Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Departamento de Ciências Naturais - DCN

Física Experimental III

Eletromagnetismo

Teoria, Roteiro e Folha de Dados

Licenciatura em Física

Apresentação

O laboratório fornece ao estudante uma oportunidade única de validar as teorias físicas de uma maneira quantitativa num experimento real. A experiência no laboratório ensina ao estudante as limitações inerentes à aplicação das teorias físicas a situações físicas reais e, introduz várias maneiras de minimizar esta incerteza experimental. O propósito dos laboratórios de Física é tanto o de demonstrar algum princípio físico geral, quanto permitir ao estudante aprender e apreciar a realização de uma medida experimental cuidadosa.

Esta apostila, desenvolvida por professores de Física da UFES - Campus São Mateus, contempla um conjunto de experimentos ligados às disciplinas de eletromagnetismo e ótica. Esta apostila está dividida em cinco experimentos de eletricidade/ magnetismo e três experimentos de ótica. Cada experimento contém um resumo da teoria, o roteiro do experimento e tudo que precisa ser incluso no relatório, pelos estudantes. Espera-se que com esta disciplina, o estudante tenha a capacidade de desenvolver o espírito científico através da prática, aprimorando sua formação acadêmica e profissional.

Professores Colaboradores:

André Luíz Alves
Eduardo Perini Muniz
Paulo Sérgio Moscon

SUMÁRIO

Apresentação 2

Desenvolvimento do Curso, Provas Parciais e Testes 4

Critérios de Avaliação 4

Cronograma. 5

Relatórios 6

Partes de um relatório 6

Apresentação dos resultados 7

Recomendações sobre os cálculos numéricos 7

1. Roteiros da Primeira Sequência 9

Experimento 1: Cuba Eletrostática: Campos e Potenciais Elétricos 9

Experimento 2: Resistores, Voltagem, Corrente e Lei de Ohm 15

Experimento 3: Resistência Elétrica em Função da Temperatura 21

Experimento 4: Capacitores e Circuitos RC 24

2. Roteiros da Segunda sequência 30

Experimento 5: Osciloscópio e Circuitos Retificadores 30

Experimento 6: Lei de Faraday e Transformadores 39

Experimento 7: Campo Magnético da Terra 45

Experimento 8: Circuito RLC e Ressonância 48

Especificações Elétricas dos Multímetros 55

Bibliografia 63

DESENVOLVIMENTO DO CURSO, PROVAS PARCIAIS E TESTES

As três primeiras aulas estão reservadas para um estudo sobre a medição de grandezas físicas relacionadas ao eletromagnetismo. Serão abordados temas como o uso de multímetros, fontes de tensão AC e DC, gerador de sinais, osciloscópio e placa protoboard. Será dada uma explicação sobre as escalas do multímetro, uso do amperímetro e voltímetro, teste de diodos e continuidade, medição de capacitância e temperatura. No gerador de funções será explicado como ajustar a amplitude da tensão, como escolher uma forma de onda e como ajustar a frequência. No osciloscópio serão abordados temas como calibração, ajuste de escalas, leituras de valores médios e quadráticos médios, tensão dentre outros. Fica a critério do professor, realizar uma revisão de assuntos tais como teoria de erros e estudo de gráficos em papel milimetrado e/ou monolog.

No restante das aulas serão realizadas oito experiências, divididas em duas séries de quatro experimentos, havendo a possibilidade de uma experiência extra.

Os alunos serão distribuídos em quatro grupos, sendo que cada grupo desenvolverá uma experiência em cada aula, apresentando o relatório na aula seguinte.

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

As avaliações de relatórios, provas e testes ficarão a critério de cada professor. Uma sugestão é usar o seguinte critério:

$$M_{parcial} = \frac{3M_{provas} + M_{testes} + M_{relatorios}}{5}$$

M_{provas} = Média aritmética das notas obtidas nas 2 provas parciais

M_{testes} = Média aritmética das notas obtidas nos 2 testes

$M_{relatórios}$ = Média aritmética das notas obtidas nos relatórios.

Cronograma

Semana 1:
Semana 2:
Semana 3:

Nas três primeiras semanas haverá uma apresentação do curso, onde o professor irá abordar temas como o uso de multímetros, montagem de circuitos elétricos e alguns componentes eletrônicos como o resistor, capacitor, indutor e diodos. Outros temas como revisão de teoria de erros e construção de gráficos em papel milimetrado e o uso de programas computacionais, também poderão ser abordados.

Semana 4: Experimentos;

Semana 5: Experimentos;

Semana 6: Experimentos;

Semana 7: Experimentos;

Semana 8: Semana de Reposição de Experimentos;

Semana 9: Semana de dúvidas;

Semana 10: Primeira prova;

Semana 11: Experimentos;

Semana 12: Experimentos;

Semana 13: Experimentos;

Semana 14: Experimentos;

Semana 15: Semana de Reposição de Experimentos;

Semana 16: Semana de dúvidas;

Semana 17: Segunda prova;

Semana 18: Prova final.

Relatórios

De uma forma geral, em ciência os resultados de um dado estudo são registrados e divulgados na forma de relatórios científicos. Entende-se por relatório científico um documento que segue um padrão previamente definido e redigido de forma que o leitor, a partir das indicações do texto, possa realizar as seguintes tarefas:

1) Reproduzir as experiências e obter os resultados descritos no trabalho, com igual ou menor número de erros.

2) Repetir as observações e formar opinião sobre as conclusões do autor.

3) Verificar a exatidão das análises, induções e deduções, nas quais estiverem baseadas as conclusões do autor, usando como fonte as informações dadas no relatório.

Partes de um relatório

1. Capa: Deve incluir os dados do local onde a experiência foi realizada (Universidade, Instituto e Departamento), disciplina, professor, equipe envolvida, data e título da experiência.

2. Introdução: Esta parte deve incluir um as equações mais relevantes (devidamente numeradas), as previsões do modelo teórico (de preferência em forma de tabela ou lista) e todos os símbolos utilizados para representar as grandezas físicas envolvidas.

A introdução não deve possuir mais que duas páginas em texto com fonte 10 ou três páginas manuscritas.

3. Dados experimentais: Deve apresentar os dados obtidos (preferencialmente em forma de tabelas), ou seja, todas as grandezas físicas medidas, incluindo suas unidades. Dados considerados anômalos devem ser identificados com uma anotação. **As incertezas de cada medida devem estar indicadas.** As tabelas devem ser numeradas em sequência e conter uma legenda descritiva.

4. Cálculos: Todos os cálculos devem ser apresentados, incluindo as etapas intermediárias (cálculo de erros, métodos de análise gráfica, etc.), para permitir a conferência e recálculo pelo mesmo caminho. Os resultados experimentais devem ser apresentados com os algarismos significativos apropriados.

Em caso de repetição de procedimentos idênticos de cálculo, como, por exemplo, a multiplicação de 10 valores da posição de um corpo por uma constante, é permitido que apenas o primeiro cálculo seja detalhado no relatório, mas os resultados de todos eles devem ser apresentados sob a forma de tabela.

Aliás, os valores de cada grandeza obtida por meio dos cálculos devem ser apresentados de forma organizada (preferencialmente sob a forma de tabelas) no fim desta seção.

Caso a tabela com os resultados dos cálculos claramente apresentados não seja incluída, o professor tem a opção de cortar todos os pontos referentes a esta seção do relatório.

Quando houver gráficos, com cálculo de coeficiente angular, estes devem ser incluídos nesta seção. O cálculo do coeficiente deve ser feito nas costas da folha de gráfico.

5. Análise de dados: Esta é a parte mais importante do relatório, na qual o aluno verifica **quantitativamente** se o objetivo inicialmente proposto foi atingido. As previsões teóricas mostradas na introdução devem ser confrontadas com os resultados experimentais e a diferença numérica entre os valores esperados e obtidos deve ser discutida. Sempre que possível, a comparação deve ser feita sob a forma de tabelas ou gráficos que devem ser comentados no texto. Também é razoável comentar aqui valores de coeficientes angulares obtidos na seção anterior. O objetivo é comprovar ou não as hipóteses feitas na teoria.

6. Conclusão: A conclusão apresenta um resumo dos resultados mais significativos da experiência e sintetiza os resultados que conduziram à comprovação ou rejeição da hipótese de estudo. Aqui deve ser explicitado se os objetivos foram atingidos, utilizando preferencialmente critérios quantitativos. **Bibliografia:** São as referências bibliográficas que serviram de embasamento teórico.

Apresentação dos resultados

Os resultados devem ser apresentados, sempre que possível, em forma de tabelas, destacando dentro de "retângulos" os resultados isolados.

Recomendações sobre os cálculos numéricos

Deve-se evitar que sucessivos arredondamentos e/ou truncamentos conduzam a valores incorretos para as incertezas resultantes dos cálculos efetuados. Assim, recomenda-se:

- ✓ Efetuar os cálculos intermediários para a propagação das incertezas com, no mínimo, **TRÊS** algarismos "significativos" nas incertezas.

- ✓ Ao avaliar graficamente o coeficiente angular de uma reta e sua incerteza, considere esta avaliação como um cálculo intermediário.
- ✓ Os resultados finais devem ser apresentados com **UM** só algarismo significativo na incerteza.

IMPORTANTE:

Todas as medidas deverão ser anotadas na **FOLHA DE DADOS EXPERIMENTAIS** e uma cópia deverá ser entregue ao professor, impressa, ou por email, ao final do experimento. A folha de dados encontra-se no final do roteiro de um dado experimento.

1. Roteiros da Primeira Sequência

Experimento 1: Cuba Eletrostática: Campos e Potenciais Elétricos

1.1 Objetivos

- ✓ Fundamentar o conceito de carga elétrica.
- ✓ Determinar algumas configurações de campos elétricos.
- ✓ Obter linhas equipotenciais.

1.2 Materiais Necessários

- ✓ Uma fonte de tensão DC com conectores do tipo jacaré.
- ✓ Um multímetro
- ✓ Uma cuba de vidro transparente.
- ✓ Dois eletrodos retilíneos (duas hastes condutoras).
- ✓ Um eletrodo circular e uma haste fina para posicionamento vertical.
- ✓ Água não destilada (água de torneira).
- ✓ Papel milimetrado.

1.3 Fundamentação Teórica

Obs: Alguns trechos do texto abaixo foi adaptado do curso de física experimental da UFSC.

Uma propriedade do campo eletrostático é ser um campo conservativo. A força elétrica ($\vec{F}$) é simplesmente o campo ($\vec{E}$) multiplicado por uma constante (a carga de prova) e também é conservativa. É conhecido da mecânica que as forças conservativas são muito mais simples de se analisar, porque o trabalho (W) que elas realizam depende apenas dos pontos inicial e final, e não da trajetória [eq (1)]. Isso permite definir uma função escalar (U), chamada energia potencial, de tal forma que, se apenas a força conservativa atuar, a soma da energia cinética com a energia potencial permanece constante (essa constante é denominada energia total).

$$W = -\Delta U = -\int_a^b \vec{F}.d\vec{r} = -q_o \int_a^b \vec{E}.d\vec{r} \tag{1}$$

Desta forma, a energia eletrostática U, é definida para um certo referencial conveniente. Por exemplo, U = 0 para um ponto b distante (b → infinito).

Da mesma forma que a força é proporcional à carga elétrica, a energia potencial também é. Podemos então, definir a energia potencial por unidade de carga, que é chamado de potencial elétrico:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q_o} = -\int_a^b \vec{E}.d\vec{r} \tag{2}$$

A equação (2) dá o potencial se o campo for conhecido. No entanto, é mais fácil medir o potencial, porque esse é uma função escalar, enquanto o campo é vetorial; ou seja, para determinar o potencial, precisamos apenas de um número, enquanto que para determinar o campo precisamos saber

a intensidade, a direção e o sentido. Para calcular o campo supondo conhecido o potencial, precisamos da relação inversa da eq. 2, que é:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V \tag{3}$$

Uma superfície equipotencial é aquela sobre a qual o potencial é constante: a diferença de potencial entre dois pontos quaisquer da superfície é nula. Portanto, sobre uma equipotencial:

$$-\int_a^b \vec{E}.d\vec{r} = 0 \tag{4}$$

Uma condição que satisfaz a equação (4) é que o campo elétrico seja perpendicular a um deslocamento $d\vec{r}$ sobre uma equipotencial. Definindo $d\vec{r} = dr\hat{r}$, onde $\hat{r}$ é um vetor unitário, temos para o campo elétrico médio entre duas equipotenciais:

$$\vec{E} = -\frac{\Delta V}{\Delta r}\hat{r} \tag{5}$$

As medidas de potenciais e campos eletrostáticos são experimentos difíceis de serem realizados em laboratório convencionais de ensino. Isto ocorre porque o meio no qual o campo é gerado é altamente isolante, e a resistência equivalente entre dois pontos é grande, comparável ou até maior do que a resistência interna dos voltímetros comerciais, de modo que a leitura seria totalmente errônea. Tais medidas exigiriam instrumentos de altíssima resistência interna, como voltímetros eletrostáticos ou eletrômetros e condições ambientais especiais, tais como baixo teor de umidade, atmosfera inerte ou alto vácuo.

