



Roteiro de Experimentos para a disciplina de Laboratório de Física 3

Circuitos Elétricos: versão 1.0

Prof. Dr. Paulo Freitas Gomes,
Unid. Acad. Esp. de Ciências Exatas e Tecnológicas,
Regional Jataí - UFG.

Jataí, Setembro de 2016.

Conteúdo

1 Arte da Ciência Experimental	4
1.1 Método Científico	4
1.2 Relatórios	5
1.2.1 Norma culta do Português	7
1.2.2 Exemplo de relatório	7
1.3 Dicas	8
2 Ferramentas	10
2.1 Escrita do Texto	10
2.2 Gráficos	10
2.2.1 Plataformas comerciais	11
2.2.2 Plataformas gratuitas	12
2.3 Aparelhos de medida	12
2.3.1 Cuidados e Regras de Segurança	12
2.3.2 Pontas de teste	13
2.3.3 Medida de Tensão Alternada	13
2.3.4 Medida de Tensão Contínua DC	14
2.4 Código de cores para resistores	14
2.5 Protoboard	15
3 Lei de Ohm	16
3.1 Introdução	16
3.1.1 Objetivo	16
3.2 Metodologia	17
3.2.1 Ajuste Linear	17
3.3 Conclusão	18
4 Linhas equipotenciais	19
4.1 Modelo Teórico	19
4.1.1 Linhas de Campo elétrico e equipotencial	19
4.1.2 Cálculo Numérico	21
4.2 Aparato experimental	21
4.3 Objetivo	22
4.3.1 Aprendizado	23
5 Ponte de Wheatstone	24
5.1 Modelo	24
5.2 Objetivo	25
5.2.1 Roteiro	25
5.2.2 Material Necessário	26

6 Carga e descarga de um capacitor	28
6.1 Modelo	28
6.1.1 Carga do capacitor	28
6.1.2 Descarga do capacitor	29
6.2 Objetivos	30
6.3 Procedimento Experimental	31
6.3.1 Carga do capacitor	32
6.3.2 Descarga do capacitor	33
7 Transformadores	35
7.1 Modelo	35
7.2 Objetivos	37
7.2.1 Material Necessário	37
7.3 Metodologia	37
8 Osciloscópio	39
8.1 Objetivo	40
8.2 Ponte de diodos: retificador de tensão	41
8.2.1 Sinal do celular	41
9 Capacitor em um osciloscópio	43
9.1 Carga e descarga de um capacitor	43
A Códigos	45
A.1 Ajuste Linear em Python	45
A.1.1 Ajuste Não Linear em Python	47
A.2 Circuitos elétricos	49
B Tutorial Igor	51
B.1 Gráfico	51
B.2 Ajuste não linear	52
C Linearização da eq. (6.10)	55

Capítulo 1

Arte da Ciência Experimental

1.1 Método Científico

As ciências naturais tem como objetivo observar e entender os fenômenos naturais. Uma das formas de se fazer esse estudo é utilizando o método científico, o qual tem inúmeras definições e interpretações. Veja por exemplo a figura 1.1. Aqui, utilizaremos uma definição simples e que irá nortear nossos estudos neste curso. Este método constitui de etapas que otimizam a forma de se entender um fenômeno da natureza, seja da química, física ou biologia. Esquematizamos o método científico como segue.

1. **Observação do fenômeno:** A primeira interação entre o cientista e a natureza se dá por meio da observação do fenômeno a ser estudado. Inicialmente essa observação é feita em situações cotidianas. Isso define o objeto de estudo.
2. **Modelo físico:** Para se entender um fenômeno é necessário descrevê-lo, utilizando um modelo matemático. A vantagem dessa linguagem é que ela é universal (a matemática aqui e na Rússia é a mesma). Além disso, o modelo matemático também fornece previsões do comportamento das grandezas em função de outras grandezas, sob condições controladas.
3. **Experimento:** Consiste na realização do fenômeno em condições controladas, de modo a isolar fatores que influenciam o fenômeno. O objetivo geral é eliminar alguns desses fatores, tornando o fenômeno mais simples o que possibilita entender as causas do fenômeno. As condições controladas podem ser por exemplo temperatura, material escolhido, etc... O experimento é pensado de forma a se testar algumas das previsões teóricas obtidas a partir do modelo físico.
4. **Teoria vs Experimento:** No experimento são obtidos os chamados dados experimentais, que são medidas de grandezas em função de outras grandezas. Estes dados são então comparados com as equações do modelo físico, de forma a se analisar se um concorda com o outro.
5. **Conclusão:** A comparação Teoria vs Experimento é essencial pois ela é quem vai mostrar se o modelo físico escolhido está de acordo com o experimento. Se sim, o modelo pode ser melhorado, de forma a englobar mais fatores reais. Se a comparação é ruim, ou o experimento está mal pensado ou o modelo físico é insatisfatório. Importante: um experimento nunca prova uma teoria, apenas valida a mesma. Apenas um experimento (realizado corretamente) em desacordo com a teoria é suficiente para invalidar a teoria.

Reflita sobre esse método científico, pesquise em outras fontes, veja diferentes definições. Esses conceitos irão nortear todo seu trabalho ao longo desse curso. E no final, esse é o

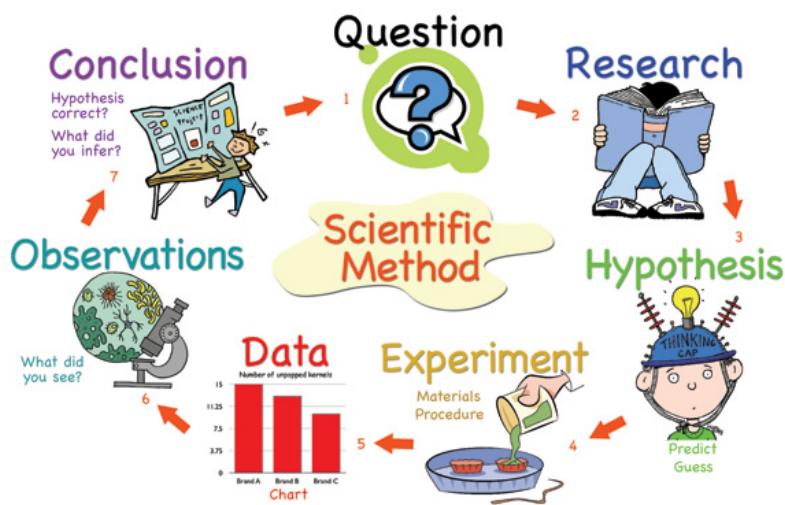


Figura 1.1: Ilustração do método científico.

objetivo primordial: aprender o método científico. Assim sendo, é essencial que você entenda esses conceitos.

1.2 Relatórios

Em cada experimento deverá ser feito um relatório, mostrando o estudo feito sobre o experimento. Novamente, esse estudo seguirá a filosofia do método científico descrita anteriormente. Os relatórios devem ser feitos seguindo um padrão para que o mesmo seja lido por outras pessoas e entendido. Seu relatório deve enviar uma mensagem: a de que você fez o experimento e chegou em uma conclusão. Essa é a função do relatório, transmitir o seu trabalho!

Para facilitar o trabalho de vocês, a seguir está um roteiro possível para se fazer o relatório, o qual deverá ser usado em todos os relatórios. Ele contém os pontos chaves que devem ser seguidos! Sinta-se a vontade para fazer de outra forma, porém saiba que você deve ter argumentos de o por que escolheu um dado formato.

- Título:** Dê um título interessante ao seu relatório. O título deve ser atraente, para fazer com que o leitor sinta vontade de ler a introdução depois de ler o título.
- Autores:** Todo trabalho científico deve ter seus autores identificados.
- Introdução:** Todo texto (relatório científico, redação dissertativa, revisão de um tema, etc...) tem de começar com uma introdução. Nessa seção o autor prepara o leitor para depois apresentar o trabalho em si. Além de preparar, a introdução também deve despertar a curiosidade do leitor, fazendo com que ele queira ler o restante do trabalho. Não pode ser muito grande, pois isso afasta o leitor. Usar figuras adequadas sempre é recomendável.
- Objetivo:** Uma vez motivado o leitor, deve-se apresentar o objetivo do trabalho, de forma que o leitor entenda qual o sentido de todo o texto. Todo relatório tem objetivo, sem exceção. O título e a introdução devem fazer o leitor achar seu objetivo interessante.
- Procedimento Experimental:** É uma disciplina experimental, assim haverá um relatório para cada experimento. Você deve descrever o experimento em si, materiais utilizados, montagem, aparelhos de medidas, etc... Em que nível de detalhes deve ser descrito? Em um nível no qual contextualize o objetivo e o modelo teórico, que é a próxima seção, sempre lembrando que vocês são alunos de ensino superior. Use figuras e desenhos sempre! Deve-se colocar o erro instrumental de todos os aparelhos utilizados.

6. **Modelo Teórico:** Todo experimento tem como objetivo ter seus resultados comparados com as previsões teóricas. Estas previsões vêm de um modelo teórico, que deve ser descrito nesta seção. Este modelo deve conter os seguintes elementos: princípio físico, hipóteses (grandezas consideradas e desprezadas) e previsão teórica (grandeza que será calculada e comparada com os resultados experimentais). Princípio físico e previsão teórica são equações!!! Tem que escrevê-las corretamente, seja vetor ou escalar. Use gráficos, sempre.
7. **Resultados experimentais:** Nesta seção o autor mostra os resultados medidos. Os dados devem ser organizados em tabelas, mostrando-os na forma cru, diretamente como foram medidos. Se forem muitos, usar o bom senso, pois mostrar muitas tabelas torna o relatório enfadonho para o leitor, mesmo por que ninguém vai conferir todas as tabelas. Gráficos devem ser utilizados sempre que possível. Um gráfico contém a mesma informação de uma tabela, porém o gráfico é entendido imediatamente pelo leitor.
8. **Análise dos dados:** Nesta seção o autor prepara os dados para serem comparados com a previsão teórica. Faz-se então os cálculos necessários, propagando os erros quando preciso. Gráficos são uma ótima forma de fazer essa comparação, ainda mais quando a previsão é uma equação. Se a previsão for um número, calcula-se esse número com o seu erro para fazer a comparação.
9. **Conclusão:** Seu experimento deu certo? O objetivo foi alcançado? Por que? O leitor quer saber essas coisas. O ideal é o experimento dar certo, a previsão ser observada nos dados. Mas se der errado, não tem problema. Se a previsão não bater com os dados, explique o por que. Provavelmente há algum erro que você não considerou, ou que fez errado. O importante nesta seção é explicar o seu resultado. Mesmo um experimento que não alcançou o objetivo pode ter uma nota boa, se bem explicado.

Obviamente isto é um guia, e pode ser alterado. Todas as figuras, tabelas e equações importantes devem ser numeradas. Assim, quando indicar algo, indique pelo número. Tudo que entrar no relatório, tem de ter uma função. Se algo não serve para nada, para que colocar no relatório? Os relatórios não têm limite mínimo de páginas, pois novamente, o que será cobrado é se a realização do experimento foi relatada com sucesso. Todos os relatórios devem ser feitos no computador, de maneira clara, organizada, limpa e objetiva.

A sequência acima é uma sugestão de como deve ser apresentado o relatório. Porém, durante o processo de escrita, a sequência em que se escreve é outra. Afinal, não tem sentido escrever a conclusão sem tratado os resultados experimentais. Uma sugestão de sequência de escrita das seções é:

1. Título.
2. Introdução.
3. Objetivo.
4. Modelo Teórico.
5. Aparato Experimental.
6. Resultados Experimentais
7. Análise dos Dados.
8. Conclusões.

1.2.1 Norma culta do Português

Relatórios Científicos são documentos que o professor irá avaliar e dar notas. Sendo documentos devem ser redigidos usando a norma culta da Língua Portuguesa. O que isso significa? Hoje em dia, em tempos de Whatsapp, Facebook, etc..., a norma culta está se perdendo. Mas será cobrada nos relatórios. Acentuação, concordância (de número, gênero e grau), tempos verbais, pontuação, etc... Tudo será avaliado. Erros de português serão marcados para que o aluno aprenda e não os repita nos relatórios seguintes.

1.2.2 Exemplo de relatório

Abaixo faço um exemplo de relatório, bem resumido, sobre o experimento Lei de Ohm.

- **Título** Lei de Ohm.
- **Introdução** Circuitos elétricos são largamente utilizados em nossa sociedade, pois são a base de todos os equipamentos elétricos que conhecemos. Na confecção de um equipamento, é importante saber qual a corrente elétrica irá passar no fio, pois se for muito alta, pode derreter o fio, e se for muito baixa pode não alimentar o aparelho. Neste relatório apresento um experimento relacionado com a famosa Lei de Ohm, que nos dá a relação entre a corrente, tensão e resistência elétrica em um fio.
- **Objetivo** Verificar a lei de Ohm.
- **Procedimento Experimental** Serão utilizados resistências comerciais de diversos valores, em geral da ordem de $1\text{ k}\Omega$. Em cada uma delas, aplica-se uma tensão de 0 a 2 V, em intervalo de 0,2 V e mede-se a corrente resultante. Aplicaremos então diversas tensões em cada fio. Para aplicar a tensão usaremos uma fonte DC de tensão, a qual também mede a corrente. Além disso, mediremos a corrente com um amperímetro em série no circuito. A corrente será mantida sempre abaixo de 200 mA. O erro na tensão é 0,1 V, na resistência é de 10Ω e na corrente é de 1 mA.
- **Modelo teórico** A lei de ohm relaciona a corrente I , a tensão elétrica V e a resistência R entre dois terminais da forma

$$V = RI \tag{1.1}$$

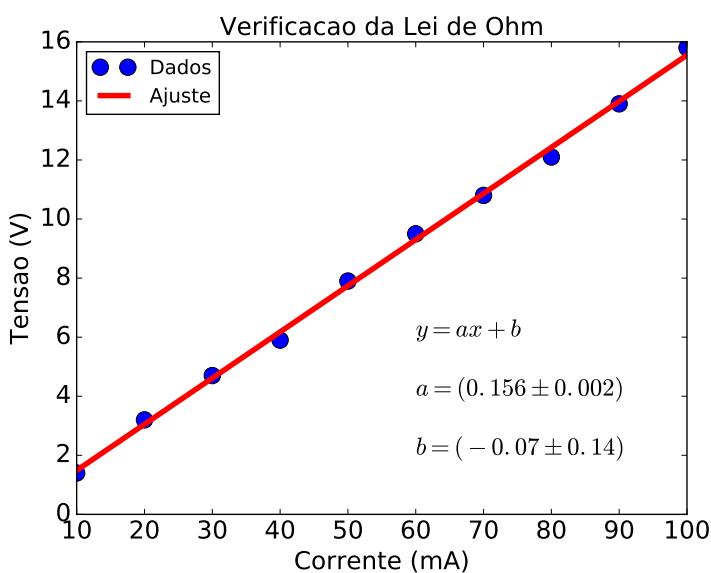
Assim, quanto maior a tensão, maior será a corrente. A resistência é exatamente a dificuldade de se estabelecer uma dada corrente. Em nosso experimento, R será fixo dada a resistência escolhida. Aplicamos V e medimos a corrente, que dará uma resistência:

$$R = \frac{V}{I} \tag{1.2}$$

- **Resultados experimentais e Análise dos dados** Foi utilizado uma resistência de $150\text{ k}\Omega$, este será o valor teórico que deverá ser comparado com o experimental. Os valores medidos estão na tabela 1.1. O gráfico com os dados experimentais e o ajuste linear está na figura 1.2*. Pelo coeficiente angular obtido, o valor da resistência é $R = (0.1558 \pm 0.0005)\text{k}\Omega$. como o ajuste foi feito com a corrente em mA, o valor da resistência obtido foi em $\text{k}\Omega$.
- **Conclusão** Os valores medidos satisfizeram a Lei de Ohm pois o valor obtido no ajuste está de acordo com o valor teórico.

*A forma como este gráfico foi gerado está na seção A.1 dos apêndices.

Corrente (mA)	Tensão (V)
10	1.4
20	3.2
30	4.7
40	5.9
50	7.9
60	9.5
70	10.8
80	12.1
90	13.9
100	15.8

Tabela 1.1: Valores experimentais obtidos para a tensão e corrente.**Figura 1.2:** Gráfico da tensão em função da corrente.

1.3 Dicas

- Façam gráficos com área de 10 cm x 10 cm mais ou menos. Nunca, mas nunca, imprimam o gráfico em separado e colem no relatório, ficando uma parte dobrada. A melhor maneira é fazer o gráfico em softwares adequados (Igor, Origin, SciDavis, etc...), salvar em formato de figura e inserir no texto.
- Evite indicar algo (tabela, figura, gráfico, equação, ...) por acima, abaixo, etc.... Todas as tabelas e figuras devem ser numeradas. Quando utilizar equações e for conveniente, numere-as também. Quando se referir a um gráfico, escreva de acordo com o gráfico da figura 3, por exemplo.
- Faça os relatórios em Latex ou Word. Podem vir tirar dúvidas sobre Latex se precisarem.
- Não se conclui que uma lei é verdadeira, e sim que ela se ajusta bem aos dados ou que ela é compatível com os dados. Não existe teoria em física que é verdadeira, e sim a teoria que explica melhor o observado na natureza, sendo validada pelo experimento.
- Não tente saber mais do que foi dado, não tente inventar, advinhar ou inferir coisas acerca dos dados eventualmente apresentados pela literatura. Todo o conhecimento que

você colocar no relatório ou foi obtido de alguma fonte ou foi obtido por você a partir dos dados experimentais. Você deve ser capaz de explicar todas as suas conclusões!

- Sempre, quando usada, coloque referência, que são livros, artigos, apostilas ou até páginas da internet que você usou. Coisas de conhecimento público não precisam ser referenciadas.
- As perguntas que coloco no relatório são para vocês pensarem e discutirem. Algumas apenas de cunho filosófico, outras para vocês procurarem e encontrarem o certo.
- Sejam precisos no texto, escrevam o conteúdo físico necessário. Evite devaneios.
- Quem vai ler o relatório? O leitor tem mais ou menos experiência que vocês? Evite fazer afirmações sobre coisas que vocês não conhecem e que o leitor pode conhecer mais.
- Qual o objetivo do relatório? Não pode esquecer disso durante o relatório e começar a explicar outras coisas desnecessárias.
- Se falar que um resultado é bom, se um gráfico é melhor que outro, tem que falar por que, seja comparando com valores da literatura (que deverá constar na referência), seja dizendo que de um tipo de gráfico se obtém a forma da equação. Qualquer conclusão do trabalho experimental tem que ser justificada.
- Nunca fale no relatório que você não sabe alguma coisa, pois se escrever isso o leitor ficará com a impressão de que você não tem vontade de pesquisar e aprender coisas. Se não sabe algo, vá na biblioteca, converse com os amigos, com o professor. E se você falar que vai fazer algo (um gráfico, uma tabela, etc...), faça!! Não desaponte o leitor com falsas expectativas.
- Todo relatório deve ser dividido em seções, como descrito anteriormente. O objetivo de dividir em seções é facilitar para o leitor. O nome de cada seção deve ser destacado no texto, saltando linhas entre o nome e o texto. Tudo deve estar de uma maneira organizada e agradável de se ler.
- Quando terminar o relatório, leia você mesmo. O que achou? Teve dificuldade de visualizar as coisas? Estava bem organizado? Enquanto lia, achou enfadonho ou se sentia intrigado querendo ler mais?

Capítulo 2

Ferramentas

Neste curso utilizaremos diversas ferramentas para o estudo dos fenômenos e sua posterior apresentação.

