéticos, [9, pág. 238]. Este experimento consistia em duas espirais feitas com um fio recoberto por um isolante para que os fios não se curto-circuitassem. Estes fios eram enrolados formando espirais concêntricas. Duas espirais feitas desta forma eram dispostas de frente a pra outra, em planos paralelos. Ao passar corrente pelas espirais, elas se comportavam como pólos magnéticos, se atraindo e se repelindo dependendo dos sentidos das correntes.

Em outubro de 1820 Ampère construiu um experimento mostrando a atração e repulsão entre fios retíl-

neos e paralelos transportando correntes constantes, [3] e [9, pág. 239]. Para este experimento Ampère utilizou um fio fixo e um outro fio móvel, livre para girar ao redor de um eixo paralelo ao fio fixo. Quando flui corrente no mesmo sentido em ambos os fios, estes se atraem. Quando as correntes fluem em sentidos contrários, eles se repelem.

Ainda na seqüência deste ano, entre o fim de setembro e o início de outubro, Ampère apresenta mais um experimento, chamado hoje em dia de hélice de Ampère. Ampère enrolava um fio no formato de hélice ao redor de um tubo de vidro oco, com o fio retornando ao longo do eixo do tubo de vidro. Com este experimento tentava reproduzir a ação diretriz sobre uma barra imantada horizontal sujeita ao magnetismo terrestre, [9, pág. 242]. Tal experimento não foi capaz de corresponder ao magnetismo terrestre, já que a hélice de Ampère não era orientada pela Terra. Contudo, ele correspondia a ímãs permanentes, já que as extremidades de duas destas hélices com corrente se atraíam ou se repeliam dependendo dos sentidos das correntes elétricas que fluíam por elas.

No dia 17 de outubro Ampère apresentou um experimento para Biot e Gay Lussac. A intenção inicial deste experimento era verificar a força entre dois condutores com orientações variáveis. No entanto, observou de maneira casual e não esperada a ação diretriz do magnetismo terrestre sobre um condutor com corrente. A partir desta experiência Ampère percebe que o tamanho da espira também influi no torque sofrido por esta. Ampère foi o primeiro a percebê-lo, [9, pág. 245].

Com base neste experimento Ampère constrói uma grande espira circular a qual respondia ao magnetismo terrestre, se orientando no plano meridiano terrestre de modo análogo à orientação de uma bússola. Desta forma Ampère reproduziu a ação de uma bússola de inclinação. Estes resultados foram apresentados à Academia no dia 30 de outubro de 1820, [9, pág. 237].

Dando continuidade aos experimentos desenvolvidos, constrói duas hélices paralelas tentando assim reproduzir a repulsão entre dois ímãs paralelos colocados lado a lado com seus pólos apontando no mesmo sentido. Nestas novas hélices o fio era apenas enrolado ao redor dos tubos, sem voltar ao longo do interior dos tubos, ao contrário do que ocorria na hélice de Ampère anterior. Ou seja, elas não possuíam uma compensação longitudinal. Estas novas hélices eram colocadas de maneira similar com o experimento de atração e repulsão entre fios retilíneos e paralelos. Ampère esperava inicialmente que ao passar corrente no mesmo sentido nas hélices, estas deveriam se repelir, assim como dois ímãs paralelos e com mesma orientação. Contudo, observou uma atração. Isto o levou a tentar entender o motivo desta experiência se comportar de maneira diferente da experiência anterior, na qual utilizava a hélice de Ampère. Ampère rapidamente notou que no primeiro tipo de hélice, que se comportava como uma bússola, o fio voltava por dentro da hélice. O mesmo não ocorria com o segundo tipo de hélice. Desta forma Ampère percebeu a contribuição longitudinal da corrente ao longo da hélice. Elaborou então a sua lei de adição de forças. Ela é análoga à lei da composição vetorial dos dias de hoje. Publicou-a em 6 de novembro de 1820, [9, pág. 247].

Ainda na seqüência, no dia 4 de dezembro, Ampère apresenta o princípio de simetria elaborado por ele, [9, pág. 251]. Através deste princípio Ampère apresenta a primeira formulação matemática da sua força. Este força depende não apenas da distância entre os elementos de corrente, mas também do ângulo entre eles e do ângulo entre cada elemento e a reta que os une.

Antes mesmo do fim de dezembro de 1820 Ampère começa a trabalhar em um novo método para obter a força entre dois elementos de corrente. Este novo método tornar-se-ia um dos fatos mais marcantes da sua obra. Ele consiste em experimentos denominados de casos de equilíbrio, ou “método de zero,” [11, Vol. 2, artigo 503, pág. 159].

Um dos casos de equilíbrio é a experiência do fio sinuoso. Tal experimento tinha como objetivo provar a lei de adição, [9, págs. 253-254]. O experimento em si consistia de dois fios verticais com correntes constantes de mesma intensidade e no mesmo sentido. Um dos fios era retilíneo e o outro era sinuoso (em ziguezague). Entre os fios havia uma espira astática, isto é, uma espira com corrente que é indiferente ao magnetismo terrestre. Quando a espira estava equidistante dos fios, a mesma ficava em equilíbrio. Com isto Ampère comprovou que os dois fios verticais exerciam torques opostos sobre a espira astática, comprovando

assim a lei da adição.