Contudo, podemos contornar esta situação fazendo o mapeamento em um meio com baixa resistividade como, por exemplo, uma solução aquosa não destilada, ou melhor, ainda, uma solução aquosa salina. Estas soluções possuem cargas que podem se deslocar quando sujeitas à ação de um campo elétrico, que surge quando conectamos uma fonte de tensão a eletrodos metálicos mergulhados no eletrólito. A distribuição de cargas nas superfícies dos eletrodos dá origem a um campo eletrostático no meio eletrolítico. Dessa forma, o potencial V(P) nos diferentes pontos (P's) do eletrólito pode ser mapeado e possibilita o estudo do campo eletrostático bidimensional correspondente. Esse método é muito usado na prática para determinar as figuras de potencial de objetos de diferentes formatos, e pode inclusive ser usado para estudar um campo elétrico tridimensional, mergulhando o objeto totalmente no meio eletrolítico.

Como será, por exemplo, o campo elétrico se colocarmos a ponta de uma fio metálico próximo a um eletrodo retilíneo e uniformemente carregado? A Figura 1 é uma ilustração desta configuração. Observe que as superfícies equipotenciais formam uma figura "parecida com uma elipse". As superfícies equipotenciais são mais 'densas' na região entre os eletrodos (campo mais intenso) e, menos densa (campos menores) na região fora dos eletrodos. Ligando estas superfícies por linhas perpendiculares às equipotenciais, é possível obter a configuração das linhas de campo elétrico. Utilizando a equação (5), é possível calcular o campo elétrico médio entre duas equipotenciais. A direção do campo é sempre no sentido do potencial decrescente (sinal negativo na equação 5).

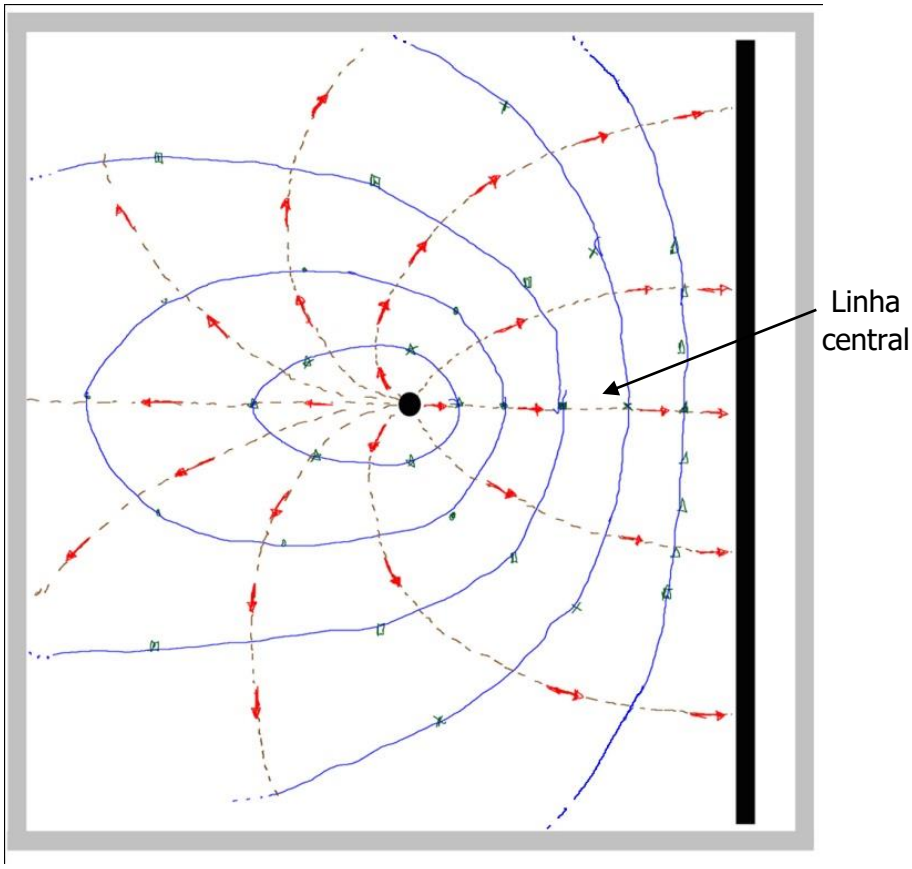


Figura 1 – Configuração de superfícies equipotenciais (Linhas em azul) e linhas de campo elétrico (setas sobre as linhas tracejadas), para um eletrodo pontual e uma distribuição retilínea e uniforme de cargas.

1.4 Procedimentos Experimentais

- DETALHES IMPORTANTES:

Garanta que a água utilizada não seja destilada, caso contrário nenhum efeito será observado.

Espere pelo menos alguns minutos para haver uma estabilidade de cargas no interior da cuba.

Ao medir um dado potencial, não demore muito tempo, pois a ponta do voltímetro influencia no experimento, distorcendo as linhas de campo elétrico.

Parte 1 - Campo uniforme

1. Conecte os eletrodos retilíneos em paralelo na cuba, afastados de 5 cm, conforme a Figura 2.
2. Posicione uma folha de papel milimetrado abaixo da cuba, tal que os eletrodos estejam paralelos às linhas demarcadas.
3. Conecte os terminais dos eletrodos aos terminais da fonte de tensão.
4. Desenhe em uma segunda folha de papel milimetrado um esquema em escala 1:1 da montagem, com atenção na posição relativa, comprimento e espessura dos eletrodos.
5. Coloque água (não destilada) na cuba até fechar contato entre os eletrodos.

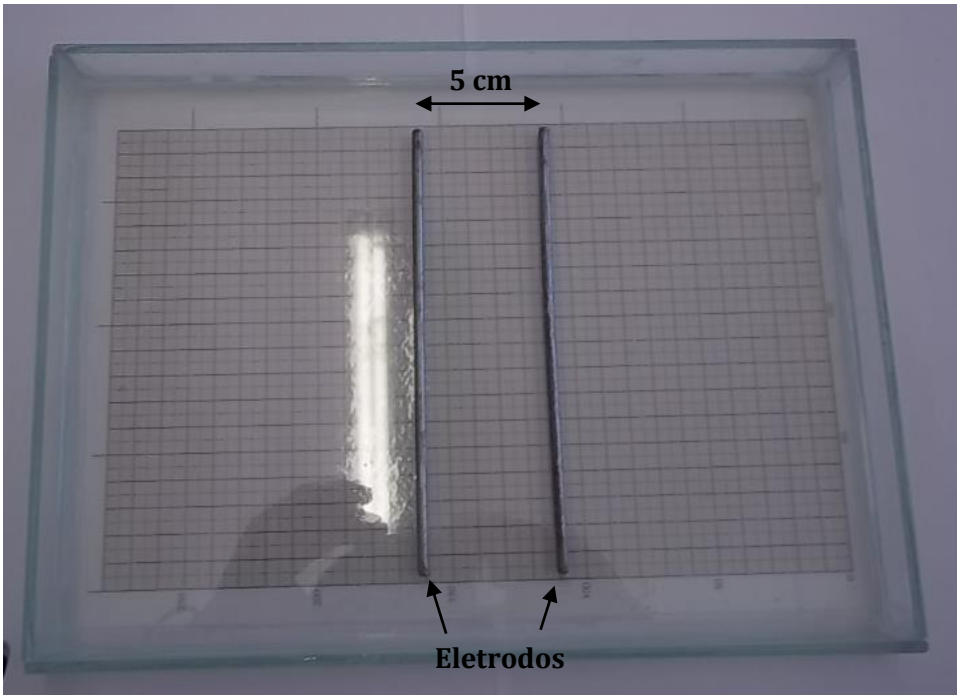


Figura 2 – Montagem experimental para dois eletrodos retilíneos.

6. Conecte a ponta de prova do multímetro indicada por "COM" em contato com o eletrodo que estiver ligado ao negativo da fonte. Suas medidas de diferença de potencial (em V) serão em relação ao potencial deste ponto.
7. Ligue a fonte de tensão na escala de 3 V a 9 V (Obs: Estes valores são apenas o potencial nominal; a voltagem a ser considerada deve ser medida).
8. Ligue o voltímetro e meça a ddp entre os terminais, registrando este valor.
9. O primeiro ponto de medida (ponto de referência potencial) deve estar sobre uma reta perpendicular ao centro da haste negativa, distanciado de 1cm desta. O valor obtido para este potencial deve ser anotado. Este ponto dará origem a primeira superfície equipotencial; para isto os demais pontos devem ser encontrados de forma a terem o mesmo potencial do primeiro, e devem estar a 1cm de distância. Cada equipotencial deverá conter no mínimo 8 pontos. As demais superfícies equipotenciais serão construídas de forma análoga, sempre com o ponto referencial situado no centro da haste distanciado um centímetro a mais que o ponto referencial anterior até chegar-se à haste positiva.
10. Os pontos experimentais devem ser anotados em outro papel milimetrado, a fim de construir as superfícies equipotenciais.

Parte 2 - Medida de potencial com simetria circular

1. Utilize agora dois eletrodos, sendo um pontual (em forma de ***L***, que fará o papel de uma carga pontual) e outro em forma de círculo. O eletrodo pontual (em forma de L) deve estar no centro do eletrodo circular. Observe a montagem na Figura 3.

2. Mapeie as superfícies equipotenciais desta configuração. Para tal, estas equipotenciais devem estar espaçadas de 1 cm uma da outra para duas superfícies equipotenciais próximas a cada eletrodo, no papel milimetrado. Além disso, cada superfície equipotencial deve conter no mínimo 10 pontos equidistantes.

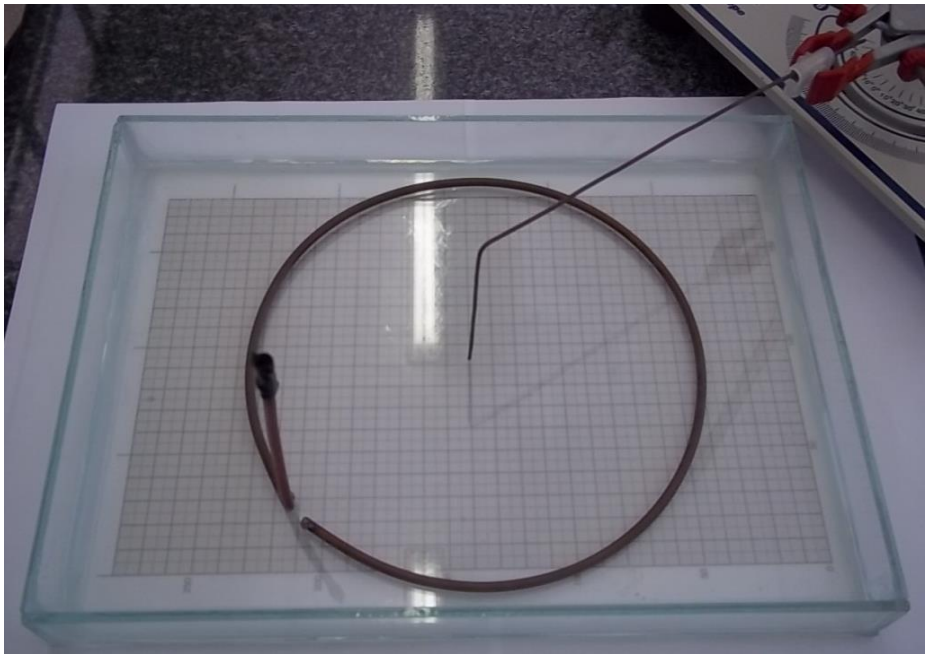


Figura 3 – Montagem experimental para um eletrodo pontual (em forma de L).