2.1 Escrita do Texto

Os relatórios devem ser feitos no computador de forma a evitar problemas como letra ilegível e imperfeições em geral. O applicativo Word da Microsoft é amplamente utilizado para escrita de textos. Porém, vale a pena mencionar aqui que existe outra plataforma mais adequada para escrita de textos científicos chamada de L^AT_EX. Trata-se de uma plataforma computacional (como uma linguagem de programação) com o objetivo de gerar textos. Pesquise no Google (usando tex ou latex) e encontrar milhares de referências e manuais. Comparando com o Word, a vantagens do L^AT_EX são inúmeras, por exemplo:

- O texto é mais preciso no sentido de que o resultado é exatamente o desejado,
- As equações ficam apresentáveis e sem erros tipográficos. Acredite, em física usamos muitas equações.
- A numeração de referências, seções, equações e figuras é automática. Assim se você tem uma lista de 20 equações e altera a ordem de uma, a numeração é atualizada automaticamente.
- O uso de hiperlinks é muito simples, permitindo por exemplo ir para figuras ou equações em outras páginas.
- A formatação geral do texto é bem definida, evitando formatações diferentes no mesmo texto.
- Em suma, o texto fica muito mais apresentável.

A desvantagem é que tudo deve ser escrito em código e isso afasta a maioria das pessoas. Esta apostila é escrita em L^AT_EX. Quem tiver interesse em aprender pode me procurar para tirar dúvidas. É muito interessante que gaudandos em física que tem interesse em seguir carreira acadêmica (fazer mestrado e doutorado) aprendam a usar L^AT_EX.

2.2 Gráficos

Ao longo desse curso vocês deverão fazer uma série de gráficos, os quais apresentam de maneira visual a informação de uma equação. Em outros momentos vocês também farão ajustes

(linear e não linear) dos dados experimentais, com o objetivo de avaliar se esses dados seguem a relação prevista no Modelo Teórico. A forma de apresentar um ajuste é fazendo um gráfico. Assim, é parte desse curso o aprendizado de como fazer bons gráficos.

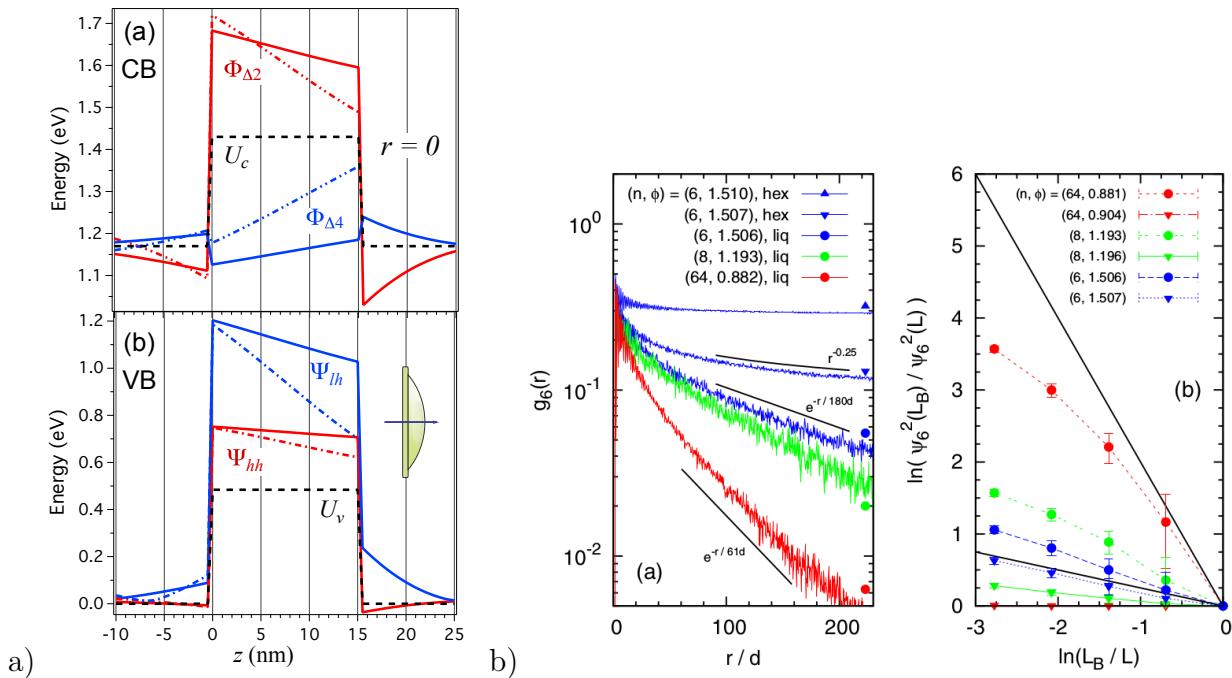


Figura 2.1: (a) Gráfico dos perfis das bandas de condução e de valência em pontos quânticos. Figura retirada da Ref. [6]. (b) Gráficos com múltiplas curvas utilizando ajustes para mostrar os comportamentos. Figura retirada da Ref. [8].

Fazer gráfico é uma arte. Um gráfico tem que ser bonito, elegante, conciso e mostrar o conteúdo de maneira simples e direta. Um gráfico leva uma mensagem. Se o leitor não capturar essa mensagem, o gráfico é inútil. Assim, não tenha pressa para fazer os gráficos nos relatórios. Leve o tempo que for necessário, refaça, repense, use cores, etc... Por exemplo, nas figuras 2.1(a) e 2.1(b) estão exemplos de gráficos complexos, bonitos, bem feitos, e transmitindo uma mensagem (talvez você precise ler alguns artigos antes para entendê-los).

Antigamente se fazia gráficos a mão. Atualmente há inúmeros pacotes computacionais específicos para a confecção de gráficos. Os melhores, com mais recursos e uma interface gráfica, são pagos. Existem várias opções gratuitas porém a maioria delas é ruim. As opções gratuitas e boas não tem interface gráfica, o que afasta muitos usuários. De maneira geral, hoje o uso de ferramentas computacionais é quase que obrigatório, não apenas para fazer gráficos como para fazer cálculos diversos e manipulações numéricas.

2.2.1 Plataformas comerciais

- **Origin** - www.microcal.com (Windows): é o software mais utilizado no mundo pela comunidade acadêmica (de física pelo menos) para confecção de gráficos. É o Word dos gráficos. É um software pago, com interface gráfica e com inúmeros recursos.
- **Igor** - www.wavemetrics.com (Windows e Macintosh): é um software também comercial e interface gráfica porém segue uma filosofia diferente. É um concorrente direto do Origin, porém perde de longe em popularidade.
- **Excel**: mundialmente famoso por planilhas mas também tem recursos poderosos para fazer gráficos e cálculos diversos, inclusive os mais complexos.

- **Matlab** - www.mathworks.com (Windows, Macintosh e Linux): trata-se de uma linguagem de programação desenvolvida para modelagem matemática. Por ser uma plataforma comercial, há inúmeros recursos que a tornam extremamente versátil, simples, intuitiva e poderosa para a solução de problemas matemáticos e confecção de gráficos 2D, curvas de nível, superfície e 3D. A única desvantagem do Matlab é ser pago e também o tamanho do arquivo de instalação.

Existem outros títulos comerciais (Qtiplot para Windows, Kaleidagraph, MathCad, Maple, Mathematica, etc...) que seguem filosofias diversas.

2.2.2 Plataformas gratuitas

- **Python**: é uma linguagem de programação poderosa, versátil e muito popular, desenvolvida para ser simples. Serve tanto para modelagem matemática quanto para programação em geral. Python conta com inúmeros recursos para confecção de gráficos, tornando-a uma ótima opção gratuita para fazer gráficos. A desvantagem (para alguns) é que não tem interface gráfica.
- **Gnuplot**: é uma linguagem de programação específica para confecção de gráficos. Não é popular mas é tem uma comunidade fiel.
- **SciDavis**: é uma cópia do Origin porém gratuita. Por ser gratuita não há um suporte e assim tem muitos problemas.

Essas versões gratuitas podem serem usadas em Windows, Macintosh e Linux. Há várias outras opções gratuitas (Octave, Qtiplot para Linux, etc...) porém menos utilizadas. Para encontrar documentação sobre qualquer uma dessas opções, basta procurar no Google. Como ajuda, o gráfico da figura 1.2 foi gerado em Python. O código está no apêndice A.1.

A escolha de uma opção é algo pessoal: cada pessoa um gosta mais de um de acordo com suas preferências. Nesse curso o aluno pode usar qualquer opção. O importante é que ele faça bons gráficos que mostrem seus resultados.

2.3 Aparelhos de medida

Nos estudo de circuitos elétricos, diversos aparelhos de medidas são utilizados para se medir as grandezas de corrente, tensão e resistência elétrica. Hoje em dia, dispomos de aparelhos compactos e eficientes que fazem medidas dessas 3 grandezas. O mais utilizado é o multímetro e iremos utilizá-lo bastante ao longo deste curso. Na figura 2.2 está uma fotografia e as indicações das suas funções. Em termos de tensão e corrente elétrica, há dois modos possíveis: AC de alternado e DC de direto. AC é quando a função é oscilatória e DC quando é contínua.

2.3.1 Cuidados e Regras de Segurança

- Quando medir tensão ou corrente, use em primeiro lugar a maior escala possível.
- Quando estiver usando o aparelho esqueça as demais funções e concentre-se somente na que você está utilizando
- Terminando de utilizar o aparelho nunca esqueça de desligá-lo, ou seja, girar o seletor até a posição OFF.
- Nunca utilize um aparelho sem saber fazê-lo adequadamente.

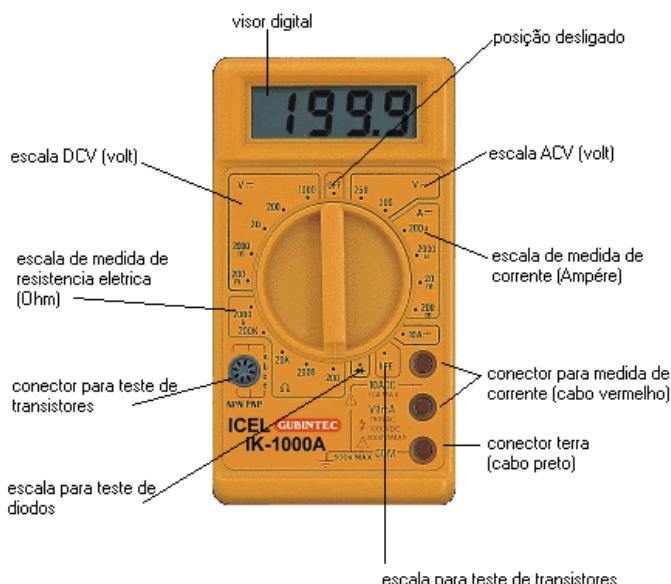


Figura 2.2: Fotografia de um multímetro digital.

2.3.2 Pontas de teste

Ao comprarmos um Multímetro, o mesmo acompanha dois fios, um vermelho e um preto, também conhecidos como pontas de teste. Siga os passos relacionados para que possamos posicioná-las de modo correto.

1. Pegue o fio de cor preta e veja que em suas extremidades temos um ponta com um plugue e outra ponta pontiaguda, a ponta de cor preta com um plugue deve ser conectada no orifício do Multímetro onde se encontra a seguinte descrição: COM 500v Max que se refere ao TERRA.
2. Pegue o fio de cor vermelha e veja que o mesmo também tem um plugue em uma das suas extremidades. Esta ponta deve ser conectada ao orifício do multímetro que tem a seguinte descrição: V/mA.

Obs.: Com as pontas do Multímetro conectadas de acordo com os passos acima, podemos extrair medidas de tensão Alternada ACV, tensão Continua DCV, Resistência e baixa corrente mA (miliampéres). Caso você queira extrair medidas de corrente elétrica de até 10 A basta retirar a ponta de teste vermelha do orifício com a seguinte descrição 10ADC, podendo assim medir corrente de até 10 A. Porém, não iremos fazer medidas de corrente elétrica com o multímetro nesse curso.

2.3.3 Medida de Tensão Alternada

1. Posicione o seletor do Multímetro na escala ACV (Tensão de Corrente Alternada) 750V.
2. Após ter posicionado o seletor na posição e na escala correta, faça um última checagem para ver se tudo está correto, ai então coloque as duas pontas de teste nos orifícios da tomada a ser medida, sendo uma ponta no Fase e a outra no Neutro, olhe no visor e veja o valor obtido.
3. O valor obtido pode ser 110 ou 220V podendo variar de acordo com a estabilidade da rede elétrica, mas sem riscos de danificar seu Multímetro, pois você já havia posicionado seu seletor na escala que permite extrair medidas de até 750 ACV.

2.3.4 Medida de Tensão Contínua DC

1. Posicione o seletor do Multímetro na escala de tensão DCV (Tensão de Corrente Contínua). Da mesma forma que fizemos para medir a tensão alternada, aconselhamos que você posicione o seletor do Multímetro na maior escala possível em DCV, no caso, 1000V, mas como sabemos que a tensão continua a ser medida é relativamente baixa, podemos até posicionar o Multímetro na escala de 200V, para que possamos obter uma medida de tensão mais precisa.
2. Retire a tampa do gabinete soltando os parafusos localizados na sua parte traseira, localize a fonte de alimentação no interior do gabinete. Veja que alguns fios saem da fonte e se direcionam aos periféricos (HD, CD, Floppy)
3. Desconecte um dos conectores, como sugestão retire o que está ligado ao HD. Veja que o mesmo tem 4 fios, sendo os dois da extremidade Vermelho e Amarelo e os dois do meio, Pretos.
4. Pegue a ponta do Multímetro de cor preta e encaixe no orifício do conector correspondente a um dos fios pretos.
5. Pegue a ponta do Multímetro de cor vermelha e encaixe no orifício de uma das extremidades do conector correspondente a um dos dios Vermelho ou Amarelo.
6. Ligue o computador e verifique no visor do Multímetro o valor, se você optou por encaixar a ponta vermelha do medidor no Amarelo do conector, deverá ser mostrado no visor um valor aproximado de 12V, que indicaria a tensão de 12V, caso você tenha optado por encaixar a ponta de teste vermelha no fio vermelho do conector, o valor a ser mostrado no medidor deverá ser de aproximadamente 5V.

2.4 Código de cores para resistores

De forma a facilitar o uso de resistores, há um código de cores desenhado neles para facilitar a identificação de sua resistência, veja figura 2.3(a). Cada faixa tem um significado, começando do primeiro algarismo significativo até a última faixa que significa a tolerância, veja figura 2.3(b). Há também várias calculadoras on line para o código: <http://www.csgnetwork.com/resistcolcalc.html>.

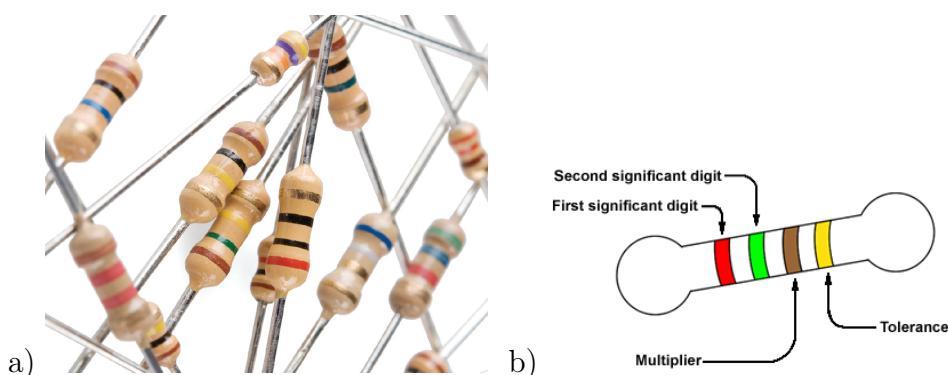


Figura 2.3: (a) Figura retirada do site <https://learn.sparkfun.com/tutorials/resistors>. (b) Faixas de cores desenhadas no resistor indicado seu valor. Figura retirada de <http://www.engineering.com/Library/ArticlesPage/tabid/85/ArticleID/120/Color-Code-for-Resistors.aspx>.

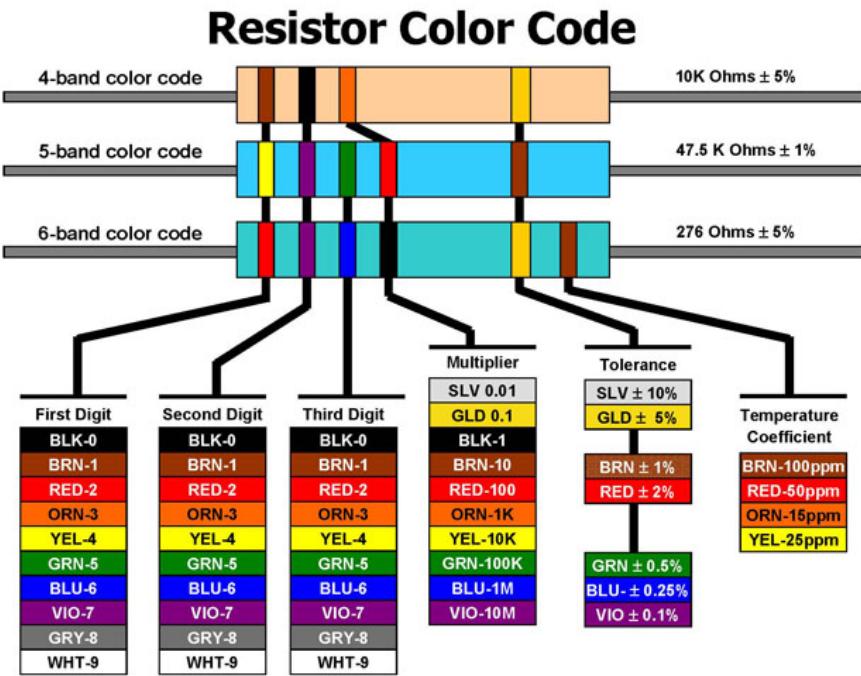


Figura 2.4: Tabela de cores para resistores. Figura retirada do site http://itll.colorado.edu/electronics_center/resistor_chart/.

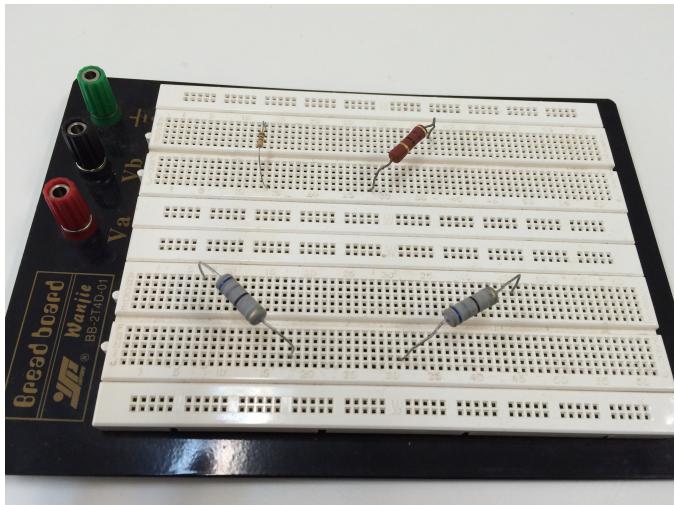


Figura 2.5: Fotografia de um protoboard em nosso laboratório com 4 resistores conectados.

2.5 Protoboard

Outro equipamento que iremos utilizar é o chamado protoboard (<http://en.wikipedia.org/wiki/Breadboard>). Na figura 2.5 está a fotografia de um protoboard em nosso laboratório com 4 resistores conectados.

Capítulo 3

Lei de Ohm

3.1 Introdução

No estudo de circuitos elétricos de corrente contínua, a expressão algébrica

$$V = RI \quad (3.1)$$

é uma fórmula conhecida desde o segundo grau quando foi, provavelmente, apresentada como Lei de Ohm [2, 3, 4, 5]. Pretendemos, aqui, retomar o assunto tratando-o sob o ponto de vista experimental. Na figura 3.1 está ilustrado um trecho de um circuito com uma resistência submetida a uma tensão V com uma corrente I entre pontos A e B. Antes porém, é importante diferenciarmos pelo menos dois conceitos: o de Lei de Ohm e o de resistência elétrica R .