Em janeiro de 1821 utilizou a forma incompleta da sua lei de forças obtida até então para comparar a sua teoria com a de Biot e Savart. O experimento em questão consistia de dois fios retilíneos com corrente, um fio vertical e outro horizontal. Um pequeno ímã ficava equidistante dos dois fios, sendo que sua distância a cada um dos fios era muito maior que as dimensões do ímã. Para Biot e Savart, o ímã deveria permanecer em repouso. Já Ampère, através da sua fórmula incompleta, acreditava que o mesmo deveria se mover. Ao realizar o experimento nada aconteceu, com o ímã permanecendo em repouso. Podemos chamar esta experiência de caso de equilíbrio das correntes ortogonais. Tal fato, além de outros relacionados ao cansaço e doença, [16, pág. 103], foram responsáveis pela interrupção das pesquisas de Ampère em janeiro de 1821.

As mesmas só foram retomadas com a descoberta de Faraday da rotação contínua em setembro de 1821. Faraday conseguiu fazer um ímã girar ao redor de um fio com corrente, ou um fio com corrente girar ao redor de um ímã fixo. Rapidamente Ampère se esforçou em reproduzir as experiências de Faraday utilizando o seu equivalente eletrodinâmico. Isto é, substituindo os ímãs permanentes por fios com corrente. Ampère foi o primeiro a obter a rotação contínua apenas com o magnetismo terrestre.

Na seqüência Ampère conseguiu ainda obter a rotação contínua de um ímã ao redor do seu próprio eixo. O próprio Faraday havia tentado obter este efeito sem sucesso. Faraday chegou a afirmar que não acreditava ser possível este efeito. Tal experiência de Ampère foi comunicada para a Academia de Ciências no dia 7 de janeiro de 1822, [9, pág. 292].

Estas experiências deram um novo ânimo a Ampère. A partir daí imaginou poder obter rotação contínua utilizando uma espira astática. Contudo, ao realizar o experimento em março de 1822, não obteve o resultado desejado, já que a espira permaneceu em equilíbrio. Podemos chamar esta experiência de caso de equilíbrio da não existência de rotação contínua.

Ampère utilizou esta experiência para obter que uma das constantes da sua fórmula,  $k$ , que havia considerado inicialmente como sendo nula ou muito pequena, não o era. Descobriu que o valor numérico desta constante valia  $-1/2$ . Isto torna esta experiência de extrema importância no conjunto da obra desenvolvida por Ampère, [8]. Com este valor numérico conseguiu explicar não apenas a inexistência do torque na experiência anterior do caso de equilíbrio da não existência de rotação contínua, mas também a inexistência do torque no caso de equilíbrio das correntes ortogonais.

O fato de  $k = -1/2$  surpreendeu a Ampère, já que antes acreditava que  $k = 0$ . Em particular, se  $k$  fosse de fato negativo, isto implicaria em uma repulsão entre dois elementos de corrente paralelos e alinhados, conduzindo correntes no mesmo sentido. Isto precisava ser testado. Para isto foi elaborado o experimento chamado mais tarde de ponte de Ampère. O mesmo foi bem sucedido. A partir deste instante Ampère passou a ficar convencido de que de fato  $k = -1/2$ , obtendo então o valor final de sua fórmula para a força entre dois elementos de corrente. Em 1826 publicou sua obra mais importante contendo o valor final de sua fórmula, as experiências que a comprovavam e diversos desenvolvimentos teóricos obtidos a partir dela. Recentemente ela foi totalmente traduzida para o português, [10]. A teoria de Ampère se tornou fundamental para os desenvolvimentos futuros no campo do magnetismo e da eletricidade.

Em 1826 Ampère foi indicado para a cátedra de professor na *Université de France*, permanecendo lá até a sua morte. Ainda em Paris Ampère trabalhou em uma variedade de tópicos, incluindo química, física, matemática e metafísica. Em 1826 Ampère começou a lecionar no *Collège de France*. Lá podia lecionar da sua própria maneira, em detrimento da *École Polytechnique*, onde os tópicos eram fixos.

Logo após 1827 a atividade científica de Ampère declinou rapidamente. Esta data coincide com os problemas no casamento da filha, [9, pág. 354]. Sua filha se casou com um dos oficiais de Napoleão em 1827. Seu marido era alcoólatra. Em pouco tempo o seu casamento já estava com problemas. Sua filha voltou para a casa de Ampère. Ele permitiu alguns dias depois que o marido da filha também passasse a viver com eles. A situação do casamento não era boa, causando grande infelicidade a Ampère, [8].

A partir daí ele dedicou suas atenções para a filosofia e para uma classificação das ciências, sendo que o primeiro volume foi publicado em 1834, [17], e o segundo publicado postumamente por meio de seu filho

em 1843, [18].

Ampère faleceu em 10 de junho de 1836 em Marseille, sendo enterrado no cemitério de Montmartre em Paris, Fig. 2.



Figura 2: Túmulo de André-Marie Ampère em Paris.

## 5 Materiais Utilizados nas Experiências que Reproduzimos

Neste projeto reproduzimos algumas das experiências mais importantes de Ampère utilizando materiais de baixo custo. A seguir apresentaremos um resumo geral dos materiais utilizados nas várias experiências.

Em muitos dos experimentos foi necessário construir um suporte de madeira para apoiar os circuitos. Conseguiu-se retalhos de madeira em uma fábrica de móveis. A madeira obtida foi um compensado de 15 mm de espessura. É importante que com base nas dimensões utilizadas consiga-se materiais rígidos. Muitos dos experimentos utilizaram bases de madeira e hastes com dimensões que não excedem 40 cm.