Parte 3 - Medida do potencial entre um eletrodo "pontual" e uma distribuição retilínea de cargas

1. Utilize agora os dois eletrodos em forma de ***L*** de tal forma que um deles toque com uma das pontas sobre a cuba e o outro toque com a extensão maior do corpo sobre a cuba. Mantenha 5 cm de distância entre os eletrodos. Observe a Figura 4.

2.Mapeie as curvas equipotenciais desta configuração. Na linha central da configuração, entre os eletrodos, as equipotenciais devem estar separadas de 1 cm uma das outras (Figura 4). No mapeamento das equipotenciais, observa-se que estas começam a se separar, sendo que a distância de só é permitida na linha central dos eletrodos.

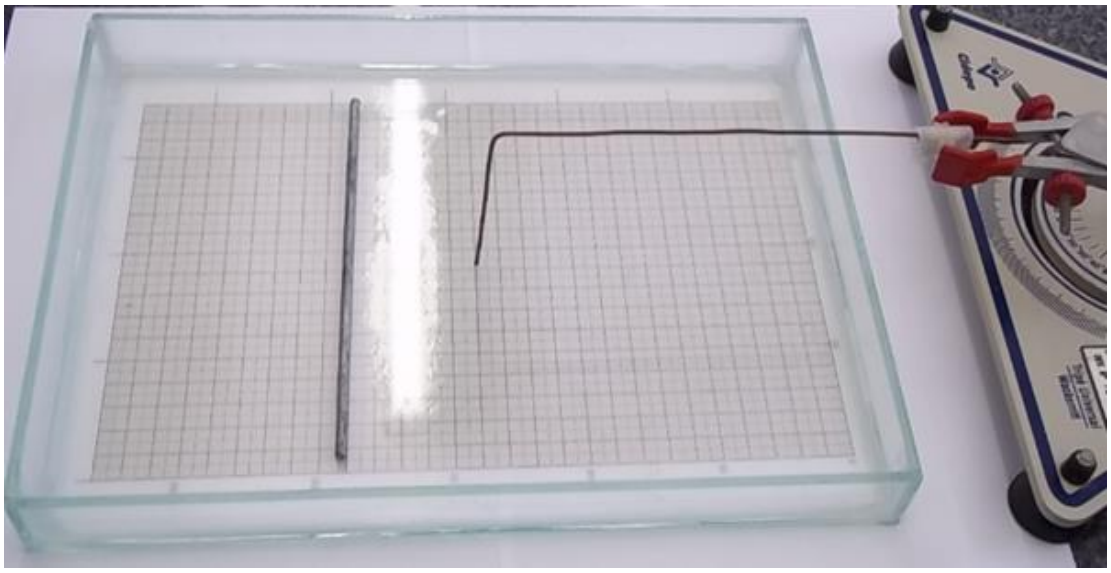


Figura 4 – Montagem experimental para um eletrodo pontual (em forma de L).

1.5 O que Incluir no Relatório do Experimento

Execute os procedimentos abaixo para cada configuração dos eletrodos:

- Ligue por uma curva média, no papel milimetrado externo, os pontos com mesmo potencial.

- Desenhe um conjunto de linhas ortogonais (tracejadas para diferenciar das equipotenciais) às equipotenciais, no qual constituirão as linhas de campo elétrico. Qual deve ser o sentido do campo elétrico sobre estas linhas? Especifique-as por setas.

- Para a ***parte1*** (eletrodos retilíneos) do experimento, determine, utilizando a equação 5, o valor médio do campo ao longo do eixo central escolhido que une os eletrodos, em três pontos, sendo dois próximos de cada eletrodo e o outro no centro. Determine, também, o valor do campo elétrico em pontos (pelo menos 2) fora do eixo. Obviamente, estes procedimentos fornecem apenas um valor aproximado para o campo, afinal, não podemos fazer, na prática, o que é feito no cálculo diferencial, ou seja, fazer ΔS "tender a zero".

- Repita os mesmos cálculos do item anterios para a ***parte 2*** (simetria circular), porém ao invés de um eixo central, escolha um “raio” para os cálculos do campo médio, sendo dois próximos de cada eletrodo e o outro no centro.

- Repita os mesmos cálculos para a ***parte 3*** (carga pontual e eletrodo retilíneo). O eixo central deverá ser aquele que passa pelo centro do eletrodo retilíneo.

1.6 Questões a Serem Discutidas no Relatório do Experimento

- Por sua análise, o campo elétrico pode ser considerado uniforme em todas as configurações estudadas? Explique tendo como base as figuras obtidas do campo elétrico e dos valores calculados de campo.

- Explique porque as linhas de campo são ortogonais às superfícies equipotenciais.

Experimento 2: Resistores, Voltagem, Corrente e Lei de Ohm

2.1 Objetivos

- ✓ Fundamentar os conceitos de resistência e resistor.
- ✓ Conhecer o código de cores, utilizado para especificar resistências e tolerâncias.
- ✓ Esclarecer o real sentido da Lei de Ohm.
- ✓ Distinguir um resistor ôhmico dos não ôhmicos.
- ✓ Verificar modelos para a variação da resistência com a temperatura.
- ✓ Associar resistores em série ou paralelo verificando as relações com resistência equivalente de um circuito.

2.2 Materiais Necessários

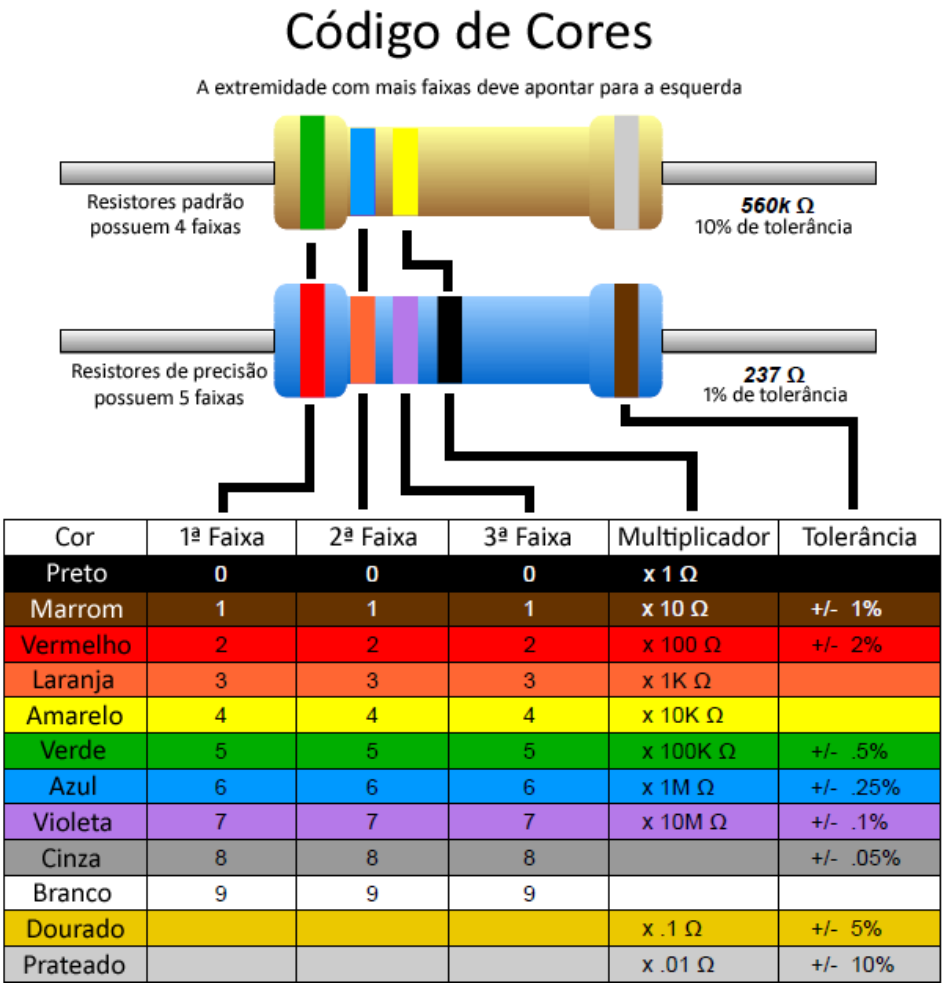
- ✓ Placa contendo resistores e um diodo.
- ✓ Uma bobina de cobre e um diodo.
- ✓ Conectores banana-banana e banana-jacaré.
- ✓ Fonte de corrente contínua ajustável.
- ✓ Multímetro digital.
- ✓ Termômetro.

2.3 Fundamentação Teórica

A resistência elétrica de um meio material é a grandeza que expressa o grau de interferência deste meio material no transporte da carga elétrica, e em uma abordagem mais sofisticada ela expressa o grau de "não aproveitamento" da energia fornecida à carga para se mover (e assim pode ser identificada como uma fonte de dissipação da energia elétrica fornecida). No *SI* a unidade de medida da resistência elétrica é o *ohm*, representado pela letra grega Ω.

A tecnologia moderna faz uso da resistência elétrica (doravante denominada simplesmente "resistência") desde o projeto de geradores a linhas de transmissão e "circuitos" que são utilizados em equipamentos elétricos. Resistores comerciais podem ser classificados em *fixos* ou *variáveis*. Resistores fixos podem ser fabricados por diferentes métodos, resultando nos seguintes tipos principais: Resistor de *Fio* (fio metálico fino enrolado em torno de cilindro cerâmico) ou de *Filme* (que consiste em uma película de carbono ou uma película metálica enrolada em torno de cilindro de porcelana).

Os fabricantes fornecem valores nominais dos resistores comerciais, bem como sua a tolerância ("incerteza"), advinda do método de fabricação dos mesmos. No caso de resistores de filme, emprega-se um conjunto de anéis coloridos que circundam o resistor, empregando um código de cores, conforme a Figura 1.



Cor	1ª Faixa	2ª Faixa	3ª Faixa	Multiplicador	Tolerância
Preto	0	0	0	x 1 Ω	
Marrom	1	1	1	x 10 Ω	+/- 1%
Vermelho	2	2	2	x 100 Ω	+/- 2%
Laranja	3	3	3	x 1K Ω	
Amarelo	4	4	4	x 10K Ω	
Verde	5	5	5	x 100K Ω	+/- .5%
Azul	6	6	6	x 1M Ω	+/- .25%
Violeta	7	7	7	x 10M Ω	+/- .1%
Cinza	8	8	8		+/- .05%
Branco	9	9	9		
Dourado				x .1 Ω	+/- 5%
Prateado				x .01 Ω	+/- 10%

Figura 1 - Códigos de cores para resistores.

A resistência de um condutor e/ou resistor, entre dois pontos quaisquer, pode ser obtida aplicando a diferença de potencial (V) entre estes dois pontos e medindo a corrente (i) resultante. A resistência (R) é dada como:

$$R = \frac{V}{i}$$

"Um dispositivo obedece a Lei de Ohm quando a sua resistência entre dois pontos quaisquer for independente do módulo e da polaridade da diferença de potencial aplicada entre aqueles pontos".

Para realizarmos medidas diretas da resistência, podemos usar o ohmímetro, que pode ser fornecido como parte de um instrumento versátil: o multímetro ("multiteste"). No uso deste

equipamento, é importante utilizarmos sua incerteza de medida (lendo no manual fornecido pelo fabricante ou registrado no próprio aparelho). Usualmente, a incerteza é expressa em porcentagem do valor lido, que pode variar de acordo com a faixa de medida selecionada no aparelho. Segue abaixo, um exemplo para multímetros digitais:

Para o caso do multímetro, existem duas fontes de erro possíveis:

a) O último algarismo (z) pode flutuar em torno do valor mais estável e neste caso a incerteza devido à flutuação é calculada, estimando-se a flutuação média em torno do valor mais provável do último algarismo, da seguinte forma:

$$\Delta x_f = (z_{máx} - Z_{mín})/2$$

b) O limite de erro instrumental (Δx_i) fornecido pelo fabricante que possui a forma:

$$\Delta x_i = a\%\ da\ leitura\ + N\ dígitos\ no\ último\ algarismo$$

A incerteza absoluta resultante das duas contribuições é:

$$\Delta x = \Delta x_f - \Delta x_i$$

Como exemplo, se uma leitura mais estável no amperímetro foi i = 33,04 mA e flutuou entre 33,02 e 33,05 mA na escala de 200 mA, que por sua vez, possui uma incerteza de 0,05% da leitura + 2 dígitos, então:

$$\Delta x_f = (0,05 - 0,02)/2 = 0,015$$
$$\Delta x_i = 0,0005 \cdot 33,03 + 0,02 = 0.036515$$
$$\Delta x = 0,015 + 0.036515 = 0,051515 = 0,05$$

O valor da medida é então: *i = (33,04 ± 0,05)mA.*

2.4 Procedimentos Experimentais

Parte 1 – Leitura e Associação de Resistores

1. Dispõe-se para este experimento, de cinco resistores e um diodo. Escolha três resistores e, realize a leitura nominal da resistência (R) de cada um deles e da incerteza (ΔR). Represente os valores como $R_N \pm \Delta R_N$. Anote os valores obtidos na Tabela 1.