O pesquisador G. S. Ohm descobriu que metais e muitos outros condutores elétricos apresentam uma relação de proporcionalidade direta entre corrente e tensão elétrica, a constante de proporcionalidade assim definida é chamada de resistência elétrica. É claro que, neste caso, a resistência é constante e independente da tensão ou corrente (pelo menos até certos limites). A Lei de Ohm é a equação 3.1 com $R = \text{constante}$. Condutores ou partes de circuitos (por exemplo contatos elétricos) que obedecem a Lei de Ohm são, em muitos casos, chamados de ôhmicos. Neste caso, o gráfico da corrente em função da tensão é uma reta, como está ilustrado na figura 3.2(a). Quando a resistência em questão é não ôhmica, ela não será mais constante e irá depender da tensão e corrente aplicadas (veja por exemplo o gráfico da figura 3.2(b)). Encontraremos diversos exemplos deste tipo ao longo desta disciplina de laboratório. Assim, uma resistência elétrica R (ôhmica ou não) pode ser obtida a partir dos valores de U e de I nos bornes ou terminais do componente pelo cálculo do quociente V/I .

3.1.1 Objetivo

O objetivo geral é: verificar a Lei de Ohm através de medidas da tensão e da corrente para vários resistores. Todo o trabalho deverá ser formatado na forma de um relatório, como descrito

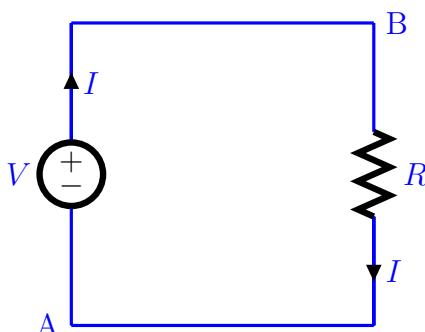
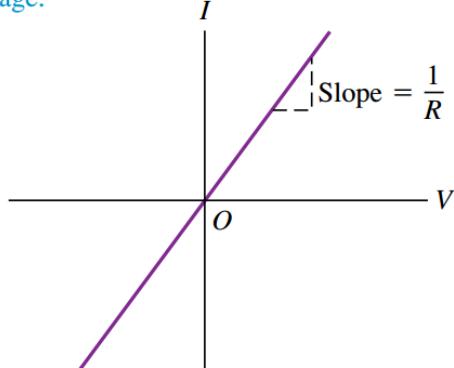


Figura 3.1: Circuito contendo uma fonte V e um resistor R entre os terminais A e B. Figura feita em L^AT_EX e o código está na seção A.2.

(a)

Ohmic resistor (e.g., typical metal wire): At a given temperature, current is proportional to voltage.



(b)

Semiconductor diode: a nonohmic resistor

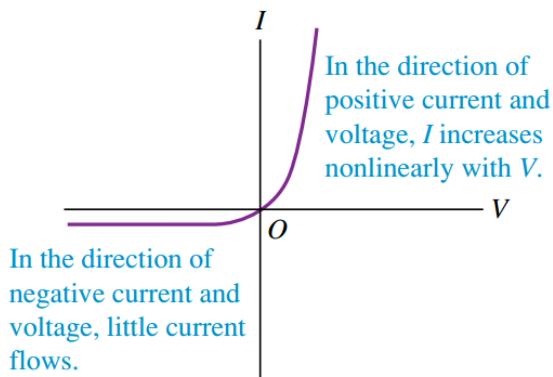


Figura 3.2: Corrente em função da tensão. a) Dispositivo ôhmico. b) Dispositivo não ôhmico. Figura retirada da Ref. [1].

na seção 1.2.

3.2 Metodologia

- Montar o circuito ilustrado na figura 3.1 (pode tirar foto para registrar a montagem).
- Escolher duas ou 3 resistências com valores de, por exemplo, 100, 500 e 1000 Ω . Para cada resistor, meça seu valor com o multímetro também. O valor nominal é o valor teórico. O resultado da medida com o multímetro é o primeiro valor experimental.
- Realizar medidas da corrente no resistor variando a tensão aplicada. Obtenha no mínimo 10 pontos. Não deixe a corrente passar de 100 mA.
- Faça um gráfico com os valores de tensão por corrente. Faça um gráfico para cada resistor.
- Faça o ajuste linear para cada resistor (semelhante ao gráfico da figura 1.2). Obtenha o coeficiente linear e o angular. Calcule o valor da resistência elétrica através do ajuste. Este será o segundo valor experimental.
- Compare o valor teórico da resistência com os dois valores experimentais.

3.2.1 Ajuste Linear

A equação de uma reta é:

$$y = a + bx \quad (3.2)$$

onde y e x são as variáveis dependente e independente. Em nosso experimento, tensão será a variável dependente e a corrente a dependente, logo:

$$y = V \quad \therefore \quad x = I \quad (3.3)$$

Comparando as eqs 3.1, 3.2 e 3.3 temos que

$$a = 0 \quad \therefore \quad b = R \quad (3.4)$$

Você irá obter a e b a partir do ajuste linear e deverá comparar com seus valores teóricos: 0 e R , de acordo com a eq. 3.4. Esse modelo teórico deverá constar no seu relatório. Neste, o coeficiente angular será o valor da resistência, que caso seja constante (dispositivo ôhmico) implicará em uma reta no gráfico. Faça esse gráfico para dois ou 3 resistores diferentes.

O gráfico e o ajuste linear devem ser feitos no computador. Recomendações: Igor ou Python (veja os apêndices).

3.3 Conclusão

Todo seu trabalho deve estar na forma de um relatório bem escrito, agradável de ler, conciso, preciso e com os objetivos cumpridos. Seus valores teóricos foram próximos dos experimentais? Calcule os erros em ambos os casos, pois são os erros que lhe dirão se sim ou se não. Por exemplo, suponha que você obteve $b = (96 \pm 10)\Omega$ a partir do ajuste e $R = (103 \pm 10)\Omega$ a partir da medida com o multímetro. Neste caso, a comparação é satisfatória, pois os valores não batem mas considerando a margem de erro há superposição nos intervalos. Além de concluir se a comparação foi boa ou não, você deve dar motivos e argumentos de o por que isso aconteceu, seja bom ou ruim!

Capítulo 4

Linhas equipotenciais

Um conceito importante em eletrostática é o potencial elétrico, o qual estudaremos nesse experimento. Dado uma distribuição de carga elétrica, um campo elétrico e um potencial elétrico são formados. Com um multímetro, pode-se medir o potencial em uma região, mapear os valores e assim determinar a geometria das linhas equipotenciais. A partir das definições entre campo e potencial, pode-se então determinar o campo elétrico a partir das equipotenciais.

Conceitos físicos: Potencial elétrico V , campo elétrico \vec{E} , linhas equipotenciais, linhas de campo elétrico, condutores e isolantes.

4.1 Modelo Teórico

O conceito de energia é de suma importância, porém ele tem uma desvantagem: a energia nunca pode ser medida diretamente. Assim, o valor absoluto de energia não tem sentido, pois não há uma medida para fazer a calibração. Porém, para as forças conservativas podemos definir uma outra grandeza que pode ser medida que se chama potencial. O campo elétrico \vec{E} é conservativo, logo definimos a variação de potencial elétrico ΔV , como sendo [1]:

$$V(b) - V(a) = - \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (4.1)$$

A utilidade dessa grandeza é que para qualquer carga q colocada nessa região, podemos calcular a energia adquirida por ela como sendo $U = Vq$. Como a energia não tem um valor absoluto preciso, V também não, por isso em geral é importante apenas a diferença de potencial $\Delta V = V(b) - V(a)$. A unidade é Joule/Coulomb, que é chamada de Volt, abreviada por um V. Em geral, o referencial é escolhido como sendo o infinito $a = \infty$, logo $V(a) = 0$ e temos então:

$$V(r) = - \int_{\infty}^r \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (4.2)$$

r é a posição onde está sendo calculada o potencial V . Para uma carga pontual, temos:

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (4.3)$$

4.1.1 Linhas de Campo elétrico e equipotencial

Uma distribuição de carga cria um campo elétrico $\vec{E}(\vec{r})$ em todo o espaço próximo a ele. Uma maneira de representá-lo é através de suas linhas de campo. Define-se essas linhas da seguinte maneira: em cada ponto do espaço, a linha de campo elétrico é tangente ao vetor $\vec{E}(\vec{r})$

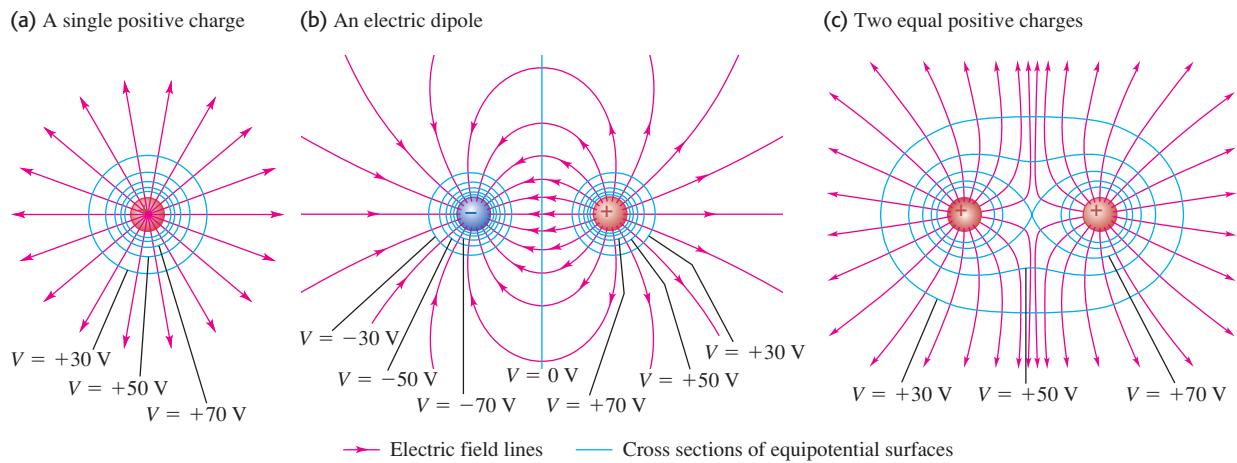


Figura 4.1: Linhas equipotencial de diferentes distribuições de carga. a) Carga pontual. b) Duas cargas de sinais contrários. c) Duas cargas de mesmo sinal. Figura retirada da Ref. [1].

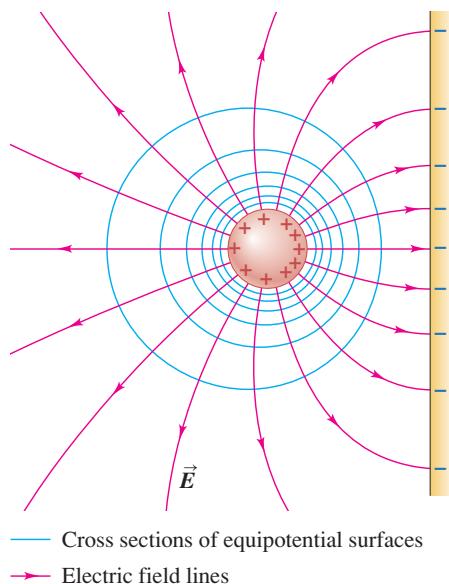


Figura 4.2: Linhas equipotencial e de campo elétrico entre uma carga pontual e uma placa. Figura retirada da Ref. [1].

e a sua distância em relação a próxima linha de campo é inversamente proporcional ao módulo do campo. Ou seja, quanto mais próximas forem as linhas, maior é o módulo do campo. Na figura 4.1, as linhas de campo são as curvas em rosa. Repare que para cargas pontuais as linhas são radiais, saindo da carga positiva e entrando na carga negativa. Isso é condizente com o fato de o campo ser sempre perpendicular às superfícies de um condutor. Repare por exemplo que na figura 4.2 as linhas de campo saem da carga positiva e entram perpendicularmente na placa.

Da mesma forma podemos representar o potencial $V(\vec{r})$ com linhas. Porém, sua utilidade é saber quando o potencial varia ou não, pois o campo é diferente de zero se o potencial varia. Assim, define-se as linhas equipotenciais, que são linhas nas quais o potencial é constante. Da eq. ??, o potencial varia na direção do campo. Logo, o potencial não varia na direção perpendicular ao campo. Assim, as linhas equipotenciais são sempre perpendiculares às linhas de campo elétrico. Na figura 4.1 as linhas equipotenciais são desenhadas em azul. Elas são circulares para cargas pontuais.

4.1.2 Cálculo Numérico

O potencial pode ser calculado numericamente utilizando ferramentas computacionais. Para isso, utilizaremos a Lei de Gauss na forma diferencial:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (4.4)$$

Substituindo a eq. ?? na lei de Gauss (eq. 4.4) obtemos:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (4.5)$$

Esta é a chamada Eq. de Poisson, que dá o potencial $V(x, y, z)$ em função de uma distribuição de carga $\rho(x, y, z)$ qualquer. Esta é uma equação diferencial linear parcial de ordem 2 e que pode ser resolvida numericamente por diversos métodos, como diferenças finitas [12]. Matlab e R são plataformas computacionais adequadas para implementação de tais métodos. Realizamos a implementação deste método e na figura 4.3(a) está o potencial elétrico $V(x, y)$ calculado em uma região quadrada de lado $L = 100$ metros na qual se colocou um capacitor de placas paralelas com tensões 100 e -100 Volts em cada placa. A condição de contorno é $V = 0$ nas bordas do quadrado. Já na figura 4.3(b) está o potencial no mesmo quadrado mas com quatro cargas pontuais (2 dipolos) no centro. A condição de contorno agora é diferente sendo $V = 100$ Volts nos lados horizontais e $V = -100$ Volts nos lados verticais. Com o potencial é possível encontrar o campo elétrico $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$ também por derivação numérica. Na figura 4.3(c) está graficado o vetor campo elétrico em cada ponto do grid utilizado.

4.2 Aparato experimental

Material necessário: Bandeja, várias folhas de gráfico, condutores, fonte de tensão, cabos e multímetro. Há 3 tipos de condutores (veja figura 4.4(a)): barra, disco e casaca cilíndrica.

1. Preencher com água a bandeja: profundidade suficiente para cobrir os condutores.
2. Colocar a bandeja com água sobre um das folhas de gráfico.
3. Posicionar os dois condutores nas posições desejadas: um em cada lado.
4. Colocar 6 volts de diferença de potencial entre os condutores, utilizando a fonte de tensão.

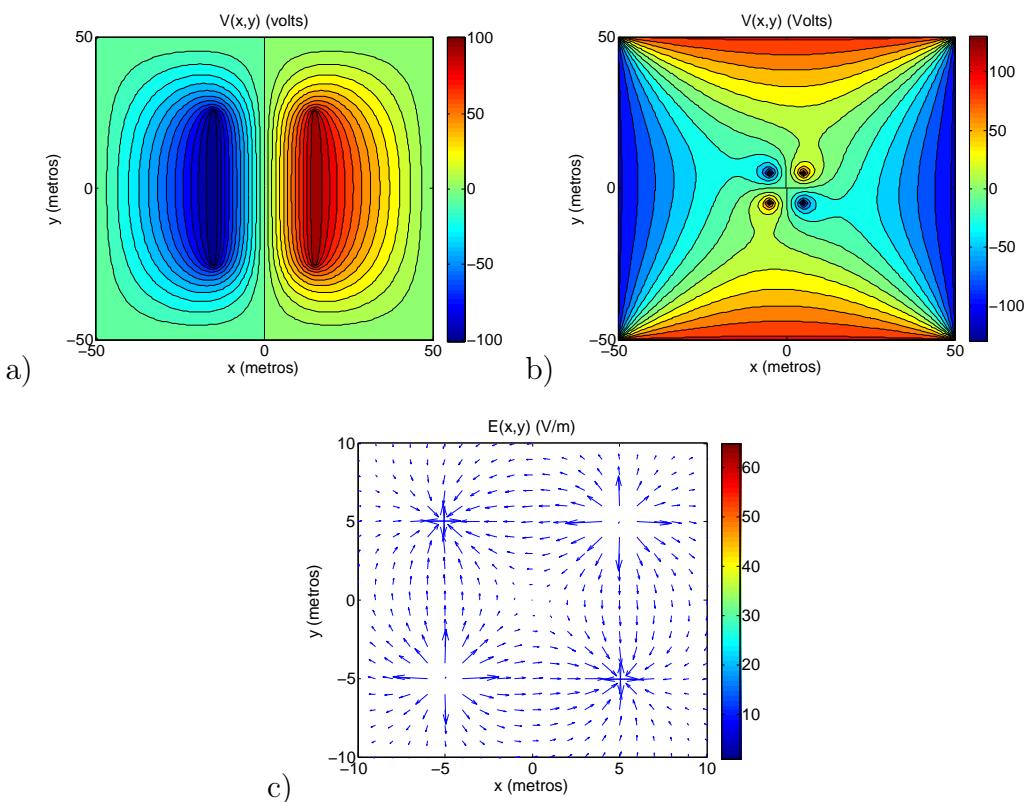


Figura 4.3: Resultados preliminares para o cálculo do potencial $V(x,y)$ em sistemas simples usando o MDF. (a) Seção transversal de um capacitor de placas paralelas. (b) Quatro cargas pontuais. (c) Campo elétrico \vec{E} criado pelas quatro cargas pontuais.

5. Medir a diferença de potencial entre vários pontos. Se não houver potencial, pode ser devido a baixa condutividade da água. Nesse caso, adicionar sal.
6. Determinar as coordenadas (x, y) de cada ponto medido utilizando a folha abaixo da bandeja e anotar em outra folha.
7. Fazer o mapa: ligar os pontos que tem o mesmo potencial.

No último item descrito acima, uma das ponteiras deve ficar em um dos condutores e a outra é usada para medir nas diferentes posições acima da folha de gráfico. Na figura 4.4(b) está uma fotografia de um circuito montado em nosso laboratório com a barra e o disco condutor. As linhas equipotenciais dessa configuração devem ser semelhantes ao da figura 4.2.

4.3 Objetivo

Durante o experimento, diversos mapas devem ser feitos:

1. Mapas 1, 2 e 3: mapa das linhas equipotenciais para 3 configurações diferentes: um condutor circular (como na figura 4.1a), dois condutores circulares (como na figura 4.1b) e um condutor circular com uma placa (como na figura 4.2).
2. Mapa 4: potencial dentro do condutor circular.

Objetivos do relatório:

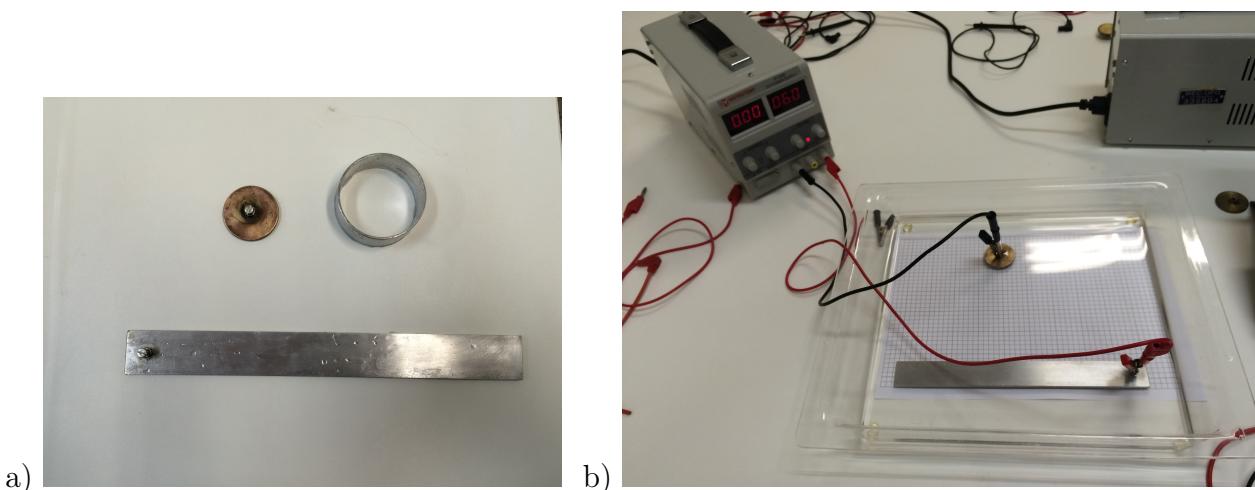


Figura 4.4: (a) Condutores para o experimento: barra, disco e casca cilíndrica. (b) Circuito montado com tensão aplicada nos condutores em forma de barra e de disco.