Outros materiais podem ser utilizados conforme a necessidade ou a disponibilidade. Por exemplo, algumas madeiras podem ser substituídas por isopor ou por um papelão. Deve-se tomar alguns pequenos cuidados nos experimentos que utilizam correntes elevadas para evitar que o calor dissipado não derreta ou queime os materiais. Por isto, a recomendação de se usar madeira. No entanto, a utilização de outros materiais não fica descartada em algumas montagens.

Um dos principais materiais que foram utilizados na construção das espiras móveis foi um fio esmaltado bem leve. Este fio dificilmente pode ser substituído. Tal fio não é vendido normalmente no comércio usual. Tentou-se adquiri-lo sem sucesso em casas de material elétrico e outras lojas da área. O fio somente foi obtido em uma oficina especializada em consertos de motores elétricos. No entanto, por tratar-se de uma quantidade ínfima de fio (considerando-se a quantidade de fio necessária para enrolar um motor elétrico), o mesmo foi obtido gratuitamente.

Muitos dos experimentos necessitaram de correntes baixas ou moderadas para poderem ser observados. Isto pode ser obtido inclusive com pilhas comuns. Todavia, recomenda-se a utilização de uma fonte AC/DC já que isto torna desnecessária a substituição das pilhas devido ao desgaste. No decorrer das experiências utilizou-se um recarregador de celular antigo que não mais se encontrava em uso, Fig. 3.

Em alguns dos experimentos foi necessário utilizar um fonte de corrente capaz de fornecer correntes elevadas, da ordem de 10 A. Tal corrente dificilmente é obtida com fontes de corrente comuns. Utilizou-se

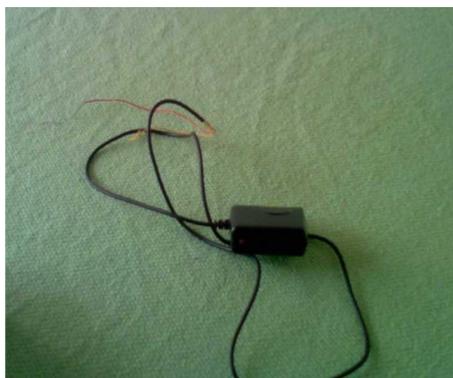


Figura 3: Fonte de corrente contínua construída a partir de um recarregador de celular usado.



Figura 4: Bateria automotiva utilizada como fonte de corrente em alguns dos experimentos.

uma bateria automotiva de 12 V e uma corrente máxima de 40 A, Fig. 4. Esta bateria pode ser obtida em oficinas auto-elétricas ou em outros estabelecimentos especializados. Não se faz necessário comprar uma nova, já que é muito cara e isto foge aos propósitos destas experiências. A mesma pode ser obtida a um valor simbólico quando não mais dispõe de condições de ser utilizada em veículos automotivos. Mesmo nestas condições ela pode ser utilizada nos experimentos aqui descritos, já que estes não necessitam permanecer ligados por muito tempo. Em geral podem ser observados os fenômenos desejados em cada experiência mantendo a bateria ligada por apenas alguns segundos.

## 6 Textos Produzidos Durante este Projeto

Durante esta iniciação científica escrevemos textos descrevendo a reprodução das experiências mais importantes de Ampère. Como o objetivo era tornar a obra de Ampère mais acessível aos estudantes, estas experiências foram reproduzidas utilizando materiais de baixo custo. Por uma orientação do Pibic vem que este Relatório Final deve conter no máximo 20 páginas. Devido a isto não incluímos todos os textos produzidos neste Projeto, mas apenas um resumo de algumas descrições mais significativas.

Os textos e os experimentos foram padronizados o máximo possível. Todos os experimentos utilizam basicamente os mesmos materiais. Isto facilita a reprodução dos mesmos, já que a aquisição destes materiais torna-se mais simples e rápida. Os materiais utilizados em uma experiência, além de serem baratos e fáceis de serem obtidos, na maioria dos casos podem ser reaproveitados para a construção de outros experimentos.

A padronização dos textos permite uma continuidade do método utilizado para construir os experimentos e o leitor não estará sujeito a grandes variações na maneira de proceder para elaborar os experimentos.

Em cada um dos textos primeiro descreveu-se brevemente os objetivos da experiência e a sua importância para o desenvolvimento da obra de Ampère. Os experimentos realizados tiveram um papel fundamental na obra de Ampère, já que a dedução de sua lei força entre elementos de corrente pautou-se nestes casos. Os resultados destes experimentos contribuíram, inclusive, para que Ampère modificasse as suas hipóteses iniciais.

Na seqüência do texto apresentou-se os materiais necessários para a construção do experimento. Além de apresentar os materiais que utilizamos, enfatizamos algumas possibilidades de materiais alternativos. Também mostramos formas de obter os materiais mais difíceis. Assim possibilita-se um maior número de opções para a reprodução dos experimentos.

Somente depois disto que se introduziu ao leitor como proceder para a montagem do experimento. Nesta

fase foram utilizadas várias fotos e esboços para possibilitar a melhor compreensão do processo narrado. Detalhou-se a melhor maneira de construir cada um dos experimentos.