2. Utilize o ohmímetro do multímetro para medir o valor da resistência e da incerteza. Sugestão: denomine este valor de "valor medido", e represente-o por $R_M \pm \Delta R_M$. Anote os valores obtidos na Tabela 1.

3. Denomine agora, estes resistores por R1, R2 e R3. Associe R1 e R3, R2 e R3 e R1, R2 e R3 em série, meça e registre a Resistência Equivalente (R_{eqs}) de cada associação na Tabela 2 (lembre-se da incerteza).

4. Associe os mesmos resistores em paralelo. Meça e registre, na Tabela 3, a Resistência Equivalente (R_{eqp}) de cada associação.

5. Coloque o seletor do multímetro no teste de continuidade de diodos. Meça a continuidade do diodo nos dois sentidos. Se houver continuidade, aparecerá na tela do multímetro, um valor em mV, que representa a tensão de barreira. Esta é a tensão necessária para que o diodo possa conduzir. Caso não haja continuidade, aparecerá o número 1, indicando circuito aberto. Anote suas conclusões na folha de dados experimentais (*teste de continuidade*).

Parte 2 – Tensão em Função da Corrente

1. Selecione um resistor da placa de associação.

2. Monte um circuito, como o da Figura 2, utilizando a fonte de tensão contínua, um resistor (R), um voltímetro (V) e um Amperímetro (A).

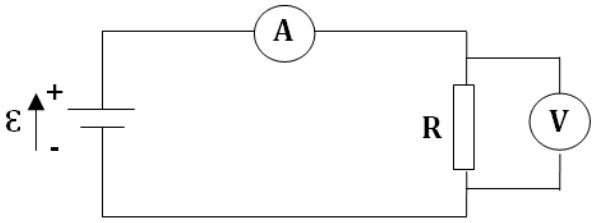


Figura 2 – Representação simbólica de um circuito com resistor, amperímetro e voltímetro.

3. Aplique diferentes tensões sobre o resistor selecionado, medindo e registrando estes valores e os da concomitante corrente elétrica. Escolha valores positivos e negativos de tensão. Organize seus resultados e os apresente na Tabela 4.

4. Repita o procedimento 3 para o diodo e anote os dados na Tabela 4.

2.5 O que Incluir no Relatório do Experimento

Parte 1 – Leitura e Associação de Resistores

- Comparação dos resultados de $R_N \pm \Delta R_N$ com $R_M \pm \Delta R_M$, para cada uma das resistências escolhidas. O que pode ser concluído desta comparação?

- Verifique se dentro das faixas de incerteza, os valores medidos para as associações em série e paralelo (Tabelas 2 e 3) são iguais aos valores equivalentes, quando aplicado às expressões para associação em série e em paralelo de resistores.

$$Série: \ R_{eq}^{Série} = R_1 + R_2 + \ ... + R_n \qquad Paralelo: \ \frac{1}{R_{eq}^{Paralelo}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

Parte 2 – Tensão em Função da Corrente

- Construa um gráfico de Tensão (V) em função da corrente (I) para o resistor. Para o diodo, faça um gráfico de I em função de V. Os gráficos podem ser feitos em papel milimetrado. Não se esqueça de incluir as barras de incertezas.
- Obtenha o coeficiente angular (m), do gráfico do resistor, assumindo V = m.I (ajuste linear). Verifique se dentro da faixa de incerteza o coeficiente angular ($m \pm \Delta m$), obtido do ajuste, é numericamente igual ao valor da resistência nominal ($R_N \pm \Delta_{RN}$) e medida ($R_M + \Delta R_M$).
- Para o diodo utilize um programa de computador e tente também ajustar uma curva exponencial e um polinômio de grau 2 aos dados experimentais. Responda qual ajuste se adéqua mais ao gráfico? Por quê? (pesquise em livros, artigos, etc.).

2.6 Questões a Serem Discutidas no Relatório do Experimento

- Qual dos dois componentes, resistor ou diodo são materiais ôhmicos? Justifique.
- O que são diodos e quais suas principais aplicações práticas.
- O que são leds e quais suas principais aplicações práticas.

FOLHA DE DADOS EXPERIMENTAIS

Experimento 2: Resistores, Voltagem, Corrente e Lei de Ohm

Tabela 1 – Valores nominais e medidos de resistores.

Resistor	R1	R2	R3
R Nominal ($R_N \pm \Delta R_N$)			
R Medido ($R_M \pm \Delta R_M$)			

Tabela 2 – Valores medidos da associação em série de resistores.

R1 e R3	R2 e R3	R1, R2 e R3

Tabela 3 – Valores medidos da associação em paralelo de resistores.

R1 e R3	R2 e R3	R1, R2 e R3

Teste de Diodos

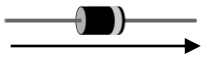
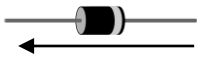
			

Tabela 4 – Valores medidos de tensão e corrente para o resistor e diodo.

Resistor	U( )													
	I (A)													
Diodo	U( )													
	I ( )													

Experimento 3: Resistência Elétrica em Função da Temperatura

3.1 Objetivos

- ✓ Realizar gráficos de resistência elétrica em função da temperatura para uma bobina de cobre e um diodo.
- ✓ Verificar modelos para a variação da resistência com a temperatura
- ✓ Obter o coeficiente da temperatura da resistividade para o cobre.

3.2 Materiais Necessários

- ✓ Uma bobina de cobre e um diodo.
- ✓ Um multímetro digital e conectores.
- ✓ Um termômetro.
- ✓ Uma manta aquecedora e Balão de fundo redondo.

3.3 Procedimentos Experimentais

Neste experimento você medirá como a resistência elétrica de uma bobina (enrolamento com N espiras) de cobre (Cu) e um diodo variam com a temperatura. Observe, na Figura 1, os componentes deste experimento.

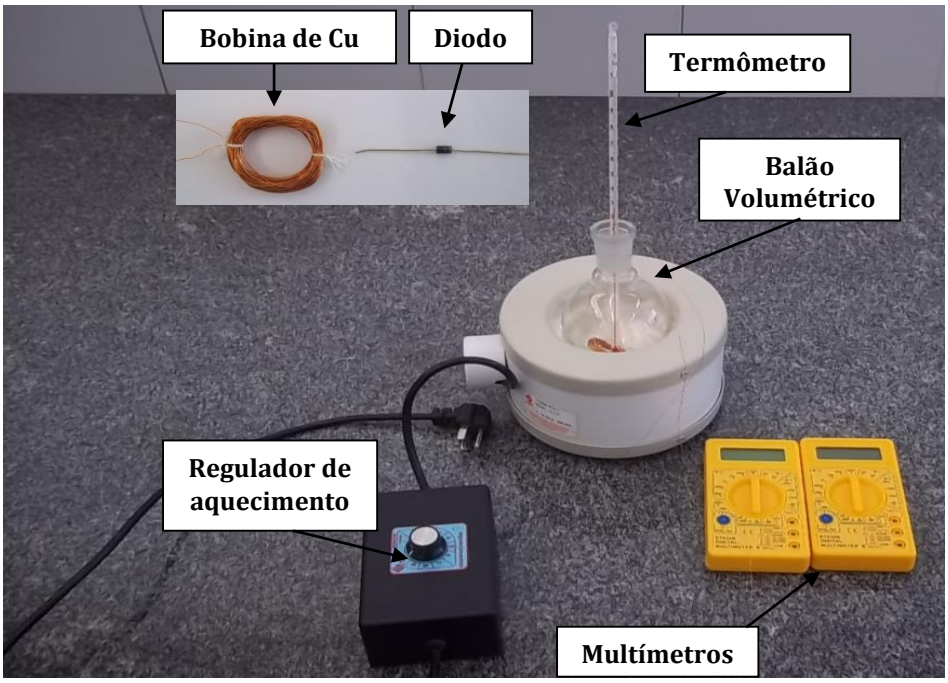


Figura 1 – Componentes para o estudo da resistência em função da temperatura.

1. Encha o balão volumétrico com água e insira o termômetro no mesmo.
2. Conecte as extremidades da bobina de Cu, nas ponteiras de um dos multímetros (leitura de resistência) e faça o mesmo com o diodo (tome cuidado com a ligação correta do diodo).
3. Mergulhe a bobina de Cu e o diodo no balão volumétrico com água. Deixe a parte inferior do termômetro, o mais próximo possível da bobina e o diodo.
4. Antes de ligar o regulador de aquecimento, você deverá anotar a temperatura ambiente e, as resistências da bobina e do diodo nesta temperatura. Avalie a incerteza do termômetro e, do multímetro (no manual) e anote estes valores.
5. Ligue o regulador de aquecimento na marcação 5 e, anote os valores das resistências da bobina de Cu e do diodo em função da temperatura. Faça estas medidas de 5 em 5ºC. Anote os dados na Tabela 5.

3.4 O que Incluir no Relatório do Experimento

- Faça dois gráficos utilizando um programa de computador: um para a resistência da bobina de Cu em função da temperatura e, outro para a resistência do diodo em função da temperatura. Inclua barras de incertezas. Os gráficos obtidos possuem comportamento linear?
- Através de um ajuste linear, escreva as funções que representam a variação da resistência com a temperatura para a bobina de Cu e o diodo.
- Através do ajuste feito no item anterior, estime a resistência elétrica $[R_o \pm \Delta(R_o)]$ da bobina de Cu a T_o = 20 ºC. Com isto, determine o coeficiente da temperatura da resistividade ($\alpha \pm \Delta\alpha$) do o cobre com incerteza. Compare os valores obtidos com o da literatura.

3.5 Questões a Serem Discutidas no Relatório do Experimento

- Explique porque a resistência do resistor aumenta enquanto a do diodo diminui, com o aumento da temperatura.
- Para qual faixa de temperatura o comportamento da resistência com a temperatura é linear para os metais? E para os semicondutores?

FOLHA DE DADOS EXPERIMENTAIS

Experimento 3: Resistência Elétrica em Função da Temperatura

Tabela 1 – Valores de resistência elétrica da bobina de Cu ($R_{Cu} \pm \Delta R_{Cu}$) e do diodo ($R_D \pm \Delta R_D$) em função da temperatura ($T \pm \Delta T$).

$T \pm \Delta T$ (ºC)	$R_{Cu} \pm \Delta R_{Cu}$ (Ω)	$R_D \pm \Delta R_D$ (Ω)

Experimento 4: Capacitores e Circuitos RC

4.1 Objetivos

- ✓ Fundamentar o conceito de capacitância e capacitor.
- ✓ Realizar leituras dos valores de capacitância de capacitores.
- ✓ Associar capacitores em série e paralelo verificando as relações algébricas para calcular as capacitâncias equivalentes em cada caso.
- ✓ Estudar o processo de descarga do capacitor.

4.2 Materiais Necessários

- ✓ Uma placa protoboard (opcional).
- ✓ Um resistor.
- ✓ Uma fonte c.c. ajustável ou bateria de 9V.
- ✓ Dois capacitores.
- ✓ Dois multímetros.
- ✓ Um cronômetro.

4.3 Referencial Teórico

Capacitores e Capacitância

O Capacitor é um dispositivo que armazena cargas elétricas, consistindo de duas placas condutoras (chamadas de armaduras), separadas por um material isolante (dielétrico). A relação entre a carga adquirida (Q) nas placas e tensão aplicada (V) é o que se define como a capacitância (C) do capacitor:

$$C = \frac{Q}{V}$$

No Sistema internacional de unidades, a capacitância é medida em Farad (F), sendo 1F = 1C/V. No caso de um capacitor de placas planas e paralelas, a capacitância será dada por:

$$C = \mathfrak{k}\varepsilon_o \frac{A}{d}$$

Onde, A é a área do capacitor, d, a distância entre as placas e, ε_o a permissividade elétrica no vácuo, que vale $\varepsilon_0 \approx 8{,}85$ pF/m. A constante dielétrica $\mathfrak{k}$, é um parâmetro físico associado com o dielétrico. No ar pode- se admitir que $\mathfrak{k} \sim 1$.