1. Apresentar um modelo teórico contendo as definições envolvendo potencial elétrico e a dedução da eq. 4.2.
2. Apresentar todos os mapas feitos. Pode scanear e colocar como figura, ou tirar xerox e colocar as folhas como apêndice.
3. A partir das linhas equipotenciais, fazer o mapa das linhas de campo elétrico para as 3 configurações mencionadas acima. Tirar xerox e desenhar as linhas de campo nas cópias. Os originais devem ser guardados intactos.
4. Comparar os mapas 1, 2 e 3 as figuras mencionadas acima. Discutir as diferenças.
5. Determinar o campo elétrico dentro de um condutor usando o mapa 4. Discutir o conceito de gaiola de Faraday.

4.3.1 Aprendizado

Perguntas que o aluno deve ser capaz de responder após a realização do experimento e do relatório:

1. Qual a definição de potencial elétrico em função da energia potencial elétrica? E em função do campo elétrico?
2. O que são linhas de campo elétrico? E linhas equipotenciais?
3. Qual a relação entre as linhas equipotenciais e as linhas de campo elétrico?
4. As linhas de equipotenciais são perpendiculares ou tangentes à superfície dos condutores?
5. As linhas de campo elétrico são perpendiculares ou tangentes à superfície dos condutores?
6. Qual o campo elétrico dentro de um condutor? O que é gaiola de Faraday?

Capítulo 5

Ponte de Wheatstone

5.1 Modelo

A ponte de Wheatstone é um circuito elétrico que permite a medição do valor de uma resistência elétrica desconhecida. Foi desenvolvido por Samuel Hunter Christie em 1833 (veja figura 5.1(a)), porém foi Charles Wheatstone (figura 5.1(b)) quem ficou famoso com a montagem, tendo-o descrito dez anos mais tarde.

A ponte de Wheatstone é um circuito usado como medidor por comparação, neste caso mediremos resistências. No seu ajuste, a ponte usa o conceito de detecção de zero que é um critério menos sensível à problemas de calibração ou de precisão de padrões de referência. Na figura 5.2 está uma ilustração do circuito. Quando a diferença de potencial V_{cd} medida pelo voltímetro é zero, dizemos que o circuito está em equilíbrio. Utilizando a Lei de Ohm, pode-se mostrar que se o sistema está em equilíbrio, temos que:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (5.1)$$

Se uma das resistências for desconhecida, o valor das outras, quando a ponte estiver em equilíbrio, permitirá a determinação da incógnita. Para permitir a procura do equilíbrio da ponte utiliza-se uma resistência ajustável. A associação do conceito de comparação de sinais e do detetor de zero é aplicada em inúmeros instrumentos e sensores.



a)



b)

Figura 5.1: (a) *Samuel Hunter Christie*. (b) *Charles Wheatstone*.

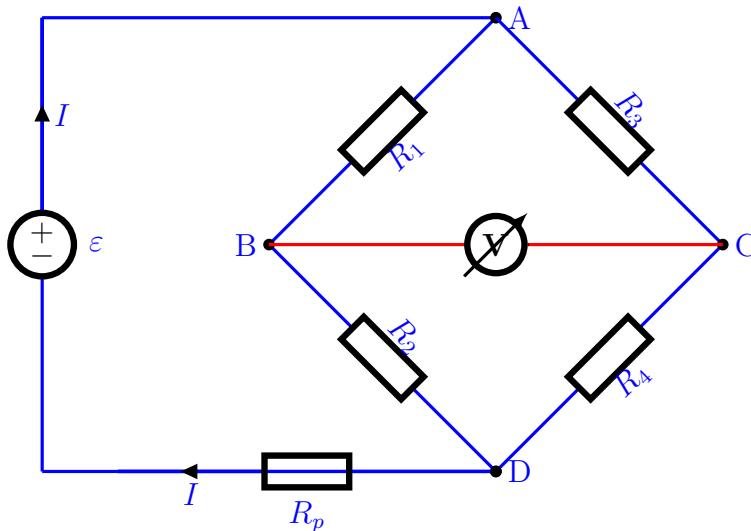


Figura 5.2: Diagrama do circuito contendo a ponte de Wheatstone. Figura feita em L^AT_EX e o código está na seção A.2.

Para melhor utilização do circuito, pode-se usar uma resistência de proteção R_p , que deverá ficar em série com a bateria, ou com o próprio voltímetro, R_{sh} . Esta resistência tem a função de diminuir a corrente que passa pelo voltímetro, e é essencial quando troca-se o voltímetro por um amperímetro.

Preste também atenção ao fato que os primeiros momentos da procura do equilíbrio são os mais perigosos para o instrumento, já que há possibilidade deste se encontrar longe do zero procurado. Assim, sempre que for fechar a chave do circuito, coloque o potenciômetro da fonte no mínimo, aumentando aos poucos.

5.2 Objetivo

1. Estude o circuito proposto, equacione a situação de equilíbrio e veja como o valor da resistência desconhecida poderá ser encontrado. Identifique claramente no esquema e nas equações as resistências fixas e a variável.
2. Faça a dedução da eq. 5.1 no relatório.
3. Planeje o experimento, a montagem, o registro dos dados e o tratamento destes. Discuta as possíveis fontes de erro.
4. Determine o valor de uma resistência desconhecida R_d , escolhendo adequadamente as outras três resistências fixas e de mesmo valor.

5.2.1 Roteiro

1. Escolha 3 resistências de mesmo valor R_0 e monte o circuito com elas. A quarta resistência será o resistor variável R_v . É imprescindível que a resistência variável possa assumir um intervalor de resistência centrado em R_0 .
2. Meça o valor da tensão $V_{cd} = U$ em função da resistência variável R_v , no intervalo centrado em R_0 .
3. Meça o valor da menor tensão obtida no voltímetro U_0 , no equilíbrio do sistema, juntamente com o valor da resistência variável R_v . Este valor deve ser próximo de R_0 .
4. Faça uma tabela contendo dados de U e de R_v contendo no mínimo 7 pontos, 3 acima de U_0 e 3 abaixo, além do U_0 .

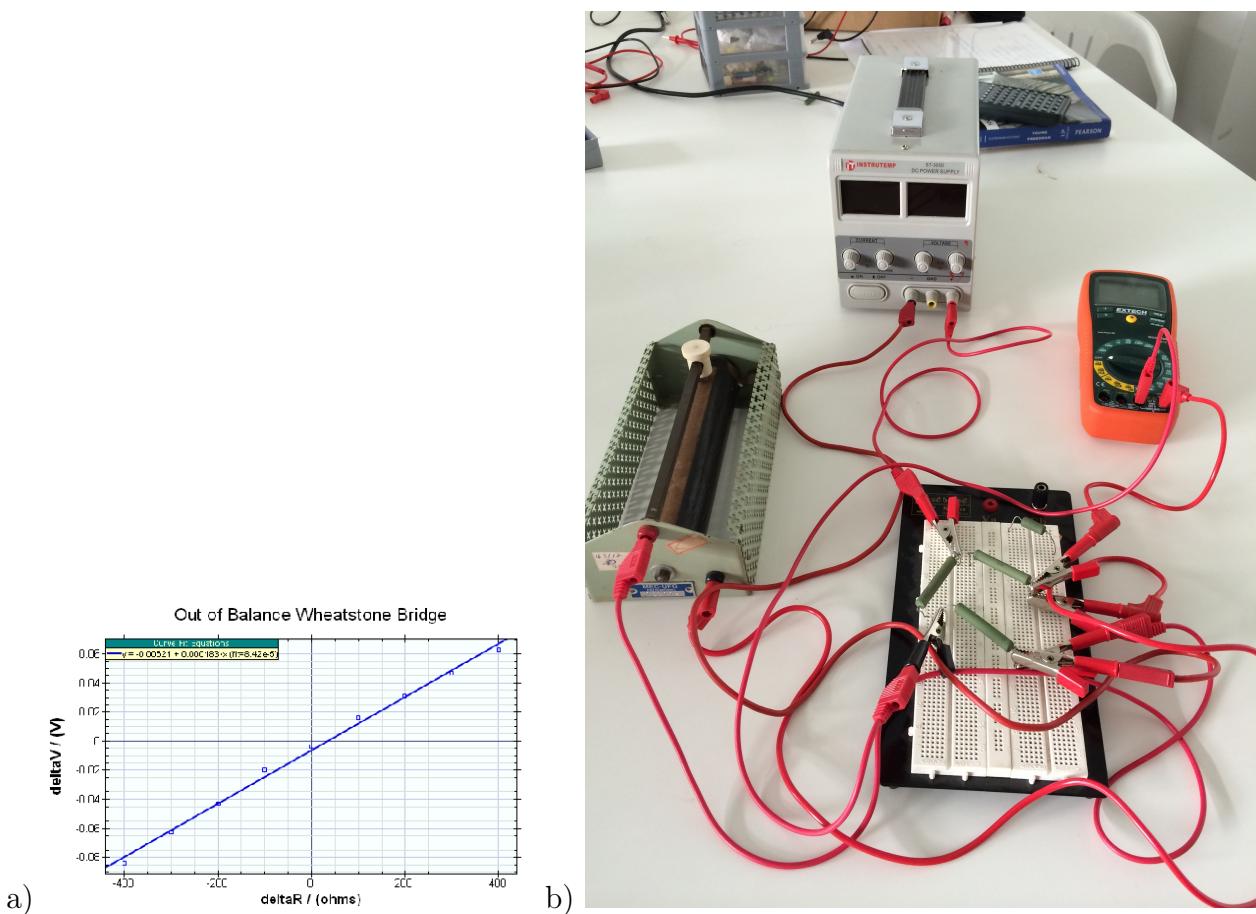


Figura 5.3: (a) Exemplo de gráfico V_{cd} vs R_2 . (b) Circuito montado em laboratório.

5. Faça um gráfico de U vs R_v (semelhante ao que está na figura 5.3(a)). A inclinação da reta resultante (obtida por ajuste linear) é a sensibilidade do sistema. Mantenha a tensão na fonte constante.
6. Refaça todo o procedimento escolhendo agora 3 resistências fixas de valores diferentes.

5.2.2 Material Necessário

Placa de montagem, fonte de alimentação, resistência variável, resistências diversas, cabos e multímetro. Na figura 5.3(b) está o circuito montado com os itens disponíveis em nosso laboratório.

Há dois tipos de resistências variáveis a serem utilizadas em nosso laboratório. Em um deles a variação é discreta no qual escolhemos a centena e a dezena (veja figura 5.4(a)) em unidades de Ω . A precisão da resistência nesse é de 10Ω , o que não é tão bom, porém sua vantagem é que o intervalo de resistência vai de 10 até 1090Ω . Já o outro resistor tem uma variação mais contínua (veja figura 5.4(b)) porém com uma desvantagem de que o intervalo de resistência é menor.

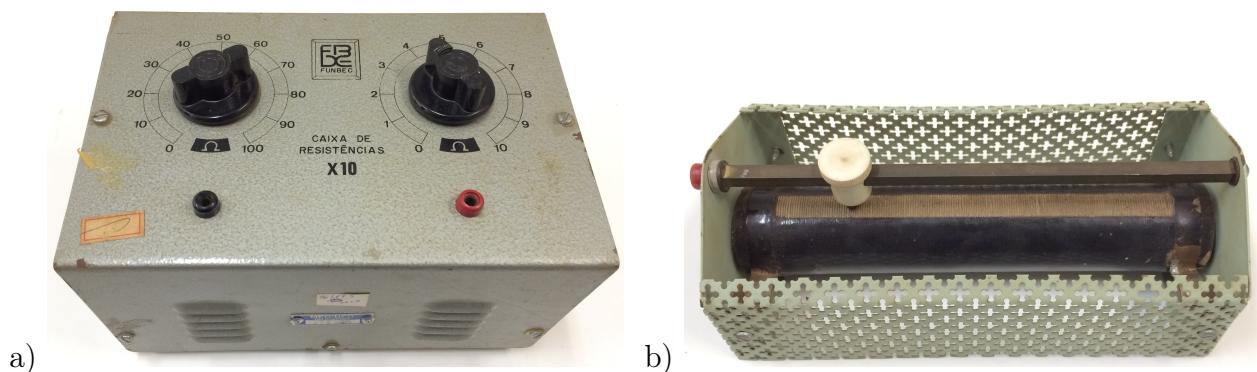


Figura 5.4: Resistores variáveis. (a) Variação em décadas. (b) Variação contínua.

Capítulo 6

Carga e descarga de um capacitor

Capacitor é um dispositivo utilizado para armazenar energia [2]. É um dos três dispositivos básicos, juntamente com o resistor e indutor, que são utilizados em todos os circuitos eletrônicos. O capacitor armazena energia na forma de carga elétrica, para em seguida, liberar essa energia na forma de corrente elétrica. O processo de armazenar energia chama-se carga do capacitor, enquanto para liberar é chamado de descarga do capacitor. Existem diversos tipos diferentes de capacitores. O mais comum é o eletrolítico de placas paralelas como mostra a figura 6.1(a). Quando carregado, cada placa armazena cargas de mesmo módulo e sinais contrários. Essas placas são então enroladas na versão comercial, como mostra a figura 6.1(b). Os símbolos utilizados para representar capacitores em circuitos elétricos está na figura 6.1(c). Neste experimento o capacitor é do tipo eletrolítico, que apresenta polaridade específica e deve ser conectado ao circuito respeitando as indicações impressas no corpo do componente.

6.1 Modelo

Cada capacitor tem como parâmetro característico a capacidade, definido como:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (6.1)$$

onde Q é a carga armazenada nas placas quando uma tensão V é aplicada entre elas.

6.1.1 Carga do capacitor

Na figura 6.2(a) está ilustrado a situação inicial do circuito contendo um capacitor de capacidade C , resistor com resistência R e a fonte de tensão de fem ε . A chave está aberta o

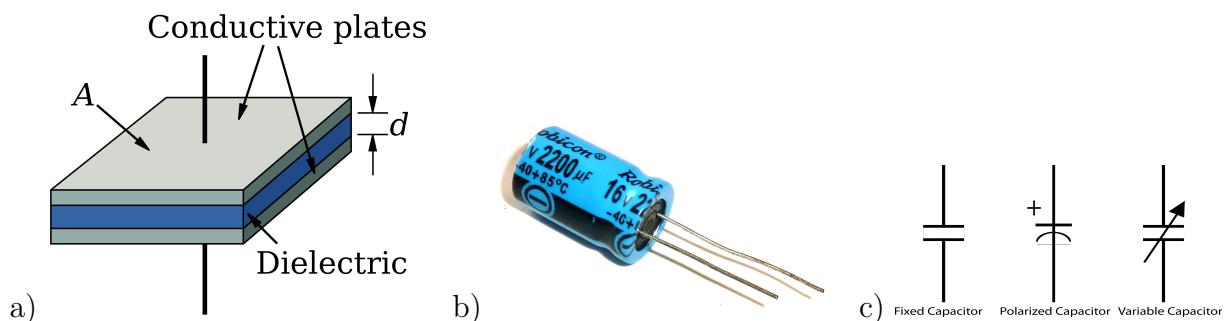


Figura 6.1: (a) Ilustração de um capacitor de placas paralelas. (b) Fotografia de um capacitor eletrolítico. As placas são enroladas. (c) Símbolos usados para representar capacitores em diagramas de circuitos elétricos.

que implica na inexistência de corrente $i(t = 0) = 0$. Representamos a corrente em função do tempo por $i(t)$ (i minúsculo). Da mesma forma a carga no capacitor é $q(t = 0) = 0$. A chave S é fechada em $t = 0$ e assim a corrente e a carga começam a variar para $t > 0$, como mostra a figura 6.2(a). Aplicando a Lei das Malhas temos:

$$\varepsilon - \frac{dq}{dt}R - \frac{q}{C} = 0 \quad (6.2)$$

Há duas funções do tempo (corrente e carga) sendo que uma é a derivada da outra: $i = dq/dt$. Trata-se de uma equação diferencial ordinária linear de primeira ordem cuja solução é [2]:

$$q_c(t) = C\varepsilon \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (6.3)$$

onde a constante de tempo τ é definida como:

$$\tau = RC \quad (6.4)$$

Este τ é chamado de constante de tempo, e dá a ordem de grandeza do tempo necessário para carregar ou descarregar o capacitor. A corrente pode ser então obtida diretamente:

$$i_c(t) = \frac{dq_c(t)}{dt} = \frac{\varepsilon}{R} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (6.5)$$

começa de um valor máximo e decai até zero.

Na figura 6.2(b) estão gráficos da corrente $i_c(t)$ e da carga $q_c(t)$. Repare que a carga sai de um valor zero até um valor limite, que é a carga máxima. A corrente começa de um valor máximo e decai até zero já que no final o capacitor carregado fica com polarização contrária a da fonte, funcionando como duas fontes contrárias.

Das eqs. 6.1 e 6.3, a tensão é:

$$v_c(t) = \varepsilon \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (6.6)$$

6.1.2 Descarga do capacitor

Para o processo de descarga, a situação inicial é um circuito sem fonte contendo apenas o resistor e capacitor carregado com uma carga inicial Q_0 , como ilustrado na figura 6.3(a). Novamente no tempo $t = 0$ a chave é fechada e a corrente e carga começam a variar com o tempo, ilustrado na figura 6.3(a). Aplicando a Lei das Malhas para $t > 0$ temos:

$$\frac{dq}{dt}R + \frac{q}{C} = 0 \quad (6.7)$$

que é o resultado de colocar $\varepsilon = 0$ na Eq. (6.7). A solução desta equação fica:

$$q_d(t) = Q_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (6.8)$$

onde a constante de tempo é ainda dada pela Eq. (6.4). Tirando a derivada temos:

$$i_d(t) = \frac{dq_d(t)}{dt} = -\frac{Q_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (6.9)$$

Da mesma forma, na figura 6.3(b) estão os gráficos da corrente $i_d(t)$ e da carga $q_d(t)$. Repare que a carga e a corrente em módulo saem de um valor máximo até um valor zero. Porém a corrente tem sentido contrário ao do processo de carga, e por isso é negativa.