Por fim, foi apresentada uma seção discutindo como utilizar cada um dos experimentos e o que se espera observar nestes casos. Isto faz-se necessário para evitar ambigüidades nos resultados. Isto também ajuda a evitar o não funcionamento do experimento (por exemplo, devido a um mal contato elétrico).

Muitas das experiências de Ampère fazem uso do método de equilíbrio. Neste método busca-se uma certa configuração tal que dois circuitos exercem uma força nula (ou um torque nulo) sobre uma parte móvel de um terceiro circuito. Antes de realizar exatamente estas experiências, mostramos situações em que se espera uma força diferente de zero (ou um torque diferente de zero) nesta parte móvel do terceiro circuito. Apenas após se conseguir estes efeitos é que passamos para a reprodução das experiências de Ampère. A importância disto é para evitar que um mal contato em alguma parte do circuito leve a uma interpretação errada da experiência. Isto é, se houver algum mal contato isto pode levar automaticamente a uma inexistência da força (ou do torque) sobre uma parte móvel do terceiro circuito, sem que isto seja devido a um equilíbrio entre duas forças opostas (ou entre dois torques opostos).

Foram redigidos ao todo 10 textos relativos às experiências descritas na Seção 1. Cada texto tem em média 6 páginas e 10 imagens. Estas imagens contêm fotos das experiências e também algumas figuras feitas com o software CorelDraw. Estas figuras possibilitam uma melhor compreensão do experimento e de como construí-lo.

Apresentamos agora um resumo de alguns dos textos que redigimos neste Projeto.

## 6.1 Experiência da Hélice de Ampère

O experimento da hélice de Ampère busca reproduzir o comportamento de uma bússola utilizando apenas um circuito com corrente constante. Uma bússola suspensa por seu centro e livre para girar no plano horizontal é influenciada por outros ímãs e também pelo magnetismo terrestre. Este experimento foi realizado por Ampère entre setembro e outubro de 1820, sendo relatado em um dos seus artigos publicados em 1820, [13] e [9].

A hélice consiste de dois segmentos cilíndricos dispostos horizontalmente e podendo girar livremente neste plano ao redor de um eixo vertical central. Uma corrente constante flui ao redor da hélice. Ao aproximar-se um ímã permanente de uma das extremidades da hélice, esta sofre um torque. Esta extremidade da hélice é atraída ou repelida pelo ímã conforme o sentido da corrente e o pólo do ímã. Ou seja, a hélice com corrente comporta-se como um longo ímã cilíndrico. Na Fig. 5 apresentamos uma visão geral desta montagem, com uma foto de nossa experiência na Fig. 6.

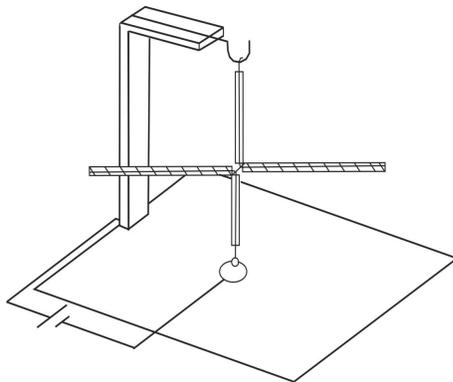


Figura 5: Esboço da experiência da hélice de Ampère. Figura 6: Foto da experiência da hélice de Ampère.

## 6.2 Atração e Repulsão entre Condutores Retilíneos Paralelos

Em 9 de outubro de 1820, aproximadamente um mês após a descoberta de Oersted, Ampère mostrou para a Academia de Ciências da França um experimento demonstrando a atração e repulsão entre fios retilíneos e paralelos carregando corrente constante, [3] e [9, pág. 239]. Ampère já havia demonstrado anteriormente a interação entre fios com corrente, mas com espirais. Ele também foi o primeiro a demonstrar a interação entre fios retilíneos com corrente constante.

Esta experiência consiste em dois condutores retilíneos e paralelos. Um deles é fixo no centro da base da montagem experimental, o outro fica suspenso por duas hastes verticais e pode girar ao redor de um eixo horizontal que liga as extremidades superiores do condutor. Este condutor foi moldado na forma da letra U. As pontas dos fios do condutor em U foram desencampadas para fazerem contato com os fios da haste vertical, Fig. 7. Os fios provenientes das hastes verticais estavam ligados a uma bateria fechando o contato elétrico.

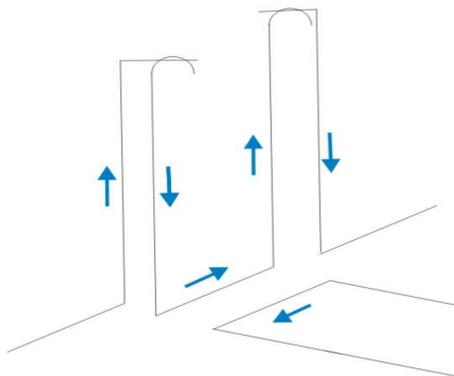


Figura 7: Arranjo experimental indicando os sentidos das correntes.