Na prática encontramos vários tipos de capacitores, com aplicações específicas, dependendo de aspectos construtivos, tais como, material usado como dielétrico, tipo de armaduras, dentre outros. Os mais comuns são: plásticos, eletrolíticos (apresentam polaridades) e cerâmicos.

Associação de Capacitores

As fórmulas usadas para as capacitâncias equivalentes (C_{eq}) são:

Para arranjos em série $$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_i \frac{1}{C_i} \quad (1)$$

Para arranjos em paralelo $$C_{eq} = \sum_i C_i \quad (2)$$

Circuito RC série

Durante o processo de carga e descarga de capacitores, as equações associadas são:

Carga:

$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R}\, e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

$$V_C(t) = \varepsilon\,(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (4)$$

Descarga:

$$i(t) = -\frac{\varepsilon}{R}\, e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5)$$

$$V_C(t) = \varepsilon\, e^{-\frac{t}{RC}} \quad (6)$$

4.4 Montagem Experimental

Neste roteiro, sugere-se a geometria mostrada na Figura 1. Acionando-se a chave CH1, corrente elétrica é estabelecida no circuito. Como o capacitor e o resistor estão em paralelo e não há resistência no ramo Fonte/Capacitor, o capacitor equivalente, será carregado quase que instantaneamente e a corrente logo fluirá apenas através do resistor, atingindo um valor estacionário. Este processo é evidenciado observando-se a diferença potencial elétrico entre as extremidades do capacitor equivalente, que logo atinge seu valor máximo, contrário ao da fonte.

Após finalizar-se o processo de carga, abre-se a chave CH1. Desta forma, o capacitor C_{eq} começa a descarregar através do resistor R. Neste caso o processo será mais lento que o processo de carga, pois no ramo Capacitor/Resistor a resistência tem valor significativo. O processo de descarga

pode ser, portanto, estudado com maiores detalhes, possibilitando elaborar gráficos de V(t) e I(t). Neste roteiro, estuda-se apenas este caso.

O amperímetro deve ser ligado em série no ramo capacitor/resistor. Assim medirá as correntes tanto no processo de carga quando no processo de descarga. O voltímetro deve ser conectado em paralelo ao capacitor equivalente C_{eq} (veja Figura 1).

➲ IMPORTANTE: Sugere-se que o grupo faça dois estudos: (I) usando um dos capacitores e (II) escolhendo uma das associações (série ou paralelo).

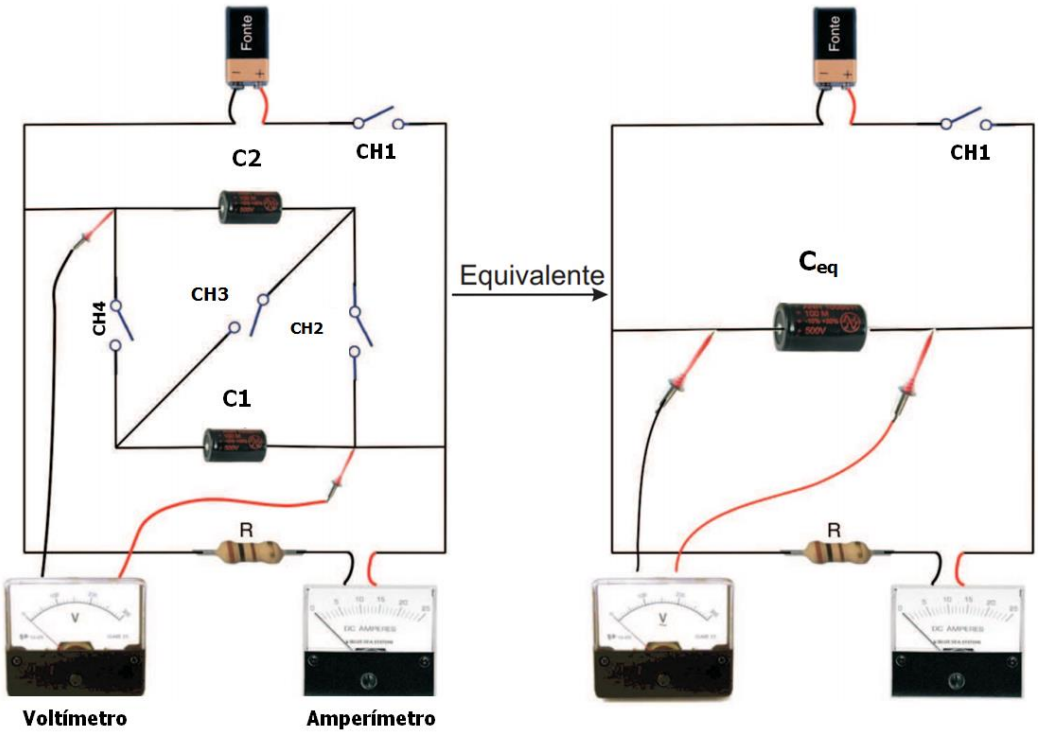


Figura 1: Geometria proposta para realização do experimento. Os dois capacitores que podem ser ligados em sério ou paralelo dependendo dos acionamentos das chaves CH2, CH3 e CH4, resultando em um capacitor equivalente C_{eq}. O capacitor equivalente é então ligado em paralelo com um resistor R e também com a fonte.

4.5 Procedimentos Experimentais

Parte 1: Medições Iniciais

1. Meça os valores de Resistência (R) e Capacitâncias (C1 ou C2) com suas respectivas incertezas. Anote os dados na Tabela 1.

2. Meça o valor da associação de capacitores escolhida (série ou paralelo). Faça o cálculo da associação escolhida com sua incerteza. Anote estes dados na Tabela 2.

Parte 2: Descarga de Capacitores:

Procedimento inicial: Deve-se primeiro carregar o capacitor fechando CH1, executar um dos passos abaixo e, novamente abrir a chave CH1. Com este procedimento realizado, preencha as Tabelas 3 e 4, coletando dados de corrente em função do tempo no processo de descarga do capacitor.

1. *Utilizando apenas o capacitor C1*: aciona-se a chave CH4, deixando abertas as chaves CH2 e CH3.

2. *Utilizando apenas o capacitor C2*: aciona-se a chave CH2, deixando abertas as chaves CH3 e CH4.

3. *Associando-se os capacitores em paralelo*: acionam-se as chaves CH2 e CH4, deixando aberta a chave CH3.

4. *Associando-se os capacitores em série*: aciona-se a chave CH3, deixando abertas as chaves CH2 e CH4.

Parte 3: Capacitor de Placas Planas Paralelas

1. Com as placas circulares do capacitor de placas planas e paralelas, coloque três folhas de papel entre as placas do capacitor, fazendo com que estas placas fiquem o mais paralelo possível.
2. Retire cuidadosamente as folhas entre as placas do capacitor e, meça com um paquímetro, a espessura das folhas, que servirá como uma estimativa da distância entre as placas ($d \pm \Delta d$). A seguir, meça a capacitância, utilizando o multímetro e anotando as incertezas ($C \pm \Delta C$).
3. Aumente continuamente a distância entre as placas, colocando cada vez mais folhas de papel (de três em três folhas). A seguir, repita o item 2 e preencha a Tabela 5.

4.6 O que Incluir no Relatório do Experimento

➲ Para cada caso: (I) um único capacitor escolhido e (II) tipo de associação (série ou paralelo):

- Faça um gráfico de *ln I* (logaritmo natural da corrente) em função do tempo *t* no papel milimetrado. Calcule as incertezas em *ln I* incluindo as barras de incertezas no gráfico.
- Obtenha do gráfico, o valor da constante de tempo capacitiva $\tau_C = RC$, com incerteza. Compare este valor com o produto *RC* obtido dos valores medidos de C e R (caso I) e C_{eq} e R (caso II), levando em consideração as incertezas. Justifique seus resultados.
- Construa um gráfico (utilizando programa de computador) de capacitância (C) em função do inverso da distância (1/d) entre as placas do capacitor, com suas respectivas barras de incerteza.
- Na região de linearidade do gráfico, obtenha o coeficiente angular da reta (m) com incerteza. De posse de $m \pm \Delta m$, da área da placa $A \pm \Delta A$, obtenha o valor da permissividade no vácuo, $\varepsilon_o \pm \Delta\varepsilon_o$. Compare com o valor teórico da literatura. Justifique as discrepâncias, no valor obtido, se houver.

- Comente sobre a curva obtida e a validade da relação C = $\varepsilon_o A/d$.

4.7 Questões a Serem Discutidas no Relatório do Experimento

- Com base no modelo teórico, mostre matematicamente que o tempo característico ($\tau_C = RC$) corresponde a 63,2 % da *fem* fornecida, no caso do processo de carga, e a 36,8% da carga acumulada no capacitor, no caso de descarga.
- Deduza as equações (3) e (5) a partir da análise do circuito RC.

FOLHA DE DADOS EXPERIMENTAIS

Experimento 4: Capacitores e Circuito RC

Tabela 1 – Valores medidos de Resistência (R) e Capacitâncias (C1 ou C2).

$R \pm \Delta R$	$C_1 \pm \Delta C_1$	$C_2 \pm \Delta C_2$

Tabela 2 – Comparação dos valores medidos de C_{eq} e calculados pela fórmula, de acordo com a associação escolhida.

$C_{eq} \pm \Delta C_{eq}$	$C \pm \Delta C$ (calculada)

Tabela 3 – Valores de corrente medidos no processo de descarga do capacitor C1 ou C2.

i ( )											
t ( )											

i ( )											
t ( )											

Tabela 4 – Valores de corrente medidos no processo de descarga da associação em série ou paralelo de capacitores.

i ( )											
t ( )											

i ( )											
t ( )											

Tabela 5 – Valores medidos de capacitância em função da distância entre as placas do capacitor.

$d \pm \Delta d$									
$C \pm \Delta C$									
Diâmetro da Placa do Capacitor ($D \pm \Delta D$) =									

2. Roteiros da Segunda sequência

Experimento 5: Osciloscópio e Circuitos Retificadores

5.1 Objetivos

- ✓ Aprender a utilizar um gerador de sinais, bem como um osciloscópio digital para medição da amplitude de uma tensão alternada, período, frequência e valor eficaz.
- ✓ Aprender a montar um circuito retificador de meia e onda e onda completa da corrente alternada medindo o sinal retificado.
- ✓ Aprender a função do uso de capacitores em circuitos retificadores de corrente alternada.

5.2 Materiais Necessários

- ✓ Dois resistores e cinco diodos.
- ✓ Três Capacitores eletrolíticos.
- ✓ Um gerador de funções.
- ✓ Um osciloscópio.
- ✓ Um multímetro digital.
- ✓ Um transformador com tensão de entrada 127 V AC e tensão de saída ~ 6 V AC (opcional).

5.3 Referencial Teórico

O Diodo e a Retificação da Corrente Alternada

Um diodo (Figura 1) permite a passagem da corrente elétrica, somente em um sentido. De acordo com a construção dos diodos, só haverá fluxo de elétrons no sentido cátodo para ânodo, quando a parte positiva da fonte for ligada ao ânodo e a parte negativa ao cátodo (polarização direta). Uma corrente elétrica (i) no sentido ânodo para cátodo será estabelecida, segundo o sentido convencional da corrente elétrica.

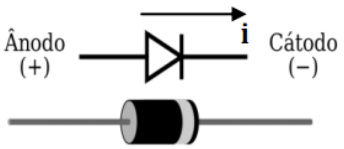


Figura 1 – Representação esquemática de um diodo, indicando sua polarização.

Uma forma de se obter Corrente Contínua (*CC*) [ou *Direct Current* (*DC*)] é através da retificação de uma Corrente Alternada CA [*Alternating Current* (*AC*)], utilizando diodos. A forma mais eficiente para obtenção de um corrente *DC* está ilustrada na Figura 2: um gerador de funções (1)

produz uma tensão alternada, como por exemplo, a alternada do tipo senoidal, representada na Figura 3(a). Neste gerador, as tensões nos terminais vermelho/preto trocam de polaridade a cada meio período da onda senoidal. A corrente elétrica na ponte de diodos (2), na Figura 2, terá apenas o sentido de a → d, quando o ponto vermelho de gerador de sinais (1) for positivo e, do sentido de b → d, quando o ponto preto for positivo. A corrente elétrica no resistor (4) terá apenas o sentido de baixo para cima. Esta corrente foi retificada, ao passar pela ponte de diodos, e é chamada de retificação de onda completa. A corrente obtida é chamada de corrente *DC* pulsante. Veja Figura 3b.