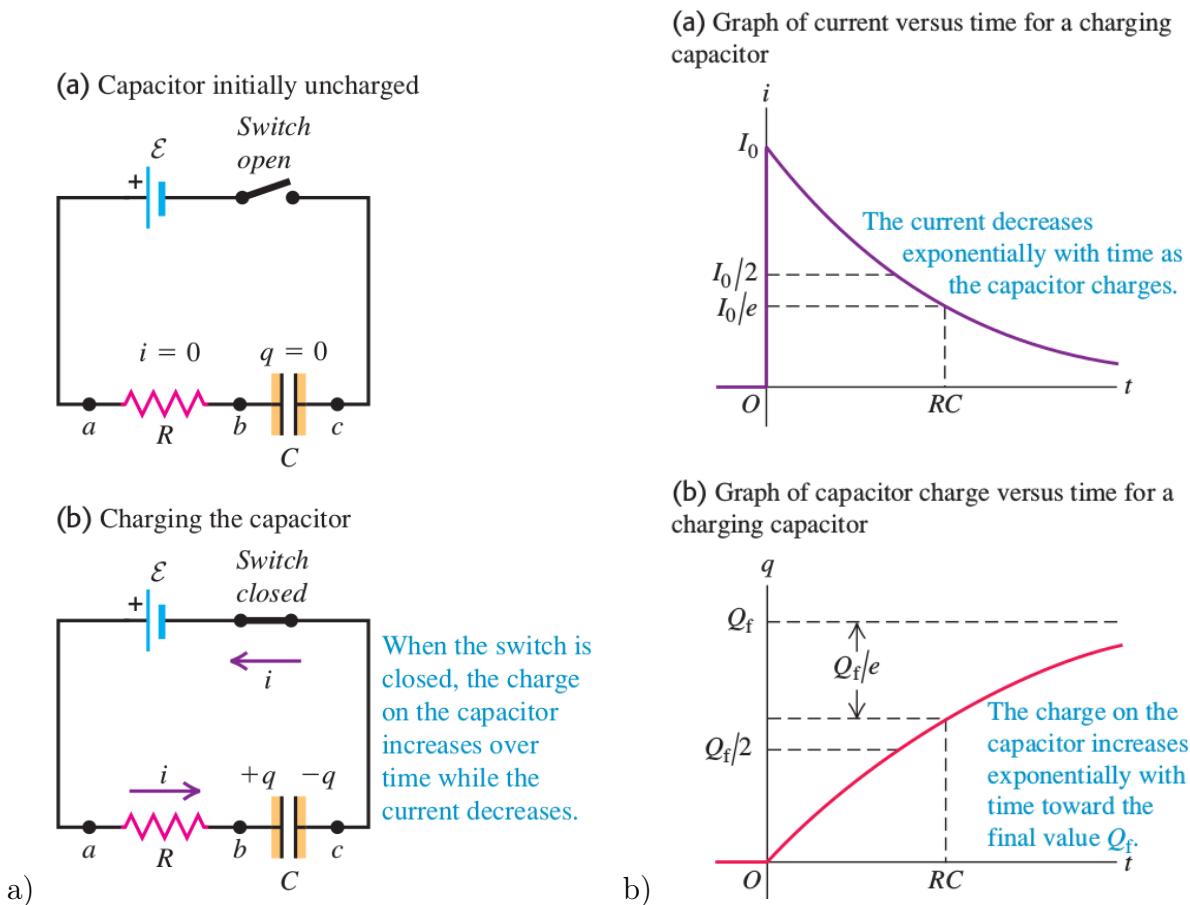


Figura 6.2: Processo de carga do capacitor. (a) Circuito contendo fonte, resistor e capacitor. (b) Gráficos da carga e corrente. Figuras retiradas da Ref. [1].

Das eqs. 6.1 e 6.8, a tensão no capacitor em função do tempo será:

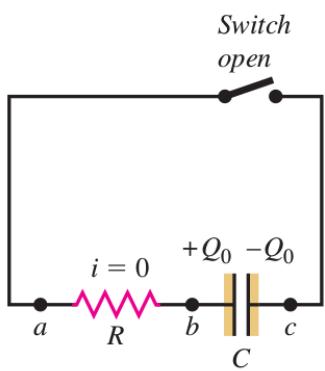
$$v_d(t) = \frac{q(t)}{C} = V_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (6.10)$$

onde usamos $V_0 = \frac{Q_0}{C}$.

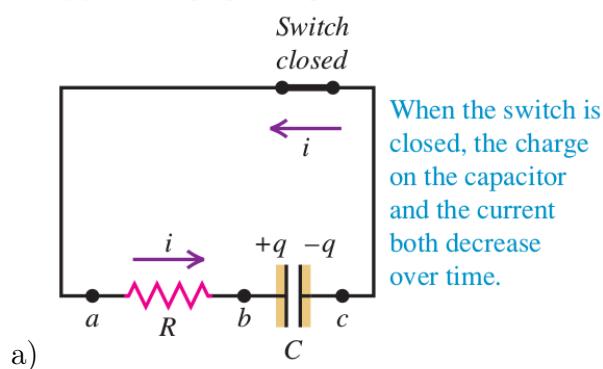
6.2 Objetivos

1. Coletar pontos experimentais da tensão e corrente elétrica durante os processos de carga e descarga do capacitor.
2. Construir os gráficos de tensão em função da corrente de ambos os processos.
3. Fazer o ajuste não linear para o processo de carga usando a Eq. (6.6). Obter a constante de tempo τ_c e a fem da fonte ε .
4. Fazer o ajuste linearizado da tensão em função da corrente para o caso de descarga usando a Eq. (6.10). Obter a constante de tempo τ e a tensão inicial V_0 .
5. Comparar os valores desses parâmetros obtidos pelo ajuste dos dados e pelo cálculo usando sua definição. Essa comparação deve estar explícita no relatório, na seção Análise dos Dados.

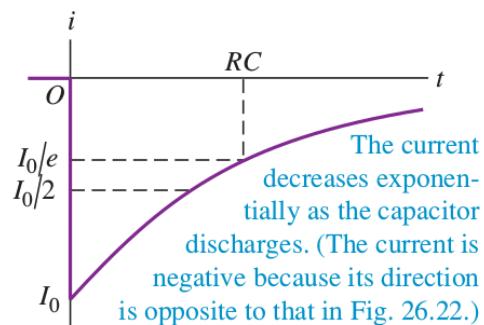
(a) Capacitor initially charged



(b) Discharging the capacitor



(a) Graph of current versus time for a discharging capacitor



(b) Graph of capacitor charge versus time for a discharging capacitor

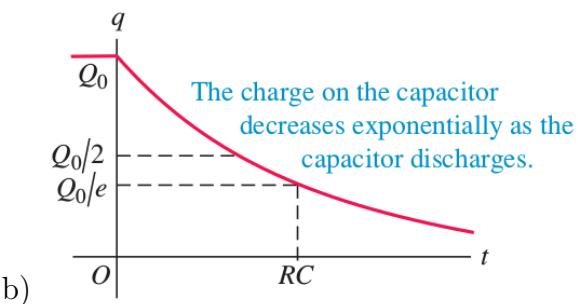


Figura 6.3: Processo de descarga do capacitor. (a) Circuito contendo resistor e capacitor. (b) Gráficos da carga e corrente. Figuras retiradas da Ref. [1].

6. Explicar na conclusão se o experimento foi bem sucedido, ou seja, se o valor calculado teoricamente pela definição concorda com o valor obtido no ajuste dos dados. Não se esqueça dos erros nessa comparação.

6.3 Procedimento Experimental

Material a ser utilizado:

1. Capacitores com valores diversos de capacidade
2. fonte de tensão
3. multímetro digital
4. resistores

Neste experimento vocês precisam montar dois circuitos, de carga e descarga. Além disso, precisam alternar entre ambos com agilidade pois o estado final do circuito de carga é o estado inicial do circuito de descarga. Para isso, utilizaremos um dispositivo que alterna rapidamente entre um circuito e outro. Na figura 6.4(a) está uma fotografia do circuito de carga montado em laboratório. Compare esta com o circuito da figura 6.2(a). Repare que na figura 6.4(a) há uma caixa preta que liga o capacitor a fonte. Este dispositivo é quem alterna entre um circuito e outro. Já na figura 6.4(b) está uma fotografia do circuito de descarga, também usando essa caixa preta. Compare com o circuito da figura 6.3(a). Na figura 6.4(c) está uma fotografia deste

dispositivo. Pressionando o comando para baixo, a caixa conecta entre si os dois contados da esquerda e também os dois contatos da direita. Veja que na figura 6.4(a) os dois contatos da esquerda estão sendo utilizados. Pressionando o comando para cima, a caixa preta conecta os contatos cruzados: superior esquerda com inferior direita e vice versa. Repare que na figura 6.4(b) estão sendo utilizados o contato inferior esquerdo e o superior direito. Na figura 6.5(a) está uma fotografia do circuito completo, usando a caixa preta e na figura 6.5(b) está o seu diagrama.

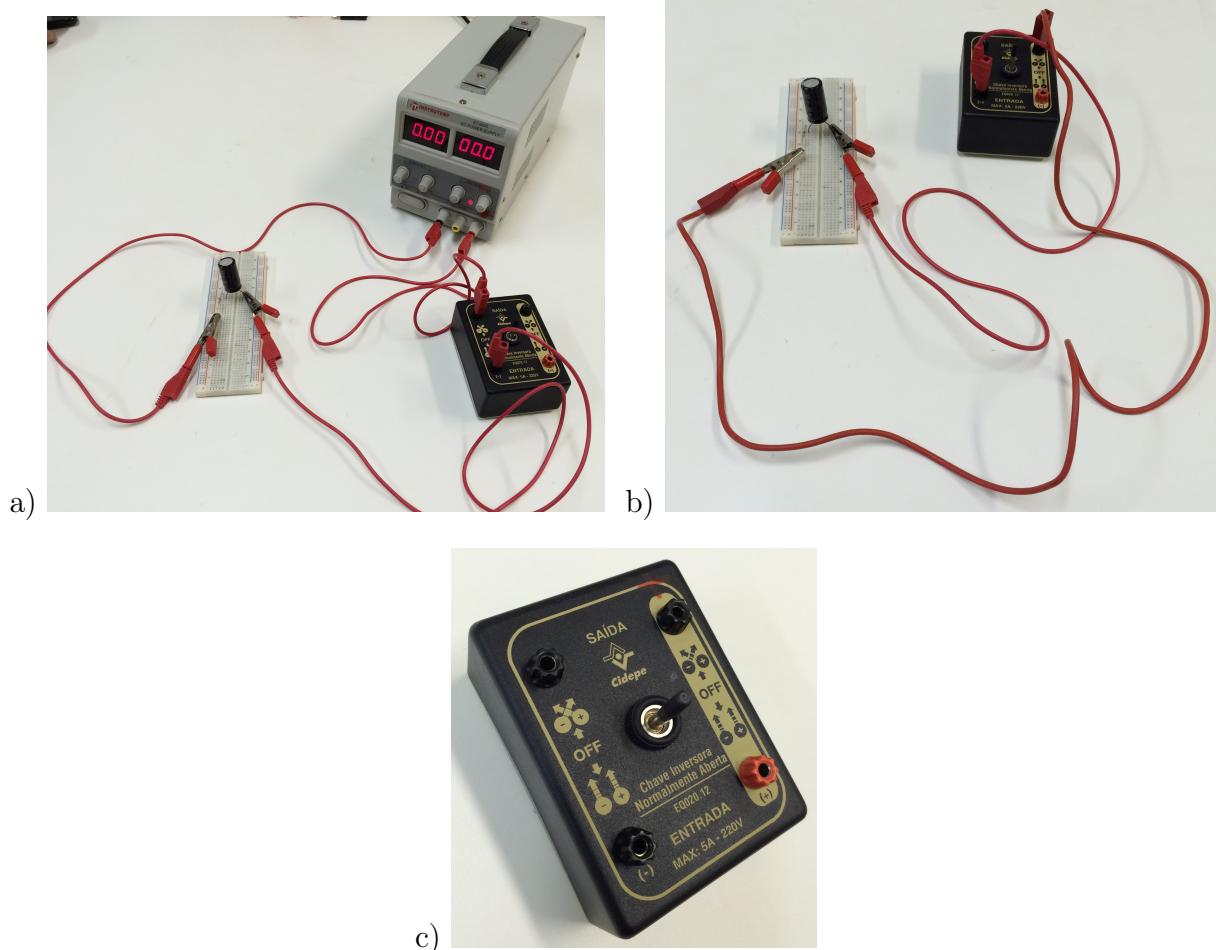


Figura 6.4: (a) Fotografia do circuito montado em laboratório do circuito de carga. (b) Fotografia do circuito de descarga. (c) Dispositivo que alterna os contatos.

6.3.1 Carga do capacitor

- Monte o circuito da figura 6.5(a). Use uma resistência de $10 \text{ k}\Omega$. Um grupo escolhe o capacitor de $2200 \mu\text{F}$ e o outro grupo de escolhe o de $4700 \mu\text{F}$. O multímetro deve ser ligado em paralelo com o capacitor. Aplique 30 V na fonte.
- Anote os valores da resistência R e da capacitância C . Calcule a constante de tempo teórica τ_1 e seu erro através da eq. 6.4.
- Prepare o circuito para medida no processo de carga. Para isso, descarregue o mesmo, de modo que a tensão no capacitor atinja zero, ou o mais próximo disso.
- Considere $t = 0$ o instante em que o o processo de carga se inicia (quando o estudante pressiona o comando da caixa preta para baixo). Durante esse processo, o grupo deverá

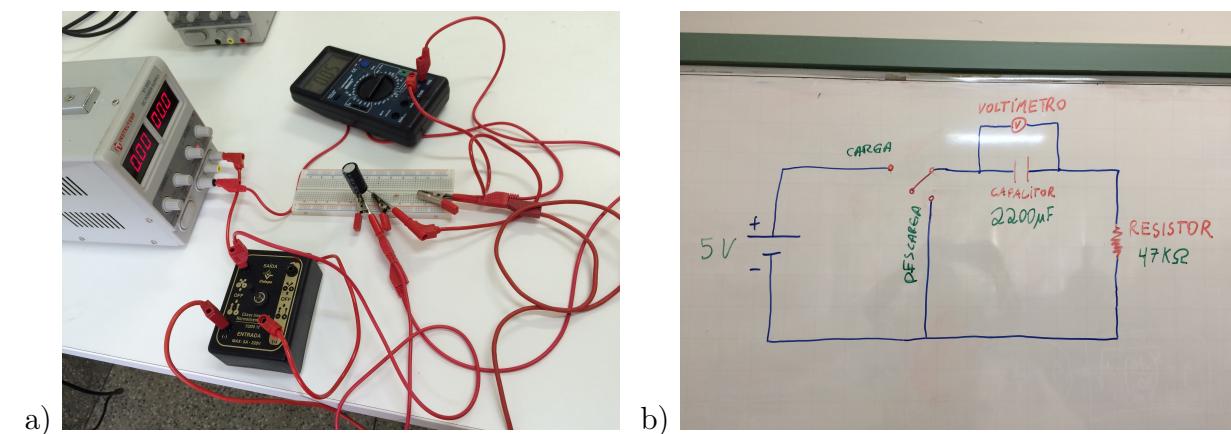


Figura 6.5: (a) Fotografia do circuito montado em laboratório do circuito de carga e descarga, utilizando a chave inversora. (b) Diagrama do circuito de carga e descarga.

anotar os valores de tensão $v_c(t)$ e t em uma tabela, com intervalos espaçados regularmente de tempo. Use por exemplo $\Delta t = 5$ ou 10 s. Os valores devem ser anotados até que o capacitor esteja carregado, ou seja, até que os valores de $v_c(t)$ não variem mais.

5. Os valores medidos devem ser apresentados em uma tabela no relatório. Não se esqueça das unidades. Estime o erro experimental na tensão e no tempo, dado a precisão dos aparelhos de medida.
6. Faça o gráfico de $v_c(t)$ vs t (no Origin, Igor, Python, etc...). Não se esqueça do título, legenda, nome dos eixos, etc...
7. Faça o ajuste não linear dos pontos experimentais utilizando a expressão de $v_c(t)$, eq. 6.6. Use o tutorial na seção B.2 dos apêndices.
8. Calcule a constante de tempo τ através do ajuste. Compare esse valor com o valor τ calculado anteriormente (não se esqueça dos erros!!)

6.3.2 Descarga do capacitor

O objetivo aqui é fazer as mesmas medidas que no procedimento anterior, porém no processo de carga.

1. Monte o circuito da figura 6.5(a). Use uma resistência de $47\text{ k}\Omega$ e uma capacitância de $2200\text{ }\mu\text{F}$. O multímetro deve ser ligado em paralelo com o capacitor. Aplique entre 5 e 10 V na fonte.
2. Anote os valores da resistência R e da capacitância C . Calcule a constante de tempo teórica τ_1 e seu erro através da eq. 6.4.
3. Prepare o circuito para medida no processo de descarga. Para isso, carregue o mesmo, de modo que a tensão no capacitor atinja seu valor máximo. Esse valor é o V_0 , que deve ser anotado.
4. Considere $t = 0$ o instante em que o processo de descarga se inicia (quando o estudante pressiona o comando da caixa preta para cima). Durante esse processo, o grupo deverá anotar os valores de tensão $v_d(t)$ (eq. 6.6) e t em uma tabela, com intervalos espaçados regularmente de tempo. Use por exemplo $\Delta t = 5$ ou 10 s. Os valores devem ser anotados

até que o capacitor esteja descarregado, ou seja, até que os valores de $v_d(t)$ atinjam um mínimo (zero, ou o mais próximo disso).

5. Os valores medidos devem ser apresentados em uma tabela no relatório. Não se esqueça das unidades. Estime o erro experimental na tensão e no tempo, dado a precisão dos aparelhos de medida.
6. Faça o gráfico de tensão vs. tempo. Não se esqueça do título, legenda, nome dos eixos, etc...
7. Faça o ajuste linear dos pontos experimentais, veja seção A.1.1 dos apêndices. Calcule a constante de tempo τ e compare seu valor com o valor τ calculado anteriormente (não se esqueça dos erros!!)

Capítulo 7

Transformadores

Por que a tensão nas tomadas em nossas residências é alternada? Não seria mais simples ter tensão contínua? A primeira resposta para essa pergunta é que a tensão é gerada de modo alternado. Já um segundo motivo é que com tensão alternada pode-se aumentar ou diminuir sua amplitude facilmente. Isso por que a tensão é gerada com uma certa amplitude. Em seguida ela é aumentada para transmissão entre cidades. Quando chega nas cidades, a tensão é diminuída várias vezes, até que em nossas residências chegam com amplitude V_r em torno de 120 ou 240 V. Neste experimento vamos entender como alterar essa amplitude da tensão alternada. Para isso vamos usar o transformador, com a finalidade de modificar a tensão da rede de distribuição para um valor menor que o fornecido pela rede.

Tensão alternada é caracterizada por uma oscilação periódica do valor da tensão, mudando de sentido inclusive, como indicado na figura 7.1. Transformadores são muito utilizados nas redes elétricas em nossa sociedade. No transporte entre cidades, a tensão é elevada para diminuir perdas. Assim, transformadores diminuem essa tensão nas subestações. Antes de chegar nas residências, a tensão é diminuída mais uma vez por transformadores nos postes (veja figura 7.2(a)). Assim, a tensão nas tomadas residenciais é 220 V ou 120 V, dependendo da região. Porém, diversos aparelhos usam uma tensão menor ainda, cerca de 10 V. Assim, mais uma redução é necessária, por exemplo, nos aparelhos carregadores de baterias de celulares e laptops (veja figura 7.2(b)).

7.1 Modelo

Um transformador de tensão elétrica é formado por dois circuitos, sendo que cada um consiste de um enrolamento com um certo número de espiras. A tensão é gerada em um dos circuitos e então transformada para o outro circuito. O primeiro é chamado de circuito primário

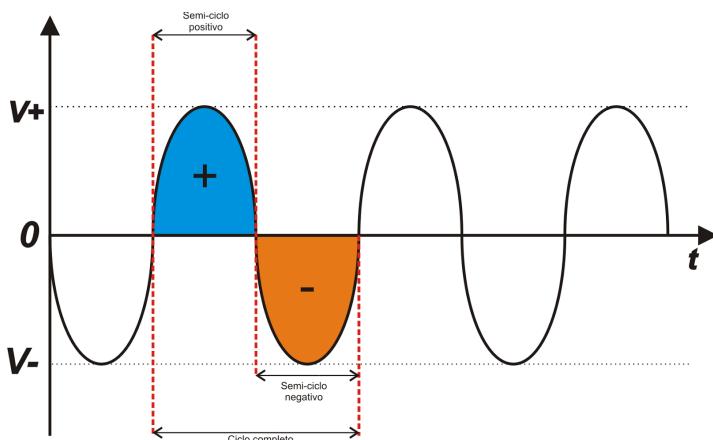


Figura 7.1: Gráfico de uma tensão senoidal.