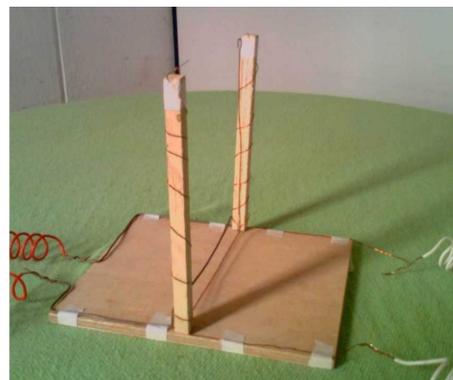


Figura 8: Foto da nossa experiência mostrando a atração e repulsão entre condutores retilíneos paralelos.

Com esta configuração utilizada foi possível diminuir sensivelmente o atrito, que é uma das maiores dificuldades de realizar os experimentos aqui descritos. A parte horizontal do primeiro condutor, fixa no laboratório, é paralela à parte de baixo do segundo condutor em formato da letra U, ficando estas duas partes na mesma altura. Assim foi possível a nítida percepção do fenômeno de atração e de repulsão. Quando a corrente nos fios retilíneos flui no mesmo sentido, os fios se atraem. Quando ela flui em sentidos contrários nos dois fios, eles se repelem. Uma foto de nossa montagem aparece na Fig. 8

## 6.3 Experiência da Espira de Inclinação

Ampère também conseguiu reproduzir com correntes elétricas a orientação magnética de uma agulha de inclinação. Uma agulha de inclinação é a que pode girar no plano do meridiano magnético ao redor de um eixo horizontal perpendicular a este plano e passando pelo centro da agulha. No equilíbrio a agulha vai formar um ângulo com a horizontal, chamado de ângulo de inclinação magnética. A espira de inclinação pode ser utilizada para determinar a ação diretriz do magnetismo terrestre.

Em nossa montagem, assim como na de Ampère, substituímos a agulha magnética por uma espira retangular que podia girar ao redor de um eixo horizontal que passa pelo centro da espira. A espira é feita de um fio rígido capaz de suportar correntes elevadas. A corrente segue pelo eixo central de simetria, dá a volta em um dos lados do retângulo, segue pelo outro lado do retângulo, saindo então pela outra extremidade do eixo

central, Fig. 9. As pontas do fio foram desencapadas. A montagem foi tornada rígida com a utilização de fita adesiva. A espira retangular tem dimensões de 20 por 40 cm, formando dois quadrados de 20 cm de lado, unidos por um eixo central horizontal que é fixo em relação à Terra. A espira tem liberdade para girar no plano vertical ao redor do eixo horizontal central.

Para lograr êxito na realização deste experimento foi necessário impedir que as bordas da espira interagissem com o fio que leva corrente até a montagem. Isto foi feito trançando dois fios esmaltados no centro da base, Fig. 10. Esta trança se divide em seus fios originais, sendo que cada um destes é guiado para um dos postes onde ele faz contato com a espira de inclinação.

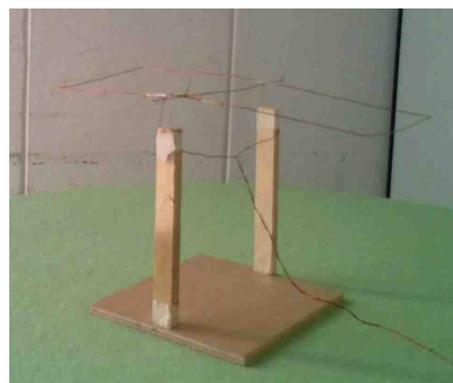
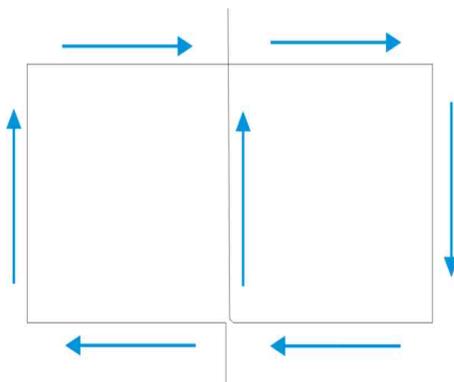


Figura 9: Sentidos da corrente na espira de inclinação. Figura 10: Montagem experimental utilizada para a experiência da espira de inclinação.

Inicialmente o plano da espira é horizontal. Ao passar corrente na espira observa-se que ela é defletida, com seu plano ficando inclinado em relação ao plano horizontal. O plano de equilíbrio da espira com corrente é ortogonal à direção de uma agulha imantada de inclinação. Algumas vezes a espira tende a dar mais de meia volta em torno do seu eixo para poder se orientar em relação ao magnetismo terrestre. Para possibilitar este efeito é necessário elevar a altura dos postes centrais, tornando-os maiores do que o braço da espira. Também pode-se virar a espira como um todo, dando meia volta no plano horizontal. Após algumas oscilações, a espira retorna ao repouso, com seu plano permanecendo inclinado em relação ao plano horizontal enquanto fluir uma corrente constante por ela.

#### 6.4 Caso de Equilíbrio do Fio Sinuoso

Uma das principais contribuições de Ampère para a ciência experimental foi sua criação do que chamou de “casos de equilíbrio” e as conseqüências teóricas que conseguiu obter destas experiências, [19, págs. 185-199]. Tais experimentos também receberam o nome de “método de zero,” [11, Vol. 2, artigo 503, pág. 159].