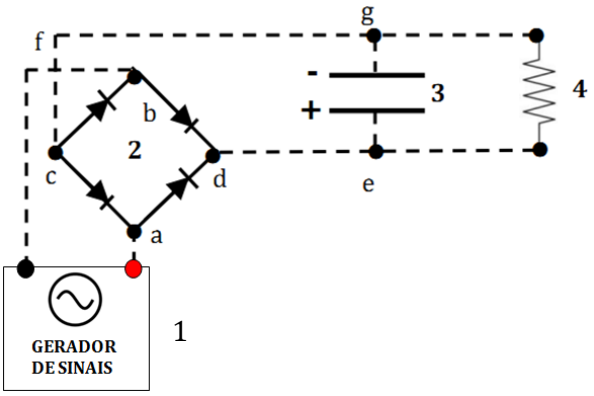


Figura 2 – Componentes básicos de um circuito retificador de corrente. A tensão alternada é fornecida pelo gerador de sinais (em 1), conectado nos pontos a e b. O conjunto de diodos orientados (2) limita o sentido da corrente alternada. O capacitor (3) suaviza a corrente elétrica no circuito.

Outro tipo de retificação, menos eficiente, pode ser obtido, ligando um diodo em série a um resistor e, ligando-os a uma fonte de tensão *AC*. Na parte negativa da onda, o diodo irá cortar a corrente e apenas uma parte da onda irá passar. Veja a Figura 3(c).

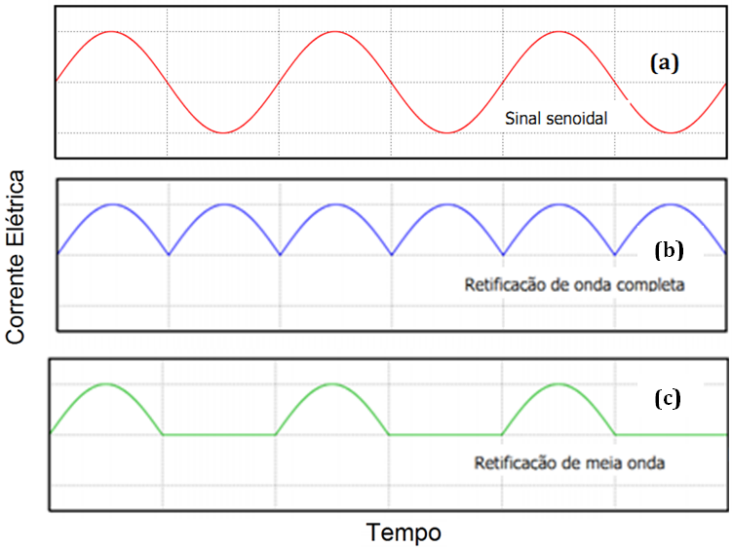


Figura 3 – (a) Forma de onda senoidal *AC*. (b) O efeito de uma ponte de diodos, permite a passagem da corrente elétrica somente em um sentido. (c) Forma de onda, quando apenas um diodo é ligado em série ao resistor.

O efeito de um capacitor (enumerado por 3 na Figura 2), ligado em paralelo ao resistor está ilustrado na Figura 4. Quando a corrente elétrica é crescente, o capacitor se carrega. Quando a corrente elétrica começa a diminuir, o capacitor se descarrega no resistor, não deixando a corrente elétrica se anular. Nesta situação, a corrente elétrica tende a se tornar constante. O fator que determinará o quanto a corrente se tornará constante, depende da constante de tempo capacitiva (τ) do capacitor/resistor.

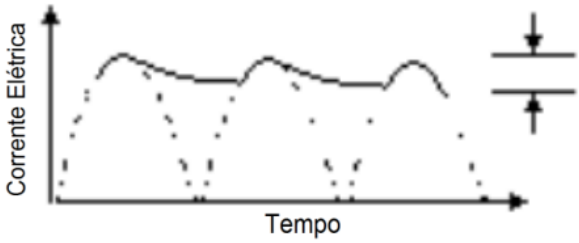


Figura 4 – Efeito da presença de um capacitor no circuito.

Valores Médios e Valores Eficazes

O valor médio de uma grandeza física periódica contínua, de período T, do tipo: $V_{máx}sen(\omega t + \Phi)dt$, é matematicamente, expresso por:

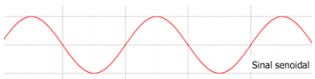
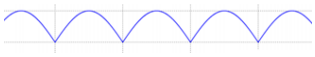
$$V_{médio} = \frac{1}{T}\int_0^T V_{máx}sen(\omega t + \Phi)dt \tag{1}$$

Por outro lado, o valor eficaz, ou o valor médio quadrático (*RMS*) é expresso por:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [V_{máx}(sen\omega t + \Phi)]^2 dt} \tag{2}$$

O quadro abaixo resume as fórmulas, obtidas de (1) e (2) para os sinais senoidais, nos retificados de meia onda e nos retificados de onda completa:

Quadro 1 - Fórmulas usadas para cálculos de valor médio e eficaz das formas de onda.

Tipo de Onda	Valor médio	Valor Eficaz (*RMS*)
	Nulo	$\frac{V_{máx}}{\sqrt{2}}$
	$\frac{V_{máx}}{\pi}$	$\frac{V_{máx}}{2}$
	$2\frac{V_{máx}}{\pi}$	$\frac{V_{máx}}{\sqrt{2}}$

Geralmente, um multímetro na escala *DC*, mede valores médios. Então, ondas pulsantes como as de meia onda e onda completa devem ser medidos na escala *DC*. Por outro lado, sinais alternados, como os senoidais devem ser medidos na escala *AC*, retornando valores RMS.

O Osciloscópio Digital

O osciloscópio é um equipamento largamente aplicado em laboratórios de eletricidade e eletrônica, por permitir uma visualização da variação com o tempo de sinais elétricos alternados (ou seja, por permitir a visualização da forma de onda destes sinais). Neste experimento utilizaremos um osciloscópio digital de marca Minipa modelo MO 2100, que possui faixa de frequência de até 100 Mhz. Nos osciloscópios digitais, a tensão de entrada (sinal elétrico/analógico) é digitalizada (convertido para números) por um conversor analógico-digital. O sinal digital é então utilizado para criar um conjunto de informações que é armazenado na memória de um microprocessador. Estas informações são processadas e então enviadas para a tela do osciloscópio. Nos osciloscópios analógicos, isto se dá através de um tubo de raios catódicos; porém, nos osciloscópios digitais é através de uma tela LCD, etc.

Na Figura 5, está representado o osciloscópio Minipa MO 2100, usado neste experimento, com suas principais funções enumeradas. Faremos uma rápida abordagem sobre cada uma destas funções seguindo as numerações:

(1) Botão liga/desliga;

(2) Tecla *measure* (medição): permite observar os parâmetros de medição de um sinal, como período, frequência, tensão pico a pico, dentre outros;

(3) Tecla *acquire* (adquirir): permite observar o modo com que o sinal é exibido, por exemplo, o modo de amostragem instantânea e modo de amostragem médio (é possível observar a média de até 256 exibições);

(4) Tecla *storage* (armazenamento): exibe um conjunto de funções para salvar um sinal medido;

(5) Tecla auto (automático): realiza automaticamente as escolhas das escalas vertical, horizontal e o modo *trigger* para uma melhor visualização de um sinal medido;

(6) Tecla *trigger* (disparo): Permite haver um sincronismo entre o período da oscilação da onda senoidal e a varredura no tempo na escala horizontal;

(7) Estas teclas permitem realizar várias funções/observações obtidas ao teclarmos as opções (2), (3), (4) e outras;

(8) Permite selecionar os canais CH1 e CH2 para realização das medições de um sinal, com o auxílio de um cabo coaxial com conector do tipo BNC e uma ponta de prova. Além disto, é possível realizar

as configurações de medição. Há ainda a possibilidade de realizar operações matemáticas entre dois sinais, com o auxílio da tecla *math* (matemática).

(9) e (10) Conector para a entrada dos canais CH1 e CH2 respectivamente;

(11) e (12) Permite realizar o controle das escalas vertical (volt/div) e horizontal (seg/div).

(13, 14 e15) Permite observar as escalas verticais dos canais CH1 e CH2 e horizontal.

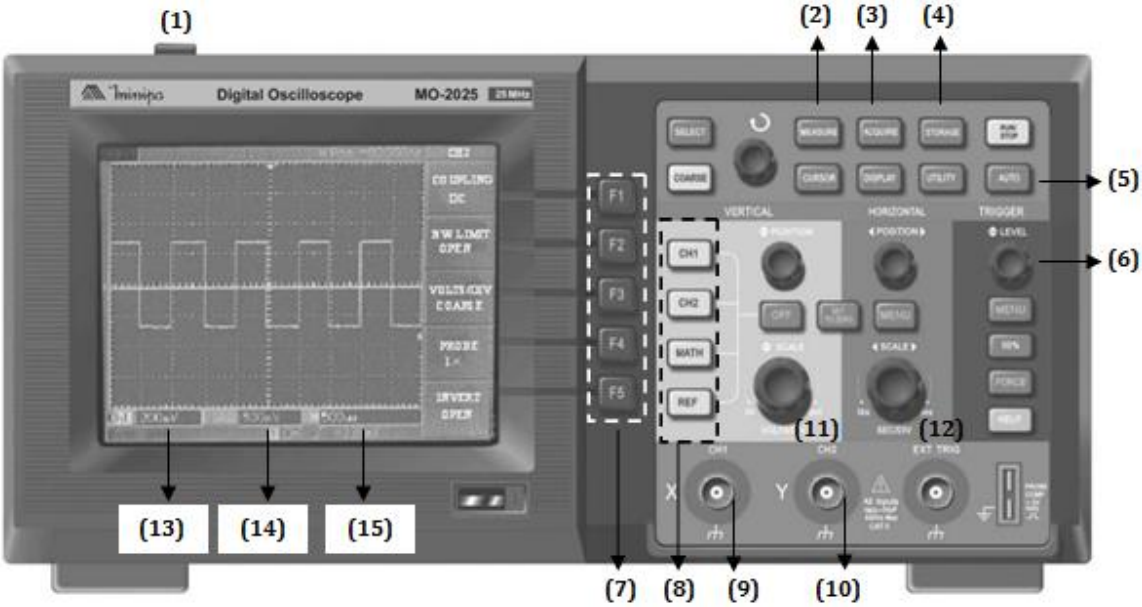


Figura 5 – Osciloscópio digital minipa modelo MO2100 usado neste experimento.

5.4 Procedimentos Experimentais

Parte 1 - Observação de Diferentes Formas de Onda no Osciloscópio

1. Ligue um resistor na saída do gerador de sinais.
2. Conecte a ponta de prova do cabo coaxial do osciloscópio em uma das extremidades do resistor e, na outra extremidade, conecte a garra jacaré (terra).
3. Pressione a tecla CH1 do osciloscópio e certifique-se que as seguintes configurações apareçam: Acoplamento DC (passa a parte AC e DC do sinal medido); Ponta de Prova 10X (atenua o sinal medido em 10X); *inverter off* (não inversão da forma de onda).
4. Pressione a tecla *auto* do osciloscópio e observe a forma de onda senoidal, triangular e quadrada usando o gerador de sinais. Tire uma foto de cada uma destas formas de onda.
5. Selecione a onda senoidal no gerador de sinais. Utilize uma escala adequada e meça diretamente na tela do osciloscópio o valor da amplitude da tensão ($V_{máx}$), do período (T) desta função de onda. Calcule a frequência (f_{calc}), usando a fórmula f = 1/T. Anote os resultados na Tabela 1.

6. Pressione a tecla *measure* e em seguida aperte F5 para exibir a opção parâmetros. Pressione novamente a tecla F5. Anote os valores de tensão pico a pico (V_{PP}), período (T) e frequência (f). Anote também o valor de V_{RMS} e $V_{médio}$ no osciloscópio. Compare com os respectivos valores obtidos com o multímetro, nas escalas AC (V_{AC}) e DC (V_{DC}) e com os valores calculados. Anote os resultados na Tabela 2.