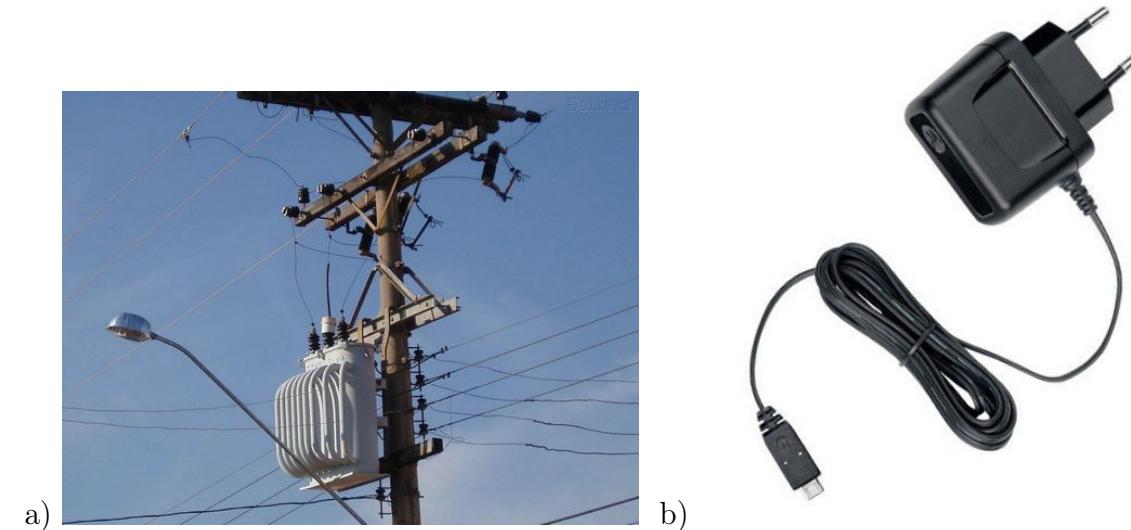


Figura 7.2: (a) Fotografia de um transformador em um poste. (b) Carregador de celular.

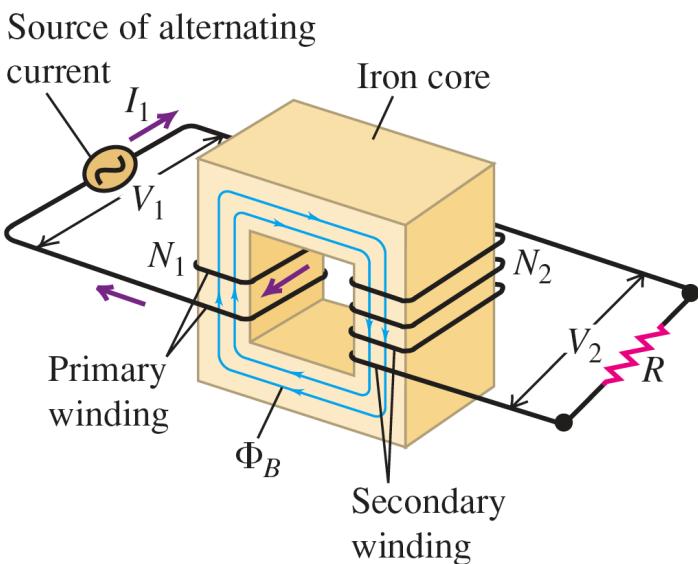


Figura 7.3: Ilustração de um transformador de tensão. Figura retirada da Ref. [1].

(onde a tensão é gerada) e o segundo de secundário (onde a tensão é induzida). As tensões envolvidas tem que ser alternadas para que o processo ocorra. Fisicamente o que ocorre é que a tensão alternada no primário induz uma tensão, também alternada, no secundário devido a Lei de Faraday:

$$\int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (7.1)$$

onde C é a curva na qual surge o campo elétrico e S é a superfície na qual o fluxo magnético varia.

Na figura 7.3 está uma ilustração do dispositivo. Os circuitos são conectados através de um núcleo de ferro, que tem como função maximizar o fluxo Φ sentido no circuito secundário e gerado pelo primário. V_1 , I_1 e N_1 são respectivamente a tensão gerada, a corrente e o número de espiras no circuito primário. V_2 , I_2 e N_2 são os mesmos do circuito secundário.

Suponha que o fluxo magnético total no primário seja $\Phi_1 = N_1\Phi$, ou seja, Φ é o fluxo em cada volta do enrolamento. Supomos que todo o fluxo gerado no primário seja sentido no secundário (essa é a função do núcleo de ferro). Assim, o fluxo total no secundário será

$\Phi_2 = N_2\Phi$. Da lei de Faraday, temos que:

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Dessas equações, obtemos que a razão entre a tensão ε e o número de espiras N em cada circuito é a mesma. Logo:

$$\frac{\varepsilon_1}{N_1} = \frac{\varepsilon_2}{N_2}$$

Isolando a tensão induzida da eq. anterior temos:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (7.2)$$

Assim, para aumentar a tensão induzida ε_2 , basta colocar mais voltas no circuito secundário ($N_2 > N_1$).

7.2 Objetivos

Verificar a validade da eq. 7.2.

7.2.1 Material Necessário

- Bobinas com $N = 300, 600, 900$ e 1200 espiras, veja figuras 7.4(a) e 7.4(b).
- Fonte de tensão (a mesma indicada na figura 5.3(b)).
- Cabos de conexão.
- Núcleo de ferro, veja figuras 7.4(c) e 7.4(d).

7.3 Metodologia

Para realizar o objetivo, vocês devem fazer algumas montagens utilizando bobinas com diferentes números de espiras e verificar a transformação de tensão. Em cada montagem uma dupla de bobinas deverá ser selecionada. Na figura 7.5 está uma ilustração do circuito a ser montado. Repare que a resistência no circuito 2 (secundário) representa um dispositivo genérico. No caso de vocês, como não será conectado nenhum dispositivo específico, a resistência total será devida aos fios e conexões.

- Faça a primeira montagem utilizando uma dupla de bobinas, por exemplo $N_1 = 300$ e $N_2 = 600$ espiras. Escolha uma bobina como a primária, a qual será conectada com a fonte de tensão.
- Aplique 5 Volts na bobina primária e meça a tensão na bobina secundária. Anote o resultado.
- Faça o mesmo procedimento com outras combinações de transformadores, sempre anotando os valores.
- Apresente os resultados em uma tabela e faça a análise.

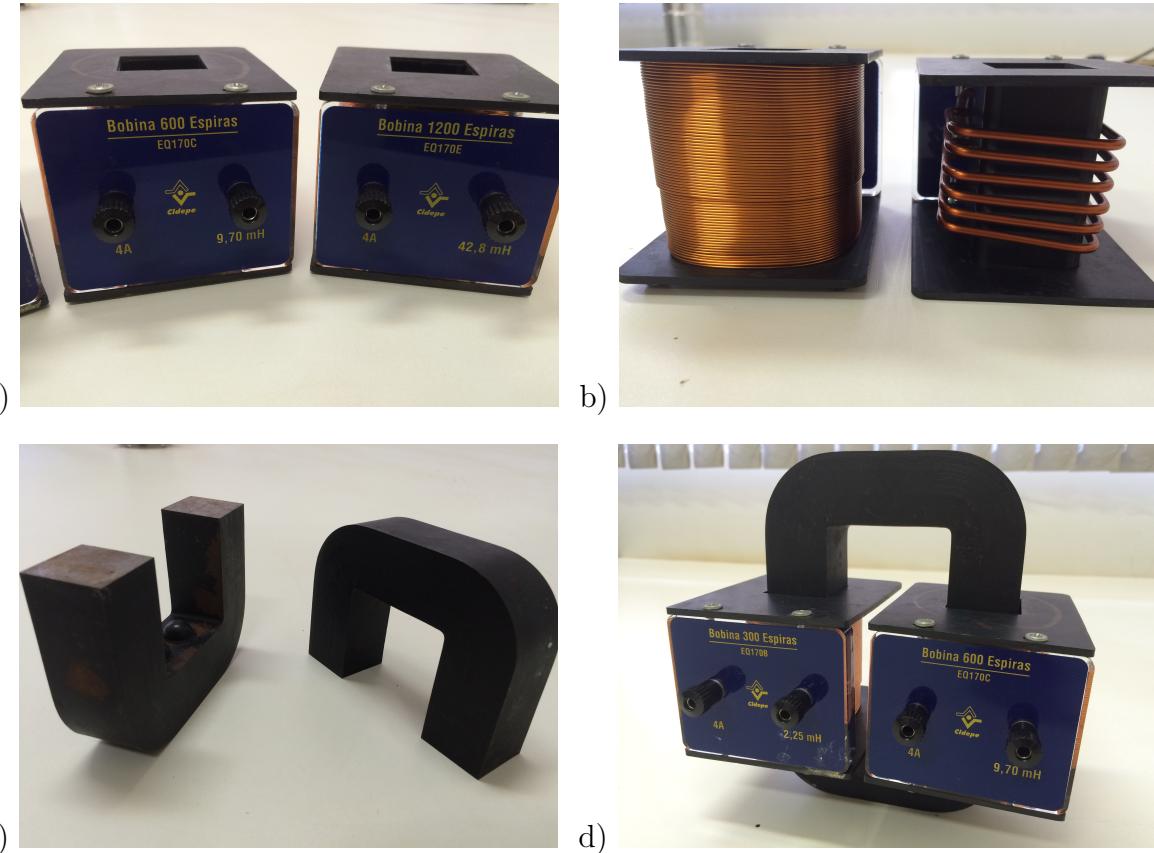


Figura 7.4: Fotografias das bobinas e núcleos de ferro existentes em nosso laboratório. (a) e (b) Bobinas com diferentes números de espiras. (c) Núcleos de ferro. (d) Duas bobinas conectadas por dois núcleos de ferro.

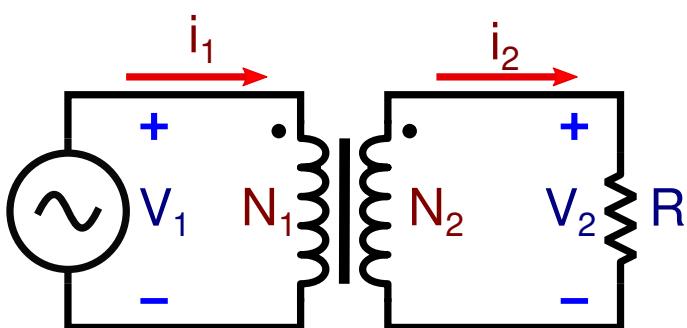


Figura 7.5: Circuito contendo um resistor
Figura adaptada de Wikipedia <https://en.wikipedia.org/wiki/Transformer>.

Capítulo 8

Osciloscópio

Osciloscópio é um instrumento muito utilizado em um laboratório de eletrônica [9]. Pois com ele podemos obter a variação de tensão de qualquer fonte ou dispositivo, mesmo sendo uma variação não senoidal. Ou seja, um osciloscópio pode medir a tensão em função do tempo, e além disso, pode-se obter parâmetros como frequência, amplitude, etc..., desta função temporal. Os osciloscópios mais antigos são os analógicos, feito com um tubo de raios catódicos, veja figura 8.1(a). Neste tubo, que também equipa as TVs antigas, um feixe de elétrons é desviado por campos elétrico e magnético até atingir uma tela de fósforo, que emite um fóton após a colisão do elétron (veja figura 8.2). De acordo com o desvio provocado pelos campos, a imagem desejada é formada na tela. Já os osciloscópios mais modernos são digitais, a exemplo das TVs mais modernas, veja figura 8.1(b).

Para se conectar os equipamentos ao osciloscópio, é necessário dois fios, para fechar o circuito. Um desses fios em geral é aterrado (potencial igual a zero) enquanto que o outro carrega o sinal. A carcaça metálica do osciloscópio também é aterrada. Os fios utilizados no osciloscópios tem conectores chamados de BNC, ou cabo coaxial (veja figura 8.3). Neste cabo, o fio é composto de dois fios internos. O mais interno deles é o terminado no centro, que pode-se ver da figura. Este é o que carrega o sinal. O segundo fio é na verdade uma casca cilíndrica em volta deste fio interno, e é a estrutura externa que vemos na figura. Este exteno é em geral o aterrado. A vantagem de se utilizar este cabo coaxial, em relação aos fios tradicionais, é que no coaxial o campo magnético criado pelo fio interno não influi a casca externa, e vice versa. O campo gerado pela casca é zero em seu interior, onde está o interno. Já o campo gerado pelo interno não consegue aplicar nenhum torque ou força no externo, devido a simetria. O trigger é a parte mais difícil no primeiro contato com o osciloscópio. Ele tem a função de dizer para o osciloscópio quando deve medir a tensão e mostrar na tela.



a)



b)

Figura 8.1: (a) Osciloscópio analógico em nosso laboratório. (b) Osciloscópio digital.

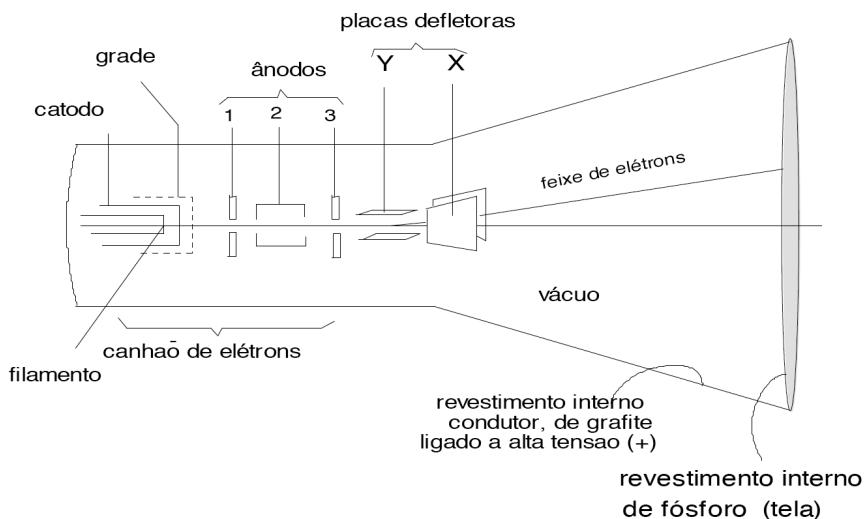


Figura 8.2: Ilustração de um tubo de raios catódicos. Figura retirada da Ref. [7].



Figura 8.3: Cabo coaxial. Figura retirada da internet.

8.1 Objetivo

Neste experimento, temos o como objetivo o aprendizado do uso do osciloscópio. Para isso, iremos utilizá-lo em 3 situações:

1. Observação da tensão retificada quando uma tensão alternada é aplicada em uma ponte de diodos.
2. Medida da tensão alternada de um gerador de onda sonora de uma frequência.
3. Medida da tensão alternada composta que forma o sinal de uma música.

Os seguintes itens devem constar no relatório:

1. Na Introdução: breve explicação do funcionamento do osciloscópio.
2. Registro da tensão medida na ponte de diodos e a respectiva explicação.
3. Registro da tensão medida do gerador de frequência e a respectiva explicação.
4. Registro da tensão medida do sinal sonoro de uma música e a respectiva explicação.

O relatório deve estar bem escrito, com figuras bonitas e que passam a informação desejada, com equações quando necessário. Todas as referências devem ser mencionadas no final. Acima de tudo, é essencial que vocês entendam o que estão escrevendo, e que escrevam da forma que vocês entendam.

8.2 Ponte de diodos: retificador de tensão

O primeiro circuito a ser explorado é a ponte de diodos, que tem a função de retificar uma tensão alternada. Retificar significa eliminar uma parte da tensão. No caso de tensão alternada, elimina-se a parte negativa ou positiva. Nesta montagem a parte eliminada é a negativa. Na figura 8.4(a) está uma ilustração da tensão retificada. Na parte de cima está a tensão de entrada. No meio, a tensão retificada em meia onda, na qual a parte negativa é substituída por uma constante igual a zero. Na parte de baixo está a retificada de onda completa, onde a parte negativa é refletida para cima. Na figura 8.4(b) está um esquema do circuito de ponte de diodo. É semelhante a ponte de Wheatstone, apenas trocando os resistores por diodos. Repare que a tensão é aplicada em dois contatos opostos e medida nos outros dois contatos opostos.

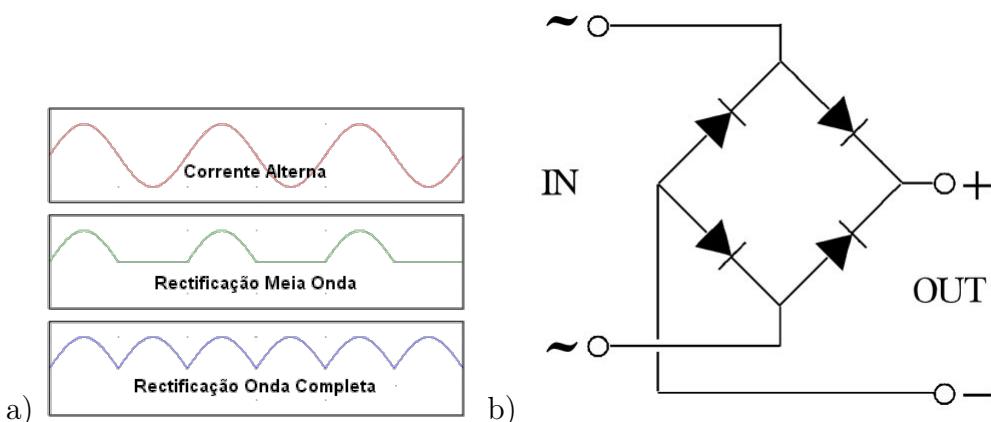


Figura 8.4: (a) Retificação de meia onda e de onda completa. Figura retirada do site <http://www.electronica-pt.com/diodos-rectificadores>. (b) Esquema do circuito de ponte de diodos a ser montado.

Quando uma tensão alternada é aplicada em um diodo apenas, ocorre a retificação de meia onda. O circuito de pontes de diodo serve para retificar por completo a onda. Na figura 8.5(a) está uma fotografia do circuito montado em nosso laboratório, onde pode-se ver o osciloscópio, a fonte alternada e o circuito. Na figura 8.5(b) está uma fotografia da tela do osciloscópio mostrando os dois canais. No canal 1 está a tensão de entrada na ponte de diodos, e é a variação senoidal. No canal 2 está a tensão de saída da fonte, onde pode-se ver que a parte negativa foi eliminada. Esta tensão parece a retificação de meia onda, apesar de termos utilizado uma ponte de diodo. Por que essa discrepância?

8.2.1 Sinal do celular

Outro uso do osciloscópio é analisar o sinal da onda que compõe uma música. Para isso, podemos usar um celular como fonte da música, como está na figura 8.6(a). A onda que compõe a música é extremamente complicada, formada por várias ondas monocromáticas (apenas um comprimento de onda), além de mudar de forma bastante ao longo da música. Na figura 8.6(b) está uma fotografia da tela do osciloscópio durante um instante na música.

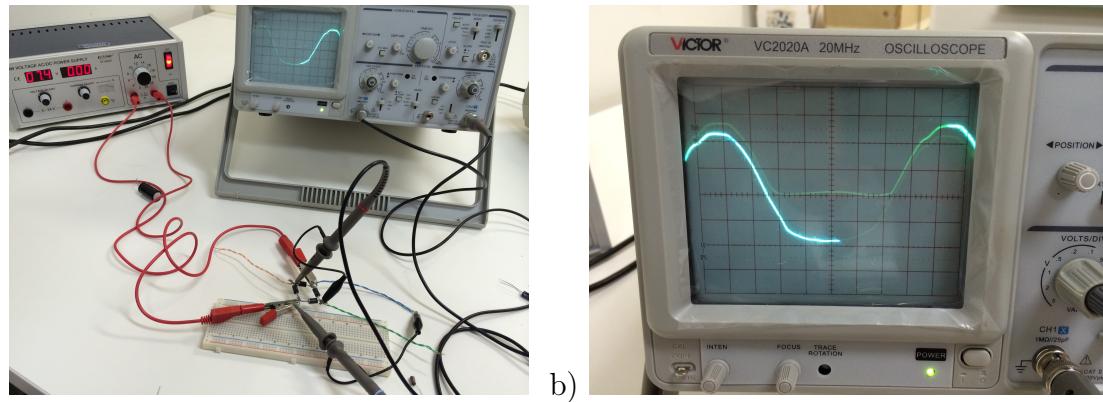


Figura 8.5: (a) Fotografia do circuito montado em nosso laboratório para medir a tensão retificada pela ponte de diodos. (b) Tensão retificada pela ponte de diodos.