Palavras de Ampère descrevendo o método, [20] e [10, pág. 90]:

Mas existe uma outra maneira de alcançar mais diretamente o mesmo objetivo. Foi esta [maneira] que segui desde então e que me conduziu aos resultados que desejava. Ela consiste em constatar, pela experiência, que as partes móveis dos condutores permanecem, em certos casos, exatamente em equilíbrio entre forças iguais, ou entre torques iguais, qualquer que seja além disto a forma da parte móvel, e de procurar diretamente, com a ajuda do cálculo, qual que deve ser o valor da ação mútua entre duas porções infinitamente pequenas, para que o equilíbrio seja efetivamente independente da forma da parte móvel.

Ou seja, temos um condutor móvel *A*. Ele fica sob a ação oposta de dois outros condutores *B* e *C*. Ampère busca situações de equilíbrio não triviais tais que as ações conjuntas de *B* e de *C* sobre *A* se anulem. A partir da observação experimental sobre as condições em que conseguia este equilíbrio, assim como da análise matemática mostrando que condições precisavam ser satisfeitas sobre sua força para que houvesse este equilíbrio, conseguiu obter várias conseqüências importantes sobre como deve se comportar a força entre elementos de corrente (cair com o quadrado da distância, como deve ser o comportamento angular etc.).

Nesta experiência do fio sinuoso ele pretendeu comprovar a lei de adição. De acordo em esta lei, a força exercida por um elemento de corrente sobre um segundo elemento de corrente tem o mesmo valor que a soma das forças exercidas sobre o segundo elemento de corrente pelas decomposições vetoriais do primeiro elemento.

Este experimento faz uso de uma espira astática, Fig. 13. Esta espira fica em um plano vertical e contém dois retângulos nos quais fluem correntes de mesma intensidade em sentidos opostos (uma corrente flui no sentido horário e outra no sentido anti-horário). Esta espira é livre para girar ao redor de seu eixo vertical. Os torques exercidos pelo magnetismo terrestre sobre os dois retângulos desta espira se cancelam. Ela é então indiferente ao magnetismo terrestre, sendo esta a origem do nome espira “astática.” Ou seja, ela é insensível ao magnetismo terrestre, não sendo defletida pela Terra.

Colocam-se dois condutores verticais em lados opostos de uma espira astática. Passa-se uma corrente de mesma intensidade nos dois condutores. Os dois repelem a espira astática. Quando eles estão a distâncias diferentes da espira astática, esta sofre um torque, girando ao redor de um eixo vertical. O objetivo principal da experiência é observar que eles não ocasionam uma deflexão na espira astática quando estão a iguais distâncias dela, mesmo se um dos condutores for sinuoso, com a corrente seguindo em zigue-zague. Isto comprova a lei de adição de Ampère

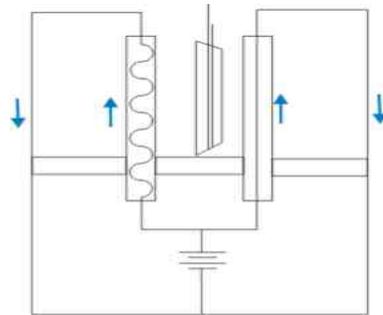


Figura 11: A espira astática fica entre um fio sinuoso e um fio reto.



Figura 12: Nossa montagem experimental da experiência do fio sinuoso.

Embora este experimento possa parecer simples, este não é o caso. A condição de equilíbrio é uma exceção. Ela só ocorre quando o fio sinuoso e o fio retilíneo estão a distâncias iguais de um dos lados verticais da espira astática. Antes de observar esta condição de equilíbrio, deve-se observar que a espira astática gira quando está a distâncias diferentes dos dois condutores fixos. Isto é, com um dos lados verticais da espira astática a distâncias diferentes do fio sinuoso e do fio reto. Primeiro deve-se observar este torque, e depois a falta de torque quando estas distâncias são iguais. Com isto pode-se então ter certeza de que a falta de torque neste último caso é realmente um resultado experimental não trivial, que não está vindo devido a algum mal contato elétrico em alguma parte do circuito (como, por exemplo, algo que impeça a corrente de fluir na espira astática).

Por isto, em nossa experiência, construiu-se um braço móvel que pode ser utilizado para aproximar ou afastar os fios da espira astática. Se o fio sinuoso e o fio retilíneo não estiverem equidistantes da espira, esta sofrerá uma deflexão. Observamos isto em nossa montagem.

## 6.5 Caso de Equilíbrio das Correntes Anti-Paralelas

Novamente este experimento consiste em uma espira astática livre para girar no plano horizontal ao redor de seu eixo de simetria vertical. Coloca-se um fio retilíneo com corrente passando abaixo da espira e bem no centro desta (a projeção do eixo central da espira astática coincidindo com o centro do fio reto), Fig. 14. Observa-se que para um ângulo qualquer entre o fio retilíneo e o plano da espira astática, a espira permanece em repouso. Ou seja, o fio reto com corrente não exerce torque sobre a espira astática. Tal experimento foi utilizado por Ampère para provar que tanto a atração quanto a repulsão têm o mesmo valor absoluto.

Em nossa reprodução desta experiência, um fio rígido foi desencapado nas pontas e fixado em uma pequena madeira com dimensões de 15 cm por 2 cm de largura e fixada com um prego central na base do suporte. Para podermos ajustar a posição da espira em relação ao fio, modificou-se o poste da montagem usual para conferir a ele um movimento horizontal. Para este experimento também utilizou-se como fonte de corrente a bateria automotiva por ser necessária uma corrente elevada para poder visualizar mais facilmente o fenômeno.