Parte 2 - Retificação de Meia Onda

1. Conecte o cabo do gerador de sinais no resistor, em série com o diodo. Pressione a tecla *auto* no osciloscópio e observe a forma de onda. Use uma escala para melhor observação da forma de onda. Preencha a Tabela 3.

Parte 3 - Retificação de Onda Completa

1. Com o auxílio da Figura 2, conecte a ponte de diodos (nº 2) aos terminais do resistor (nº 4). Por enquanto, não faça a conexão com o capacitor (nº 3).
2. Repita o procedimento 1 da parte 2. Preencha a Tabela 4.
3. Leia diretamente nos três capacitores, os valores de capacitância. Preencha a Tabela 5. Com o circuito ligado, conecte vários capacitores em ordem crescente de capacitância em paralelo com o resistor. Observe as mudanças nas formas dos sinais.
4. Para a conexão do circuito com o capacitor de maior capacitância, preencha a Tabela 6.

5.5 O que incluir no Relatório do Experimento

- Apresente no relatório as imagens das fotos das formas de onda (procedimento 4 da parte 1). Faça uma discussão sobre os valores esperados de período destas funções.
- Apresente as Tabelas 1, 2, 3 e 4.
- Verifique na Tabela 1 se $f_{calc} = 1/T$. Verifique também se este valor corresponde ao obtido com o multímetro.
- Compare os valores obtidos de $V_{máx}$ (Tabela 1) e V_{PP} (Tabela 2). A relação $V_{PP} = 2V_{máx}$ se verifica?
- Para cada uma das formas de onda estudadas, verifique dentro das incertezas, se V_{RMS} e $V_{médio}$, usando o osciloscópio, são iguais aos respectivos valores calculados, usando as fórmulas no quadro 1 deste roteiro. Justifique cada um dos resultados obtidos.

5.6 Questões a Serem Discutidas no Relatório do Experimento

- Qual o significado do valor eficaz de uma tensão? Qual o significado do valor médio?
- Qual é a influência do valor de C na retificação do sinal alternado? Explique, comparando o produto RC com o período do sinal usado.

- Partindo das Equações (1) e (2) demonstre todas as fórmulas do Quadro 1 deste roteiro.
- Faça uma pesquisa sobre as aplicações de ondas quadradas e descreva em seu relatório.

FOLHA DE DADOS EXPERIMENTAIS

Experimento 5: Osciloscópio e Circuitos Retificadores

Tabela 1 – Valores medidos diretamente na tela do osciloscópio usando as escalas horizontais e verticais.

$V_{máx} \pm \Delta V_{máx}$	$T \pm \Delta T$	$f_{calc} \pm \Delta f_{calc}$	$f_{mult} \pm \Delta f_{mult}$

Tabela 2 – Dados coletados para a onda senoidal.

$V_{PP} \pm \Delta V_{PP}$	$T \pm \Delta T$	$f \pm \Delta f$	Tensões Osciloscópio	Tensões multímetro	Valores Calculados
			V_{RMS}: $V_{médio}$:	V_{AC}: V_{DC}:	V_{RMS}: $V_{médio}$:

Tabela 3- Dados coletados para a retificação de meia onda.

$V_{PP} \pm \Delta V_{PP}$	$T \pm \Delta T$	$f \pm \Delta f$	Tensões Osciloscópio	Valores Calculados
			V_{RMS}: $V_{médio}$:	V_{RMS}: $V_{médio}$:

Tabela 4- Dados coletados para a retificação de onda completa.

$V_{PP} \pm \Delta V_{PP}$	$T \pm \Delta T$	$f \pm \Delta f$	Tensões no Osciloscópio	Valores Calculados
			V_{RMS}: $V_{médio}$:	V_{RMS}: $V_{médio}$:

Tabela 5 – Valores de capacitância nominal dos capacitores.

C1	C2	C3

Tabela 6 – Dados coletados para a onda retificada e usando o capacitor de maior capacitância.

$V_{PP} \pm \Delta V_{PP}$	$T \pm \Delta T$	$f \pm \Delta f$	Tensões no Osciloscópio	Tensões no multímetro
			V_{RMS}: $V_{médio}$:	Esc. AC: Esc. DC:

Experimento 6: Lei de Faraday e Transformadores

6.1 Objetivos

- ✓ Realizar experimentos que verifiquem a lei de indução de Faraday.
- ✓ Estudar o processo de transformação de tensão em um transformador.

6.2 Materiais Necessários

- ✓ Um transformador com tensão de entrada 127 V AC e tensão de saída 24/6 V AC.
- ✓ Um ímã em forma de bastão.
- ✓ Bobinas (300, 600, 900 e 1200 espiras).
- ✓ Núcleo laminado de Ferro.
- ✓ Três multímetros .

6.3 Referencial Teórico

A Lei de Faraday

Através de experimentos realizados, Michel Faraday, em 1831, observou que uma força eletromotriz (fem) poderia ser induzida em uma espira, na presença de um campo magnético variável.

A lei de Faraday é enunciada como:

A força fem induzida em um circuito é igual ao negativo da taxa de variação com que o fluxo magnético (Φ_B) através do circuito está mudando no tempo.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \tag{1}$$

A lei de Lenz, proposta em 1834, ajuda a compreender o sinal negativo sugerido por Faraday:

A corrente elétrica induzida em uma espira fechada condutora aparece em um sentido que se opõe à mudança que a produziu.

O Transformador

Um transformador (Figura 1) é constituído basicamente por dois enrolamentos (bobinas) que utilizando um núcleo comum pode aumentar ou diminuir uma tensão elétrica alternada. Quando uma tensão alternada da é conectada no enrolamento do primário, uma tensão é obtida no enrolamento do secundário e, esta pode ser aumentada ou diminuída, de acordo com seu número de espiras o secundário. O núcleo do transformador é constituído por um material ferromagnético que aumentará o fluxo do campo magnético nas bobinas do primário e secundário.

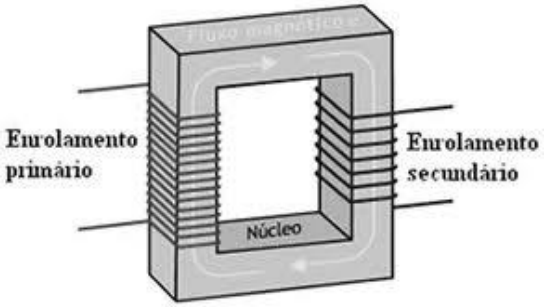


Figura 1 – Representação esquemática de transformador com enrolamento primário, secundário e núcleo.

Por simplicidade considera-se um modelo baseado em um transformador ideal, ou seja, desprezam-se as perdas de energia por efeito Joule nos enrolamentos, bem como a energia dissipada devido às correntes de Foucault, provocados pelo campo magnético alternado nas vizinhanças dos enrolamentos, particularmente no núcleo. Além disso, considera-se que os fluxos do campo magnético através dos enrolamentos são iguais. Sendo assim, com base na lei de indução de Faraday, a fem por *espira* é a mesma em ambos os enrolamentos, primário com N_P espiras e o secundário, com N_S espiras. Em outras palavras:

$$\frac{V_P}{N_P} = \frac{V_s}{N_s} \tag{2}$$

Resolvendo a igualdade para V_S, obtém-se:

$$V_S = V_P \frac{N_s}{N_P} \tag{3}$$

Se $N_S > N_P$, trata-se de um transformador elevador de tensão; se $N_S < N_P$ trata-se de um transformador abaixador de tensão.

6.4 Procedimentos Experimentais

Parte 1 – Lei de Faraday

1. Conecte uma bobina de 600 espiras ao voltímetro do multímetro (na menor escala possível de tensão contínua) e, de acordo com a Figura 3.
2. Com o auxílio da bússola, identifique qual é o polo norte e o polo sul do ímã. (Não se esqueça que o ímã aponta para o norte geográfico da Terra que, na verdade, está próximo de seu polo sul magnético).
3. Pegue um ímã em barra e aproxime lentamente seu polo norte no interior da bobina. Torne a retirá-lo lentamente. Anote a conclusão no quadro 1.

Figura 3 – Montagem experimental para o estudo da lei de Faraday.

4. O sinal obtido da tensão no multímetro, quando se aproxima o ímã da bobina, está de acordo com a formulação teórica da lei de Lenz? Explique no quadro 3.
5. O sinal obtido da tensão no multímetro, quando se afasta o ímã da bobina, está de acordo com a formulação teórica da lei de Lenz? Explique no quadro 4.
6. Detalhe todos estes itens durante a confecção do relatório.

Parte 2 - O Transformador

1. Ligue os terminais de saída de uma fonte CC à bobina do primário do transformador com menor número de espiras. Ajuste a tensão em torno de 1,0 a 2,0 V.
2. Conecte um voltímetro em uma das bobinas do secundário, ajustando a escala para medir tensão.
3. Acione a chave liga desliga e observe o voltímetro. Anote as observações no quadro 5.
4. Substitua a fonte de tensão contínua, pelo transformador de corrente alternada (CA) 127 V CA/ 24 V CA.
5. Use um voltímetro para a medição da tensão elétrica no primário (U_P). Anote o valor na Tabela 1.
6. No secundário você utilizará as bobinas, com o número de espiras, iguais a 600, 900, 1200 1500, 1800, 2100 espiras.
7. Conecte outro voltímetro na saída da tensão do secundário, com 600 espiras.
8. Peça ao professor ou monitor para realizar uma verificação nas ligações. Ligue o transformador. Leia os valores de tensão no secundário (U_S), para cada bobina. Complete a Tabela 1.

6.5 O que Incluir no Relatório do Experimento

- Detalhamento de todos os procedimentos experimentais e as conclusões obtidas para o entendimento da lei de Faraday e da lei de Lenz. Explique os sinais que surgem no multímetro e a relação com o campo magnético induzido na espira pelo movimento do ímã se aproximando e se afastando da espira.
- Sobre a parte 2 deste experimento, construa um gráfico em papel milimetrado de V_{sec}/V_{prim} em função de N_{sec}/N_{prim}, para as diferentes bobinas no secundário do transformador (já que N_{prim} = 300 espiras). Inclua barras de incertezas. Compare o resultado com o que você esperaria encontrar baseado na relação de transformação para um transformador ideal. Comente e discuta.

6.6 Questões a Serem Discutidas no Relatório do Experimento

- Um transformador funciona com corrente contínua? Explique porque sim ou porque não.
- O que é um transformador ideal? Deduza a relação de transformação de tensões para o transformador ideal.
- Para que serve os núcleos magnéticos utilizado nos transformadores? Qual a propriedade física importante que estes núcleos possuem?
- O que são correntes de *Foucault* e qual o seu papel no funcionamento dos transformadores?

FOLHA DE DADOS EXPERIMENTAIS

Experimento 6: Lei de Faraday, Transformadores e Campo Magnético da Terra

Quadro 1 – Movimento lento do ímã na espira.

Conclusão:

Quadro 2 – Movimento rápido do ímã na espira.

Conclusão:

Quadro 3 – Sinal da tensão durante a aproximação do ímã.

Conclusão:

Quadro 4 – Sinal da tensão durante o afastamento do ímã.

Conclusão:

Quadro 5 – Observações com o primário ligado a uma fonte de Corrente Contínua.

Observação:

Tabela 1 - Número de espiras no secundário e tensões no primário e secundário do transformador.

Espiras no secundário	600	900	1200	1500	1800	2100
U_S (V)						
U_P (V)						

Experimento 7: Campo Magnético da Terra

7.1 Objetivo

- ✓ Obter a componente horizontal do campo magnético da Terra.

7.2 Materiais Necessários

- ✓ Uma fonte de tensão contínua montada contendo ponte de diodos, capacitor eletrolítico e resistores cerâmicos.
- ✓ Um transformador com tensão de entrada 127 V AC e tensão de saída 24/6 V AC;
- ✓ Uma bobina com duas voltas.
- ✓ Um Multímetro (na função amperímetro).
- ✓ Uma bússola.

6.3 Referencial Teórico

Campo Magnético da Terra

Uma maneira simples de se obter a Componente Horizontal do Campo Magnético Terrestre (B_{HT}), consiste na aplicação de um campo magnético externo (B_{EXT}) perpendicular a B_{HT} e a observação da deflexão de uma bússola, que aponta na mesma direção que o campo resultante (B_{RES}) entre os campos B_{TH} e B_{EXT}. A Figura 1 ilustra, uma observação vista de cima, dos vetores B_T, B_{EXT}, B_{RES} e a deflexão da Bússola Φ.