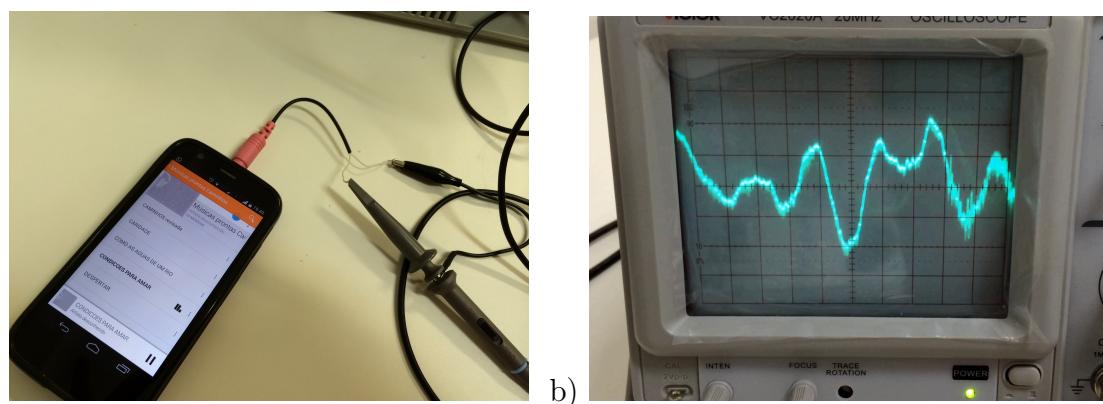


Figura 8.6: (a) Medindo a tensão de saída do celular executando uma música com as ponteiras do osciloscópio, montado em nosso laboratório. (b) Onda aleatória do sinal sonoro.

Capítulo 9

Capacitor em um osciloscópio

9.1 Carga e descarga de um capacitor

Nesta montagem, o objetivo é observar a variação da tensão no capacitor durante a carga e a descarga, semelhante ao feito no experimento anterior. Porém, não é necessário calcular a constante de tempo. Na figura 9.1 está uma ilustração da montagem que deverá ser feita. Nesta figura, input é o sinal de entrada, que pode ser uma tensão constante ou uma tensão alternada. Output é a tensão de saída, que será lida no osciloscópio.

Se a tensão de entrada é constante, a tensão no capacitor será dada pela eq. 6.6. Após essa carga, se a tensão for alterada para zero, a tensão no capacitor será de descarga, dado pela eq. 6.10. O objetivo com esta montagem é observar essas duas curvas, carga e descarga, na tela do osciloscópio. Para isso, usaremos como tensão de entrada uma onda quadrada, que é a curva de cima na figura 9.2(a). Esta onda quadrada consiste de tensão diferente de zero e igual a zero, em períodos alternados. Nos momentos em que a tensão é maior que zero, o capacitor é carregado. Quando a tensão é zero, o capacitor é descarregado. Na mesma figura 9.2(a), na curva do canal 2, embaixo, está a tensão de saída do capacitor, que consiste nas curvas de carga e descarga, como esperado pelas eqs. 6.6 e 6.10. Na figura 9.2(b) está um zoom expandido da queda do capacitor. Essas variações de tensão devem ser obtidas, e a tela do osciloscópio deve ser fotografada para registro no relatório.

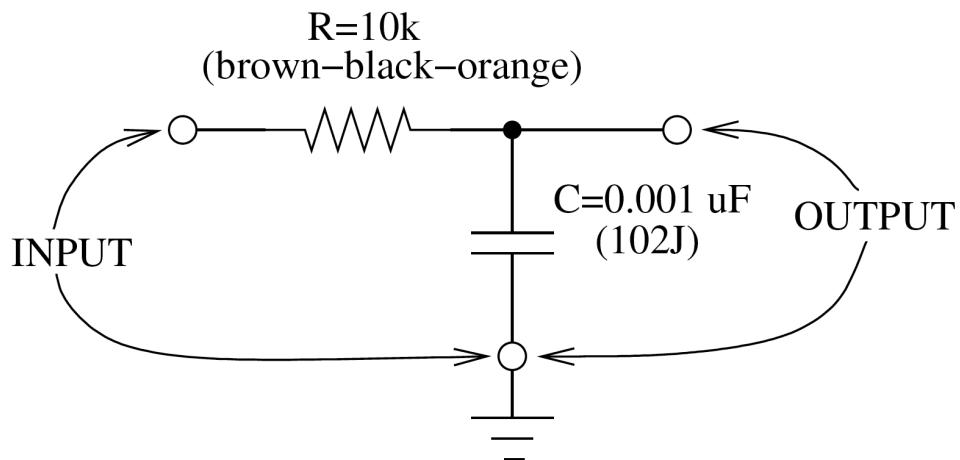


Figura 9.1: Ilustração do circuito para medida da tensão no capacitor utilizando o osciloscópio. Figura retirada da Ref. [7].

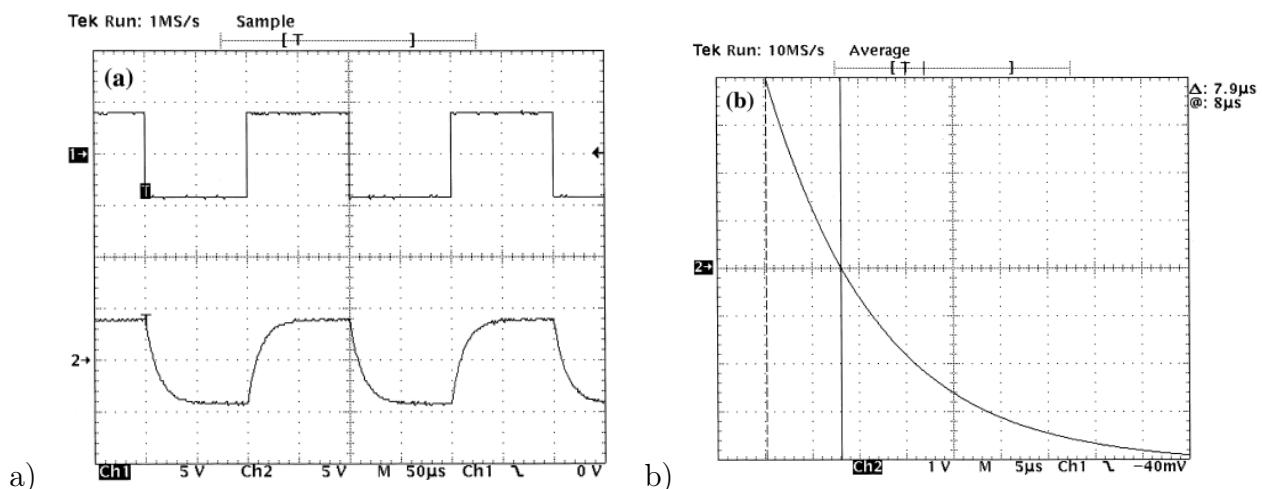


Figura 9.2: (a) Ondas observadas no osciloscópio. Tensão de entrada (onda quadrada) no canal 1 e tensão de saída no canal 2. Osciloscópio analógico. (b) Decaimento da tensão expandido. Figuras retiradas da Ref. [11].

Apêndice A

Códigos

A.1 Ajuste Linear em Python

A seguir está o código que gera o gráfico da figura 1.2. Em verde estão os comentários, em azul as funções internas do Python e em vermelho as *string*.

```
#####
#
# Programa para ajuste linear da Lei de Ohm
# Acoes deste programa
#1) importa dados de corrente e tensao de um arquivo .txt
#2) Faz o ajuste linear desses dados
#3) Faz um grafico contendo os dados e o ajuste
#4) Exporta o grafico em um arquivo
#
#Autor: Paulo Freitas Gomes,
#Ultima atualizacao: 18 de Agosto de 2016.
#####

# Importacao de bibliotecas
from lmfit import minimize, Minimizer, Parameters, Parameter, report_fit
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pylab

#####
#
#Importacao os dados
filename = 'dados_leideohm.txt' #nome do arquivo contendo os dados da corrente e
# tensao
f = open(filename, 'r') #entra no if se houver o arquivo filename, de onde ele vai
# ler a configuracao
corrente = [] #inicializa uma lista
tensao = []
for line in f:
    a1, a2 = line.split() #le os dois valores de cada linha
    corrente.append(float(a1)) #adiciona o valor na corrente
    tensao.append(float(a2)) #adiciona o valor na tensao
f.close()

#Convertendo as listas para numpy array
```

```

x = np.array(corrente)
data = np.array(tensao)

#####
# Definicao da funcao a ser minimizada
def fcn2min(params, x, data):
    """ model decaying sine wave, subtract data"""
    resistencia = params['resistencia']
    coeflin = params['coeflin']
    model = resistencia * x + coeflin
    return model - data #funcao = modelo - dados

# Mostrando na tela
print 'Funcao a ser ajustada'
print 'Modelo = resistencia * x + coeflin'

#####
# Definicao dos valores iniciais dos parametros, que dependem dos dados a serem
# ajustados
params = Parameters()
params.add('resistencia', value= 0.15)
params.add('coeflin', value= 0.0)
# Caso queira limitar os intervalos de variacao desses parametros, use por exemplo
# params.add('resistencia', value= 0.15, min=0.0)
# params.add('coeflin', value= 0.0, min=-5.0, max=5.0)

#####
# Fazendo o ajuste minimizando a funcao
minner = Minimizer(fcn2min, params, fcn_args=(x, data))
kws = {'options': {'maxiter':10}}
result = minner.minimize()

# result e o erro, a diferenca entre o modelo e os dados

# Definindo o resultado final = dados + erro
final = data + result.residual

# Mostrando os resultados na tela
report_fit(result)

#####
# Grafica dos resultados

nome = 'ajuste_Lei_de_Ohm.pdf' #definindo o nome do arquivo a ser criado
plt.plot(x, data, 'ob', ms=12, label='Dados' ) # grafico dos dados
plt.plot(x, final, '-r', lw = 4, label='Ajuste') # grafico da funcao ajustada
pylab.legend(loc='upper left')
plt.title('Verificacao da Lei de Ohm', fontsize=18)
plt.savefig(nome) # Salva o grafico em um arquivo

```

```

plt.xticks(color='k', size=18)
plt.yticks(color='k', size=18)
plt.xlabel('Corrente (mA)', {'color': 'k', 'fontsize': 18}) #k indica cor preta
plt.ylabel('Tensao (V)', {'color': 'k', 'fontsize': 18})
plt.text(60, 6, '$y = ax + b$', {'color': 'k', 'fontsize': 18}) #b indica cor azul
(blue)
plt.text(60, 4, '$a = (0.156 \pm 0.002)$ ', {'color': 'k', 'fontsize': 18}) #b indica
cor azul (blue)
plt.text(60, 2, '$b = (-0.07 \pm 0.14)$ ', {'color': 'k', 'fontsize': 18}) #b indica
cor azul (blue)
plt.show() # Mostra o grafico na tela

#####
##### FIM #####

```

Primeiramente o programa define as bibliotecas a serem utilizadas. Essa é uma das grandes vantagens do Python: há inúmeras bibliotecas nas mais diversas áreas do conhecimento. Neste exemplo utilizamos a biblioteca `lmfit` que contém várias funções a serem usadas no ajuste. Já a biblioteca `numpy` contém inúmeras funções de cálculo numérico. As bibliotecas `matplotlib.pyplot` e `pylab` contém os recursos para confecção do gráfico.

Em seguida o código importa os dados de um arquivo `txt`. Esses dados são armazenados em uma variável do tipo lista que então é convertida para uma variável do tipo *array* numérico. Depois é definida a função teórica (modelo) e a função teste (modelo menos dados). Em seguida é realizado o ajuste, que consiste em minimizar a função teste variando os parâmetros da função modelo. Depois os resultados são apresentado no console e o gráfico é construído.

A.1.1 Ajuste Não Linear em Python

Nesta seção apresentamos o código para fazer o gráfico e o ajuste exponencial da tensão pelo tempo na descarga do capacitor. O código desenvolvido está abaixo:

```

#####
# Programa para ajuste linear da tensao em funcao do tempo
#na descarga de um capacitor
# Acoes deste programa
#1) importa dados de tempo e tensao de um arquivo .csv
#2) Faz o ajuste exponencial desses dados
#3) Faz um grafico contendo os dados e o ajuste
#4) Exporta o grafico em um arquivo
#
#Autor: Paulo Freitas Gomes,
#Ultima atualizacao: 24 de Agosto de 2016.
#####

#Importacao de bibliotecas
from lmfit import minimize, Minimizer, Parameters, Parameter, report_fit
import numpy as np #contem diversas funcoes numericas
import matplotlib.pyplot as plt # funcionalidades para fazer o grafico
import pylab, csv

#####
#Importacao os dados
tempo = [] #cria uma lista

```

```

tensao = []
with open('dados_descarga.csv', 'rb') as csvfile:
    spamreader = csv.reader(csvfile, delimiter=',', quotechar='|')
    for row in spamreader:
        a,b = row #le a linha do arquivo
        tempo.append(float(a)) #adiciona o valor na corrente
        tensao.append(float(b)) #adiciona o valor na tensao

#Convertendo as listas para numpy array
t = np.array(tempo)
data = np.array(tensao)
#####
# Definicao da funcao: Modelo = funcao teorica
#Funcao a ser ajustada = Modelo - Dados
def fcn2min(params, x, data):
    """ model decaying sine wave, subtract data"""
    tau = params['tau'] #constante de decaimento
    V0 = params['V0'] #tensao inicial
    model = V0 * np.exp(- t / tau)
    return model - data

print 'Funcao teorica'
print 'Modelo = V0 * np.exp(- t / tau)'

# Definicao dos valores iniciais dos parametros
params = Parameters()
params.add('tau', value= 100) #valor inicial para tau no ajuste
params.add('V0', value= 10)
# params.add('shift', value= 0.0, min=-np.pi/2., max=np.pi/2)

#####
# Fazendo o ajuste usando Minimos Quadrados
minner = Minimizer(fcn2min, params, fcn_args=(t, data))
kws = {'options': {'maxiter':100}}
result = minner.minimize()

# Resultado Final
final = data + result.residual

# Relatorio final com os resultados
report_fit(result)

#####
# Graficar os resultados
plt.plot(t, data, 'ob', ms=9, label='Dados' ) #grafico dos dados, ms = 9 determina o
    #tamanho dos marcadores
plt.plot(t, final, '-r', lw = 3, label='Funcao $v_d (t)$') #grafico da funcao
    #ajustada
pylab.legend(loc='upper right', fontsize=18) #posiciona a legenda
plt.title('Ajuste exponencial - Descarga do Capacitor', fontsize=18)
plt.xticks(color='k', size=16)
plt.yticks(color='k', size=16)

```

```

plt.xlabel('Tempo $t$ (s)', {'color': 'k', 'fontsize': 18}) #k indica cor preta
plt.ylabel('Tensao (V)', {'color': 'k', 'fontsize': 18})
plt.text(300, 6, '$y = a \exp (- t / b)$', {'color': 'k', 'fontsize': 18})
plt.text(300, 5, '$ a = (9.72 \pm 0.02) V$', {'color': 'k', 'fontsize': 20}) #b indica
    cor azul (blue)
plt.text(300, 4, '$ b = (101.9 \pm 0.2) s$', {'color': 'k', 'fontsize': 20}) #b indica
    cor azul (blue)
plt.show() #mostra o grafico em uma nova janela
#####
#####FIM#####

```

O código segue a mesma linha do código anterior para ajuste linear. Primeiro importa os dados de um arquivo, constrói a função (modelo) a ser usada no ajuste, define a função a ser ajustada (modelo menos dados), depois realiza o ajuste minimizando essa função e finaliza construindo o gráfico. O gráfico está na figura A.1(a) e os valores mostrados no console estão na figura A.1(b).

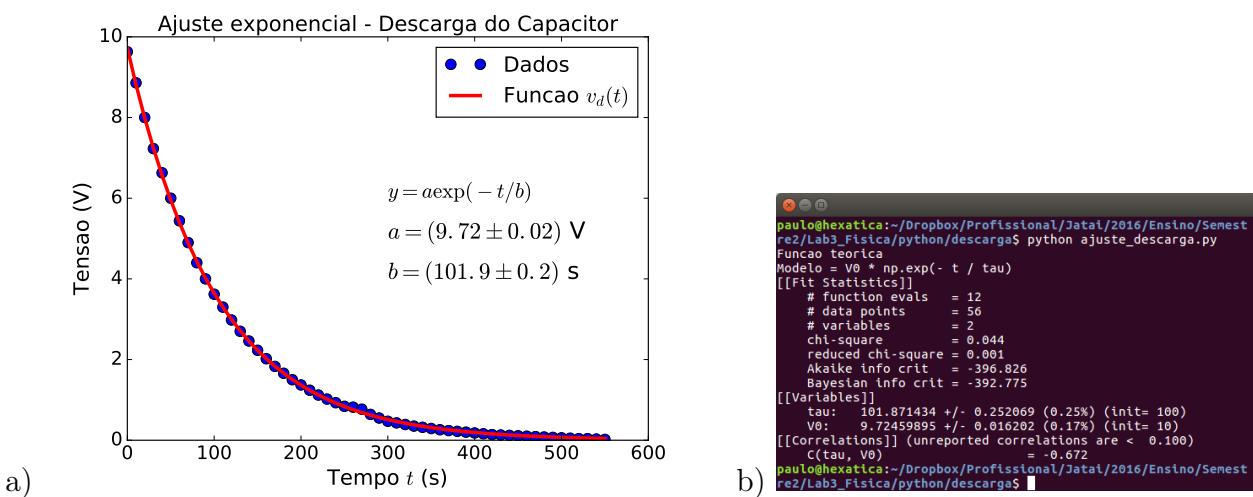


Figura A.1: Resultados do ajuste exponencial feito em Python. (a) Gráfico da tensão pelo tempo na descarga do capacitor com o ajuste exponencial. (b) Resultado mostrado na tela de comandos (em ambiente Linux) com os valores ajustado para os parâmetros.

A.2 Circuitos elétricos

Utilizamos também o L^AT_EX para gerar algumas das figuras de diagramas de circuitos elétricos. Por exemplo o código que gera o circuito para estudo da Lei de Ohm da figura 3.1 é:

```

\begin{SCfigure}[h!]
% \begin{center}
\begin{circuitikz}[american]
\draw[very thick,blue] (0,0) node[anchor=east] {A}
to[V=$V$, i=$I$] (0,4)
to[short] (4,4) node[anchor=west] {B}
to[R=$R$,i=$I$] (4,0) % The resistor
to[short] (0,0);
\end{circuitikz}
\end{SCfigure}

```

```
\caption{Circuito contendo uma fonte V e um resistor R entre os terminais A e B.}
\label{circuito_OhmsLaw}
% \end{center}
\end{SCfigure}
```

Repare que esse código é inserido direto no código principal do texto já no formato de figura definido pelo `\begin{SCfigure}`.

Já para a figura 5.2, referente a um circuito de Ponte de Wheatstone, o código utilizado foi:

```
\documentclass[tikz, border=1mm]{standalone}
\usepackage[europeanresistors,americaninductors,american currents,siunitx]{circuitikz}
\begin{document}

%%% Coordenadas: %%%
% Posicao do circuito (canto superior)
\def\x{6}
\def\y{6}
% Tamanho do circuito contendo o voltmetro
\def\dx{3}
\def\dy{3}

\begin{circuitikz}[american voltages]
% Fonte de tensao
\draw[very thick,blue] (0,0) to [V, l_=$\varepsilon$, i_=$I$] (0, \y) to (\x, \y) node[anchor=west] {A}
% Lado esquerdo da ponte
to [R, l_=$R_1$, -*] (\x-\dx, \y-\dy) node[anchor=east] {B} % Top left resistor
to [R, l_=$R_2$, -*] (\x, \y-2*\dy); % Bottom left resistor
% Lado direito da ponte
\draw[very thick,blue] (\x, \y)
to [R, l_=$R_3$, -*] (\x+\dx, \y-\dy) node[anchor=west] {C} % Top right resistor
to [R, l_=$R_4$, -*] (\x, \y-2*\dy) % Bottom right resistor
node[anchor=west] {D}
% Desenho da conexao da ponte com o lado negativo da fonte
to [R=$R_p$, i=$I$] (1,0) % The resistor
to (\x, 0) to (0,0);

% Desenho do voltmetro
\draw[very thick, red] (\x-\dx, \y-\dy) to [voltmeter] (\x+\dx, \y-\dy);
\end{circuitikz}

\end{document}
```

Repare que o código acima é independente.