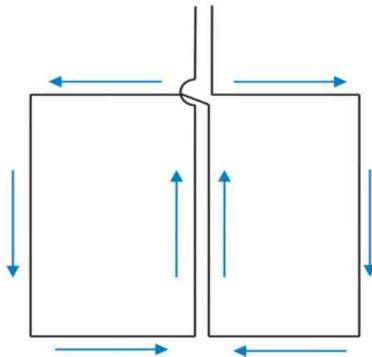


Figura 13: Espira astática, indiferente ao magnetismo terrestre.

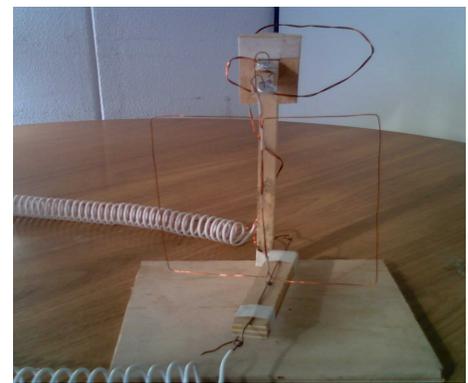


Figura 14: Nossa montagem experimental do caso de equilíbrio das correntes anti-paralelas.

Quando a projeção vertical do centro da espira astática coincide com o centro do fio, a espira astática permanece em repouso qualquer que seja o ângulo entre o fio reto e o plano da espira. Isto significa que é nulo o torque resultante sobre a espira astática. Contudo, se a projeção do eixo da espira não passa pelo centro do fio, então a espira sofre um torque girando de um certo ângulo em relação à sua posição original.

Uma das dificuldades com os experimentos conhecidos como casos de equilíbrio de Ampère é mostrar ao espectador que o equilíbrio é uma situação especial e não um acontecimento fortuito. A espira astática vai ficar em repouso caso não flua corrente por alguma parte do circuito (devido a algum mal contato, por exemplo), ou caso exista um grande atrito atuando sobre a espira. Para evitar estes problemas, é necessário em primeiro lugar mostrar que quando não há uma simetria apropriada, vai ocorrer um torque visível sobre a espira astática. Isto comprova que a corrente está fluindo por todo o sistema e que o atrito sobre a espira é pequeno o suficiente tal que permite que ela gire.

Somente depois disto deve-se colocar o sistema com a simetria apropriada tal que dois torques iguais e opostos se cancelem exatamente. Neste último caso a espira não gira, qualquer que seja sua orientação inicial.

## 7 Produção Científica

No decorrer da vigência deste Projeto o bolsista publicou três artigos em conjunto com seu orientador:

1. Consequences of a quadratic law of the lever, Proceedings of the 5th Int. Conf. on Hands-on Science, Espaço Ciência, Olinda-Recife, págs. 82-84, 2008, [21].
2. Reflexões sobre o conceito de centro de gravidade nos livros didáticos, Ciência & Ensino, Vol. 2 (2), 2008, [22].
3. Consequences of a generalized law of the lever, American Journal of Physics, Vol. 77, págs. 54-58, 2009, [23].

## 8 Perspectivas de Continuidade ou Desdobramento do Trabalho

Este projeto pode ser ampliado no futuro. As experiências já reproduzidas com sucesso e os textos descrevendo-as podem servir como modelos para a realização de outros trabalhos ao longo da mesma linha de pesquisa.

## 9 Outras Informações

O desempenho acadêmico do estudante permaneceu bom durante o segundo semestre de 2008 e o primeiro semestre de 2009. Não houveram reprovações em disciplinas. As notas continuaram elevadas em todas as disciplinas. O coeficiente de rendimento padrão do aluno terminou o semestre em 1,6889. Matérias cursadas e suas notas (marcamos com “?” as notas que ainda não foram divulgadas):

- BD 681 Fundamentos de Anatomia, Histologia e Fisiologia Humana: 8,7
- EL 211 Política Educacional: Estrutura e Funcionamento da Educação Brasileira: ?
- F 320 Termodinâmica: 7,0
- F 489 Estrutura da Matéria II: 7,1
- F 502 Eletromagnetismo I: 8,1
- F 520 Métodos Matemáticos da Física I: 7,0
- F 550 Radiação: Interação e Detecção: 9,6
- F 650 Efeitos Biológicos das Radiações Ionizantes (Radiobiologia): 9,0
- F 709 Tópicos de Ensino de Física II: 10,0
- F 740 Métodos da Física Experimental III: ?
- F 752 Ressonância Magnética Aplicada a Medicina: 7,5
- F 852 Física da Radiologia: 9,1
- F 854 Física da Radioterapia: 9,1
- MC 920 Introdução ao Processamento de Imagem Digital 8,5

O aluno obteve o índice 4 de classificação na turma, decaindo uma posição em relação a semestres anteriores. Apesar disto, esta classificação ainda pode ser considerada muito boa.

## **10 Apoio**

PIBIC/CNPq.

## **11 Conclusão**

Todas as atividades planejadas neste Projeto foram realizadas. O cronograma estabelecido foi cumprido. Além das atividades iniciais planejadas, também foram realizadas atividades adicionais.

## **12 Agradecimentos**

Fabio Miguel de Matos Ravanelli agradece ao PIBIC/CNPq pela concessão desta bolsa de iniciação científica.