Apêndice B

Tutorial Igor

Neste capítulo apresentamos um pequeno tutorial Igor. Trata-se de um programa concorrente ao Origin porém com uma filosofia diferente. O Igor trabalha com o conceito de *waves* que são sequências numéricas. Por exemplo, no experimento de lei de Ohm mede-se a tensão em função da corrente elétrica gerando então duas waves. O Origin e o Excel trabalha com o conceito de tabelas. Fazendo uma comparação cada coluna da tabela é uma *wave*. Assim, para se fazer um gráfico no Igor escolhemos uma *wave* para o eixo *x* e outra para o *y*.

B.1 Gráfico

Como exemplo vamos mostrar como fazer um gráfico simples no Igor. É importante salvar o arquivo do projeto constantemente. No Igor o projeto é chamado de *Experiment*. Quando se inicia o program 3 janelas básicas aparecem, veja figura B.1(a). A janela superior esquerda é a chamada *Data Browser* e estão listadas todas as waves existentes (criadas e importadas). A janela superior direita é uma tabela na qual pode-se listar qualquer *wave*. Digitando números na tabela é uma forma de se definir uma wave. Porém, fechando a janela da tabela não se exclui a *wave*. Já a janela inferior é a *Command Window* na qual se pode efetuar comando usando linha de comando. Esse recurso é útil na definição de *waves* e também é onde aparece os resultados dos ajustes. Abaixo está um pequeno roteiro de como fazer um gráfico simples no Igor.

- 1) Identificação das waves: Caso as waves não estejam já definidas no programa, as mesmas devem ser definidas ou na tela de comandos ou importada.
- 2) Vá em *Windows* e depois em *New Graph*. Uma janela irá se abrir com os espaços para definição de qual *wave* vai em qual eixo. No campo da esquerda escolha a *wave* do eixo *y* e na direita a *wave* do eixo *x*. Clique em *Do It*.
- 3) Clique com o botão direito na área do gráfico mas fora da curva. Isto abre a janela mostrada na figura B.1(b) na qual pode-se customizar as características da curva (espessura, cor, modo, etc...)
- 4) Clique com o botão direito na área do gráfico fora da linha e clique em *Axis Properties*, como mostra a figura B.1(c). Isto abre uma nova janela com uma série de opções para formatação do gráfico, mostrado na figura B.1(d).
- 5) Por exemplo vá na aba *Axis Label*, selecione bottom no campo axis no canto superior esquerdo e digite \Z24eixo x. Veja que no campo logo abaixo (*Label Preview*) aparece a forma final a ser mostrada no gráfico. O comando \Z24 determina o tamanho da fonte.

- 6) Nesta mesma janela você pode e deve implementar suas preferências nas abas *Axis*, *Auto/Man Ticks*, *Ticks & Grids* (para colocar linhas de grade), *Axis label* (mencionada no item anterior) e *Axis Range*.
- 7) Depois de pronto, você de salvar o gráfico em um arquivo para usá-lo ou em uma apresentação ou em um relatório. Clique em *File → Save Graphics*. Escolha o formato desejado. Para usar a figura no Latex escolha pdf. Para usar no Word ou PowerPoint escolha jpg. Clique em *Do It* e escolha o nome e o diretório.

Pronto! Seu gráfico está pronto para ser usado.

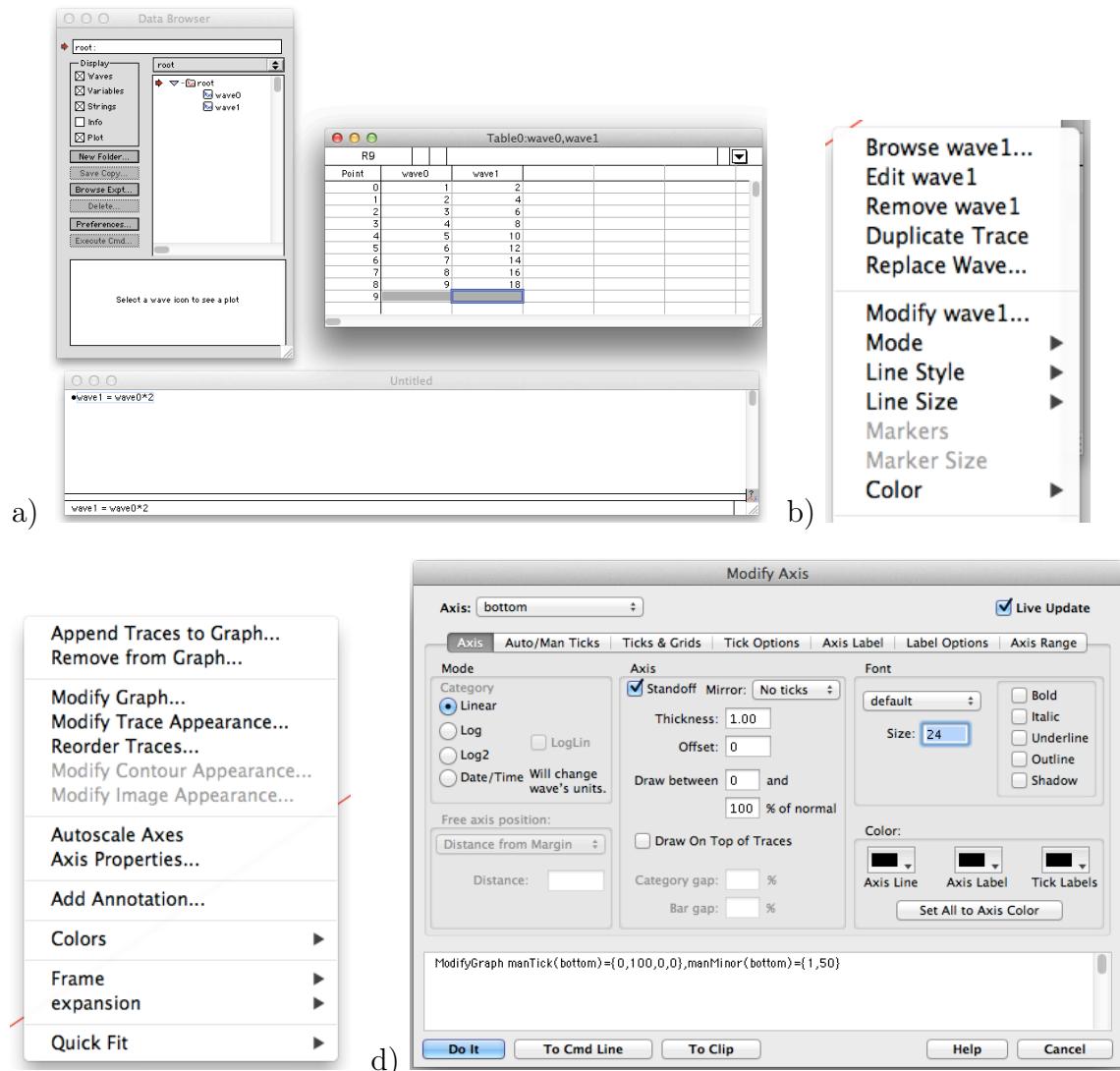


Figura B.1: Capturas de tela no programa Igor. (a) Janelas básicas quando o programa é iniciado. (b) Janela que aparece quando se clica com o botão direito na área do gráfico fora da curva. (c) Janela que aparece quando se clica com o botão direito na área do gráfico em cima da curva. (d) Janela que aparece quando se seleciona Axis Properties.

B.2 Ajuste não linear

Nesta seção é apresentado um tutorial resumido de como fazer o gráfico da tensão v_c pelo tempo t com o ajuste não linear da Eq. 6.6 no Igor. O resultado está na figura B.2. Há várias

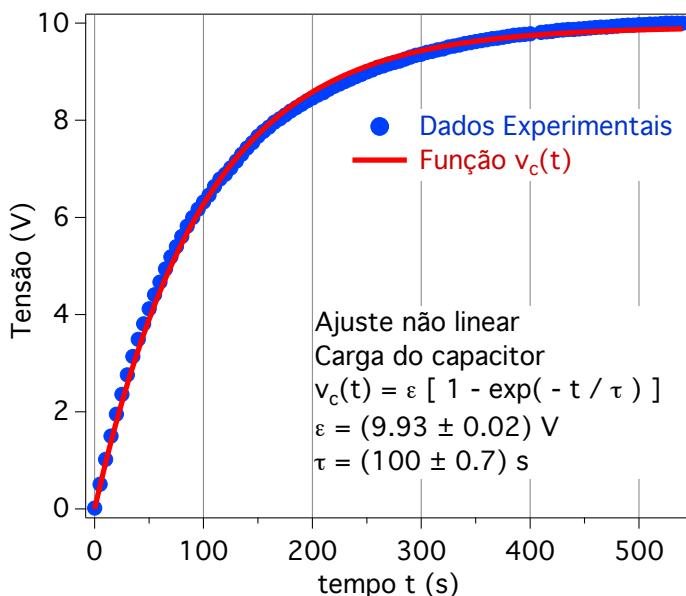


Figura B.2: Gráfico da tensão vs. tempo de carga em um capacitor e ajuste não linear feito no programa Igor.

funções já definidas no Igor porém neste exemplo definimos uma nova função através do código abaixo:

```
Function tensaocargacapacitor(w,x) : FitFunc
Wave w
Variable x

//CurveFitDialog/ These comments were created by the Curve Fitting dialog. Altering them
//CurveFitDialog/ make the function less convenient to work with in the Curve Fitting di
//CurveFitDialog/ Equation:
//CurveFitDialog/ f(x) = w[0]*(1-exp(-x/w[1]))
//CurveFitDialog/ End of Equation
//CurveFitDialog/ Independent Variables 1
//CurveFitDialog/ x
//CurveFitDialog/ Coefficients 9
//CurveFitDialog/ w[0] = epsilon
//CurveFitDialog/ w[1] = tau

return w[0]*(1-exp(-x/w[1]))
End
```

Esse código deve ser digitado no arquivo da *Procedure*, no qual é definido todas as funções externas criadas pelo usuário. Abaixo está um pequeno roteiro para o ajuste não linear.

1. Primeiramente deve-se fazer o gráfico com os dados a serem ajustados.
2. Clique em *Graph* → *Info* (ou aperte Ctrl + I) para habilitar os cursores na janela do gráfico. Veja que há dois cursores que podem ser posicionados na curva. As informações são mostradas na parte de baixo da janela.
3. Com esses cursores você deve selecionar o intervalo dos dados que será ajustado. Eventualmente você pode querer ajustar todo o intervalo, e nesse caso, não é necessário usar os cursores. Para selecionar, posicione o cursor de cima no ponto inicial e o de baixo no ponto final.

4. Clique em *Analysis* → *Adjust*. Abre-se uma janela mostrada na figura [C.1\(a\)](#) na qual você deve escolher a função que será ajustada. Veja que está selecionado a função **tensaocargacapacitor** que foi definida para esse ajuste. No campo abaixo aparece a expressão da função. No lado esquerdo você deve selecionar a wave correspondente ao eixo *y* e *x* dos dados.
5. Ainda na janela da figura [C.1\(a\)](#), clique na aba *Data Options* na qual você clica em *Cursors* para que o programa ajuste apenas o intervalo especificado pelos cursores.
6. Em seguida clique em *Output Options* no qual você pode restringir os parâmetros de ajuste e escolher os valores iniciais dos mesmos. Quando o ajuste é linear ou com uma função simples já definida no Igor não é necessário escolher os valores iniciais. Para funções complicadas um recurso útil é o *Make Graph* o qual faz o gráfico usando os valores definidos para os parâmetros. Isso é bom para saber se os parâmetros que você escolheu são bons ou não. Se forem ruins, o ajuste pode não convergir. Definido os valores clique em *Do It*.
7. Surge uma janela para você confirmar o ajuste e em seguida os resultados aparecem na *Command Windows*, como está mostrado na figura [C.1\(b\)](#). Veja que os parâmetros aparecem como *w_0* e *w_1*, como foram definidos na função.
8. Em seguida você deve copiar os resultados dos parâmetros e colar no gráfico usando uma caixa de texto como mostrado na figura [C.1\(c\)](#).
9. Por último você adicionar uma legenda definindo quem é o ajuste e quem são os dados, como mostrado na figura [C.1\(d\)](#).

Apêndice C

Linearização da eq. (6.10)

Ajuste não linear é todo ajuste que não usa a equação de uma reta. A vantagem do uso de uma reta é sua simplicidade, fazendo com que os cálculos sejam mais precisos. Para outros tipos de funções, havendo o número adequado de pontos, o ajuste pode ser feito sem problema. Quando esse não é o caso, um recurso é linearizar a equação de forma que o ajuste possa ser feito usando uma reta. Neste capítulo apresentamos como fazer uma linearização.

As seguintes propriedades de logaritmo natural \ln serão utilizadas:

$$\ln AB = \ln A + \ln B \quad (\text{C.1})$$

$$\ln e = 1 \quad (\text{C.2})$$

$$\ln e^A = A \ln e = A \quad (\text{C.3})$$

onde A e B são dois números quaisquer diferente de zero.

Tomemos o logaritmo natural em ambos os lados da Eq. (6.10). Usando a propriedade da eq. C.1, temos que:

$$\ln v_d(t) = \ln V_0 + \ln \left[\exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \right] \quad (\text{C.4})$$

Usando agora a eq. C.3

$$\ln v_d(t) = -\frac{t}{\tau} + \ln V_0 \quad (\text{C.5})$$

Fazendo a substituição:

$$y(x) = \ln v_d(t) \quad \therefore \quad A = \frac{1}{\tau} \quad \therefore \quad x = t \quad \therefore \quad B = \ln V_0 \quad (\text{C.6})$$

a eq. C.5 fica:

$$y(x) = -Ax + B \quad (\text{C.7})$$

Agora, basta graficar $y(x)$ vs x , achar a melhor reta e encontrar os coeficientes A e B . Assim, podemos encontrar os valores de τ e V_0 , através das eqs. C.6:

$$\tau = \frac{1}{A} \quad (\text{C.8})$$

$$V_0 = e^B \quad (\text{C.9})$$

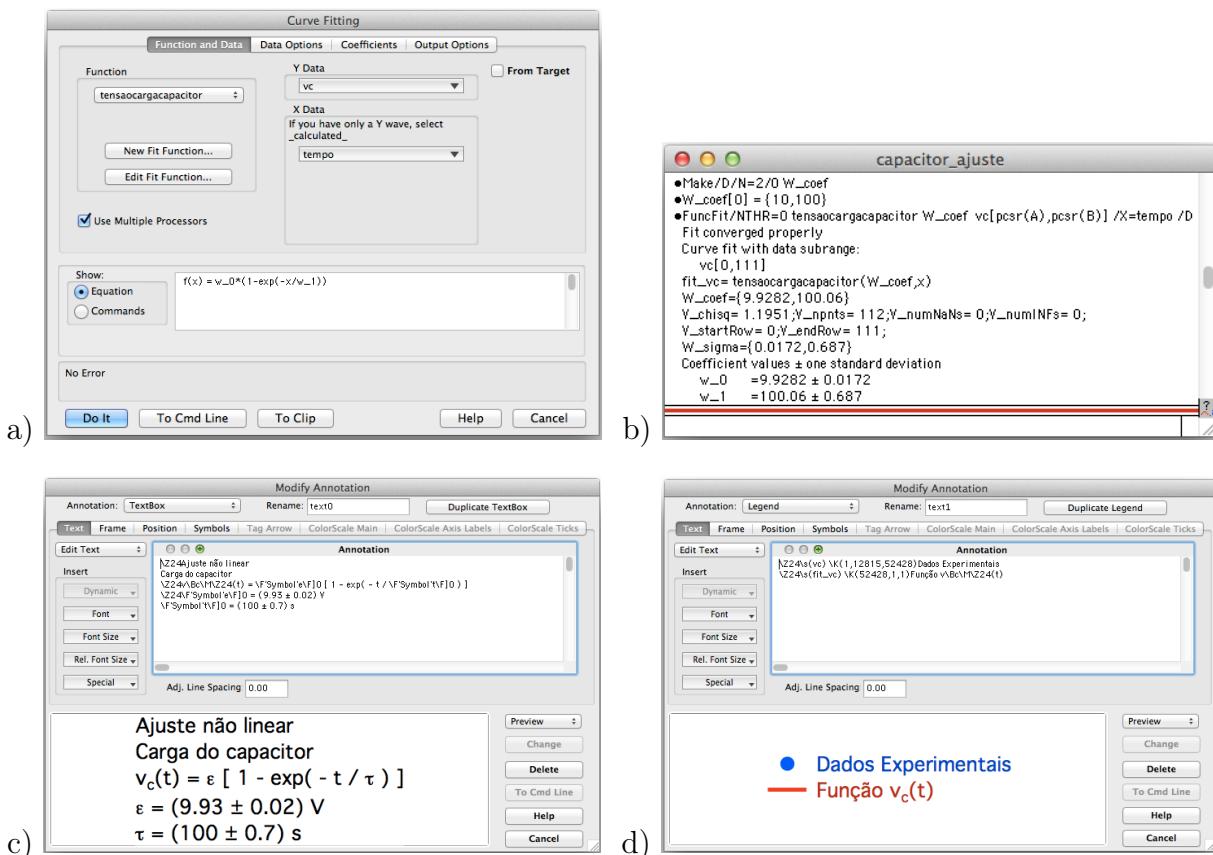


Figura C.1: Capturas de tela no programa Igor durante ajuste não linear de uma função exponencial. (a) Janela de definição da função para ser ajustada. (b) Resultado do ajuste mostrado na tela de comandos. Os valores dos parâmetros são as duas últimas linhas. (c) Janela de definição da caixa de texto com os valores dos parâmetros. (d) Definição da legenda.

Bibliografia

- [1] Hugh D. Young e Roger A. Freedman, Sears e Zemansky, University Physics, University Physics, 13a. edition, Adisson Wesley, 2012.
- [2] Hugh D. Young e Roger A. Freedman, Sears e Zemansky Física III: Eletromagnetismo, 12a. edição, Adisson Wesley, São Paulo, 2004.
- [3] David Halliday, Robert Resnick e Jearl Walker, Fundamentos de Física - Vol. 3, 8a. Edição, LTC, Rio de Janeiro, 2006.
- [4] TIPLER, P.A. e MOSCA, G. Física para Cientistas e Engenheiros. Vol.2 - Eletricidade, Magnetismo e Ótica. LTC. 2004.
- [5] <http://phet.colorado.edu/en/simulation/ohms-law>
- [6] P. F. Gomes, H. A. Fernandes, J. L. González-Arango, Brazilian Journal Physics (2015) 45:615?620.
- [7] Apostila de Laboratório de Física 3, Instituto de Física Gleb Wataghin, Unicamp, Campinas.
- [8] Sebastian C. Kapfer and Werner Krauth, Physical Review Letters **114**, 035702 (2015).
- [9] The XYZ's of Oscilloscopes, Tektronix, Inc., Beaverton, OR (1992).
- [10] David Mendez Soares, OSCILOSCÓPIO DE RAIOS CATÓDICOS.
- [11] D. Pengra, The Oscilloscope and the Function Generator, (2007).
- [12] Thomas Rylander, Pär Ingelström, Anders Bondeson, *Computation Electromagnetics*, Second Edition, Springer (2013).