## Referências

- [1] H. C. Ørsted. Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 10:115–122, 1986. Tradução de Roberto de A. Martins.
- [2] A. K. T. Assis and J. P. M. C. Chaib. Nota sobre o magnetismo da pilha de Volta — tradução comentada do primeiro artigo de Biot e Savart sobre eletromagnetismo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 16:303–306, 2006. Disponível em: [www.ifi.unicamp.br/~assis](http://www.ifi.unicamp.br/~assis).
- [3] J. P. M. d. C. Chaib and A. K. T. Assis. Sobre os efeitos das correntes elétricas — Tradução comentada da primeira obra de Ampère sobre eletrodinâmica. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, 5:85–102, 2007. Disponível em: [www.ifi.unicamp.br/~assis](http://www.ifi.unicamp.br/~assis).
- [4] A. K. T. Assis, M. P. Souza Filho, J. J. Caluzi, and J. P. M. C. Chaib. From electromagnetism to electrodynamics: Ampère’s demonstration of the interaction between current carrying wires. In M. F. Costa, B. V. Dorrio, and R. Reis, editors, *Proceedings of the 4th International Conference on Hands-on Science*, pages 9–16. University of Azores, Ponta Delgada, 2007. Disponível em: [www.ifi.unicamp.br/~assis](http://www.ifi.unicamp.br/~assis).
- [5] M. P. Souza Filho, J. P. M. C. Chaib, J. J. Caluzi, and A. K. T. Assis. Demonstração didática da interação entre correntes elétricas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:605–612, 2007. Disponível em: [www.ifi.unicamp.br/~assis](http://www.ifi.unicamp.br/~assis).
- [6] J. P. M. C. Chaib and A. K. T. Assis. Experiência de Oersted em sala de aula. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:41–51, 2007. Disponível em: [www.ifi.unicamp.br/~assis](http://www.ifi.unicamp.br/~assis).
- [7] R. A. R. Tricker. *Early Electrodynamics — The First Law of Circulation*. Pergamon, Oxford, 1965.
- [8] L. P. Williams. Ampère, André-Marie. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 1, pages 139–147, New York, 1981. Charles Scribner’s Sons.
- [9] J. R. Hofmann. *André-Marie Ampère, Enlightenment and Electrodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- [10] J. P. M. d. C. Chaib. *Análise do Significado e da Evolução do Conceito de Força de Ampère, juntamente com a Tradução Comentada de sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas—UNICAMP, Campinas, SP, 2009. Supervisor: A. K. T. Assis. Available at [webbif.ifi.unicamp.br/teses/](http://webbif.ifi.unicamp.br/teses/) and at [www.ifi.unicamp.br/~assis/](http://www.ifi.unicamp.br/~assis/).
- [11] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Dover, New York, 1954.
- [12] A.-M. Ampère. Mémoire présenté à l’académie royale des sciences, le 2 octobre 1820, où se trouve compris le résumé de ce qui avait été lu à la même académie les 18 et 25 septembre 1820, sur les effets des courans électriques. *Annales de Chimie et de Physique*, 15:59-76, 1820. Available at: <http://www.ampere.cnrs.fr/>.
- [13] A.-M. Ampère. Suite du mémoire sur l’action mutuelle entre deux courans électriques, entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimants. *Annales de Chimie et de Physique*, 15:170-208, 1820. Available at: <http://www.ampere.cnrs.fr/>.
- [14] J.-J. Rousseau. *Emile, ou, De l’Éducation*. J. Néalme, 1764.

- [15] André-Marie Ampère. In *Encyclopædia Britannica*. 2009. Retrieved from Encyclopædia Britannica Online: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/21416/Andre-Marie-Ampere>.
- [16] C. Blondel. *A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820-1827)*. Bibliothèque Nationale, Paris, 1982.
- [17] A. M. Ampère. *Essai sur la Philosophie des Sciences*. Bachelier, Paris, 1834.
- [18] A. M. Ampère. *Essai sur la Philosophie des Sciences, Second Partie*. Bachelier, Paris, 1843.
- [19] A. M. Ampère. *Théorie Mathématique des Phénomènes Électro-dynamiques uniquement Déduite de l'Expérience*. Sceaux, Paris, Jacques Gabay edition, 1990. Réimpression du Mémoire fondamental d'André -Marie Ampère paru en 1827 dans les Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France, année 1823, Tome VI, pp. 175-288.
- [20] A.-M. Ampère. Mémoire sur la détermination de la formule qui représente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de conducteurs voltaïques. lu à l'académie royale des sciences, dans la séance du 10 juin 1822. *Annales de Chimie et de Physique*, 20: 398-421, 1822.
- [21] A. K. T. Assis and F. M. M. Ravanelli. Consequences of a quadratic law of the lever. In M. F. P. d. C. M. Costa, J. B. V. Dorrío, A. C. Pavão, and M. Muramatsu, editors, *Proceedings of the 5th Int. Conf. on Hands-on Science*, pages 82–84. Espaço Ciência, Olinda-Recife, 2008.
- [22] A. K. T. Assis and F. M. d. M. Ravanelli. Reflexões sobre o conceito de centro de gravidade nos livros didáticos. *Ciência & Ensino*, 2(2), 2008.
- [23] A. K. T. Assis and F. M. d. M. Ravanelli. Consequences of a generalized law of the lever. *American Journal of Physics*, 77:54–58, 2009.