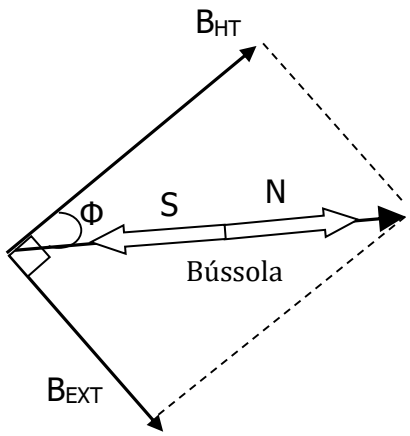


Figura 1 – Vetores B_{HT}, B_{EXT}, B_{RES} e o ângulo de deflexão de uma bússola, indicada por setas maiores.

Para se obter um campo magnético externo basta fazer uma corrente elétrica, *i*, percorrer um enrolamento com N espiras de raio R. De acordo com a lei de Biot Savart, o campo magnético externo no centro deste enrolamento é:

$$B_{EXT} = \frac{\mu_o}{2R} Ni \qquad (1)$$

Desta forma, obtém – se uma relação entre as grandezas B_{HT}, tgΦ e *i*, possibilitando o cálculo de B_{HT} com incerteza.

6.4 Procedimentos Experimentais

1. Use a bobina com duas espiras e a fonte de corrente contínua montada neste experimento.

   Obs: Você aprenderá mais sobre o uso desta fonte de corrente contínua, no experimento 5. Peça ao professor que dê uma breve explicação sobre o uso e, as conexões da mesma.

2. Utilize uma régua para medir o diâmetro da bobina. Calcule o raio (R). Faça cinco medidas em diâmetros diferentes, para a obtenção de uma média e cálculo da incerteza, ± ΔR. Anote os resultados na Tabela 1.

3. Conecte a entrada da bobina em série com as resistências deste experimento e em série com um amperímetro. Desta forma, variando-se a resistência elétrica, é possível medir diferentes valores de corrente elétrica na bobina. Por sua vez, estas correntes conduzem um campo magnético (B_{EXT}) perpendicular ao plano da espira.

4. Coloque a bússola sobre o centro de uma das bobinas.

5. Deixe que a agulha da bússola aponte para o norte geográfico. Oriente a espira, de tal forma que o campo magnético produzido por esta (B_{EXT}) seja perpendicular ao campo magnético da Terra.

6. Ligue a fonte de tensão (com orientação do monitor ou professor) e meça para diferentes conexões nas resistências da fonte, diferentes ângulos de deflexão Φ. Complete a Tabela 2.

3.5 O que Incluir no Relatório do Experimento

- Deduza uma equação que relacione *Tg(Φ)*, B_{HT} *e i*.
- Faça um gráfico em papel milimetrado de *Tg(Φ)* em função de *i* e obtenha a componente horizontal do campo magnético da Terra com sua incerteza. Adote $\mu_o = 4\pi.10^{-7}$ T.m/A. O valor obtido, estará em unidade de Tesla (T), do sistema internacional de unidades (SI). Compare o valor obtido com o da literatura. Os valores são iguais? Por quê?

FOLHA DE DADOS EXPERIMENTAIS

Experimento 7: Campo Magnético da Terra

Tabela 1 – Valores medidos para o raio da bobina.

R_1=	R_2=	R_3=	R_4=	R_5=	$R_{médio}$=	$\pm\Delta R$=

Tabela 2 – Valores medidos de ângulo de deflexão em função da corrente na espira.

i (A)						
Φ (o)						

Experimento 8: Circuito RLC e Ressonância

8.1 Objetivos

- ✓ Fundamentar o conceito de impedância;
- ✓ Obter a frequência de ressonância em um circuito RLC;

8.2 Materiais Necessários

- ✓ Um gerador de sinais;
- ✓ Um capacitor, um resistor e uma bobina;
- ✓ Um osciloscópio digital;
- ✓ Um voltímetro.

8.3 Referencial Teórico

Circuito RLC em Série de Corrente Alternada

Uma tensão alternada, U(t), pode ser escrita na forma:

$$U(t) = U_m \text{sen}\omega t \tag{1}$$

Onde $\omega = 2\pi f$ é a freqüência angular (medida em rad/s) e f é a freqüência (medida em Hz).

Em um circuito (Figura 1) que contenha uma Resistência elétrica (R), um Capacitor (C), e um Indutor (L), ligados em série com uma fonte de Corrente Alternada (CA), descrita pela equação (1), aparecerá uma corrente alternada do tipo:

$$i(t) = i_m \text{sen}(\omega t - \phi) \tag{2}$$

Esta corrente elétrica surge após um determinado período, denominado de *transiente*, no qual a oscilação é aleatória.

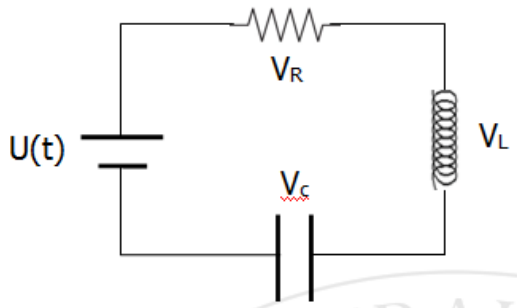


Figura 1- Representação de um circuito RLC em série, onde V_R, V_L e V_C representam a diferença de potencial no resistor, indutor e no capacitor respectivamente.

$$U(t) = V_R + V_L + V_C \tag{3}$$

Uma análise trigonométrica simplificada para a solução da equação (3) é obtida, considerando cada termo desta equação isoladamente:

- **Para um elemento resistivo isolado, V_R tem a forma:**

$$V_R(t) = i_m R \mathrm{sen}(\omega t - \phi) \tag{4}$$

Neste caso a corrente i(t), *está em fase* com a tensão $V_R(t)$.

- **Para um elemento indutivo isolado, V_L tem a forma:**

$$V_L(t) = i_m \omega L \mathrm{sen}(\omega t - \phi + \tfrac{\pi}{2}) \tag{5}$$

Neste caso a corrente elétrica i(t), *está atrasada* de $\phi = \pi/2$ com relação à tensão $V_L(t)$.

Na equação (5), L é a indutância do indutor, relacionada por:

$$V_L = L\frac{di}{dt} \tag{6}$$

A reatância indutiva é definida como:

$$X_L = \omega L. \tag{7}$$

- **Para um elemento capacitivo isolado, V_C tem a forma:**

$$V_C = \frac{i_m}{\omega C}\mathrm{sen}(\omega t - \phi - \frac{\pi}{2}) \tag{8}$$

Neste caso a corrente elétrica i(t), *está adiantada* de $\phi = \pi/2$ com relação à tensão $V_C(t)$.

Na equação (8), a reatância capacitiva é definida como:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \tag{9}$$

Substituindo as equações (4), (5) e (8), na equação, na equação (3), obtém-se a equação:

$$U_m \mathrm{sen}\omega t = i_m R \mathrm{sen}(\omega t - \phi) + i_m X_L \mathrm{sen}\left(\omega t + \phi - \tfrac{\pi}{2}\right) + i_m X_C \mathrm{sen}(\omega t - \phi - \tfrac{\pi}{2}) \tag{10}$$

Que após algumas manipulações trigonométricas é reduzida a:

$$U_m \mathrm{sen}\omega t = i_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}\, \mathrm{sen}\omega t \tag{11}$$

A corrente máxima (i_m) no circuito é obtida diretamente por:

$$i_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \tag{12}$$

Assim, a grandeza:

$$Z = \frac{U_m}{i_m} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \tag{13}$$

é denominada de *impedância* no circuito RLC em série.

Observa-se que a impedância no circuito possui característica de resistência elétrica, mas adquire valores diferentes, para frequências angulares (ω) distintas.

É possível regular a frequência (f) da fonte, onde o valor da corrente (i_m) no circuito adquire seu valor máximo. Esta frequência, denominada de *frequência de ressonância* (f) é uma característica do circuito, que depende exclusivamente dos valores escolhidos para a indutância e capacitância. Obtém-se o valor da freqüência de ressonância diretamente da equação (13), na condição em que a amplitude da corrente é máxima. Isto ocorre quando:

$$X_L = X_C \quad \Longrightarrow \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \Longrightarrow \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{14}$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{15}$$

Uma forma experimental de se analisar a ressonância, é observar por meio de um osciloscópio, quando as amplitudes das tensões no capacitor (V_{Cm}) e no indutor (V_{Lm}) se igualam.

Outra forma de se analisar um circuito RLC em série, é através do *diagrama de fasores* (Figura 2), as equações (1), (2), (4), (5) e (8) para U(t), i(t), V_R(t), V_L(t) e V_C(t) respectivamente.

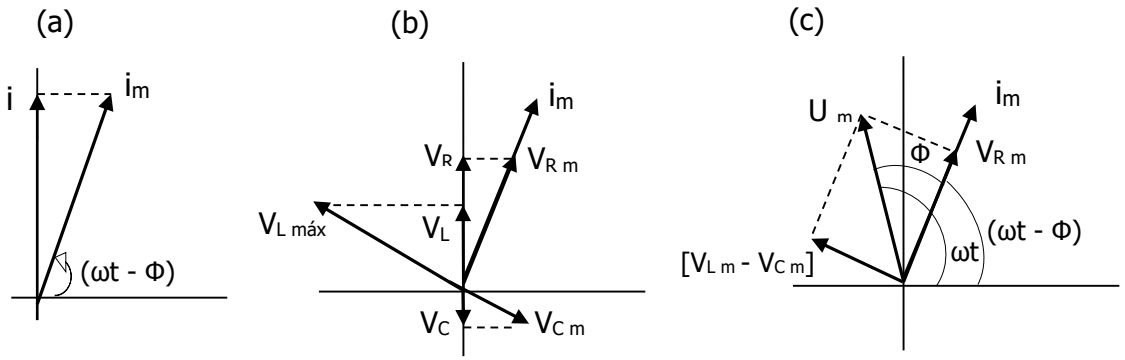


Figura 2 –(a) Um fasor representando a corrente alternada em um circuito RLC em série. (b) Fasores representando a tensão oscilante entre os terminais do resistor, do indutor e do capacitor. Note que, em relação à corrente, a tensão no resistor está em fase, no indutor está adiantado de π/2, e no capacitor está atrasado de π/2. (c) Foi adicionado um fasor representando a tensão alternada da fonte e sua relação fasorial com V_R, V_L e V_C.

Na Figura 2(a), representa-se o fasor de corrente elétrica do circuito e, na Figura 2(b), os fasores para cada componente do circuito. Na Figura 2(c), representa-se cada fasor com sua fase, em relação à corrente. Conforme o tempo passa, cada fasor descreve círculos com relação à origem. A projeção

destes fasores no eixo vertical, em qualquer intervalo de tempo, fornecem as equações trigonométricas exatas de corrente e tensão, para cada componente do circuito.

Analisando a Figura 2(c), obtém-se:

$$U_m = \sqrt{V_{R\,m}{}^2 + (V_{L\,m} - V_{C\,m})^2}$$

$$= \sqrt{(i_m R)^2 + (i_m X_L - i_m X_C)^2}$$

$$U_m = i_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad (16)$$

Um circuito RLC pode ter características resistiva, indutiva ou capacitiva, dependendo se a tensão da fonte está em fase, adiantada ou atrasada com relação à fonte. Abaixo um resumo destas condições:

O ângulo de fase ϕ é dado por:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right) \qquad (17)$$

- Se $\phi > 0$, o circuito é *indutivo* e a tensão está *adiantada* em relação à corrente.
- Se $\phi < 0$, o circuito é *capacitivo* e a tensão está *atrasada* em relação à corrente.
- Se $\phi = 0$, o circuito é *resistivo* e diz-se que a corrente e a tensão *estão em fase*. Nesta condição, $X_L = X_C$, o que implica em $V_L = V_C$, que é a condição de ressonância.
- O circuito será puramente indutivo se a frequência, f, da fonte de tensão CA for muito maior que a freqüência de ressonância e, será puramente capacitivo, se f adquirir um valor muito menor que a frequência de ressonância.

Medidas em Corrente Alternada.

Geralmente os voltímetros e amperímetros medem tensão eficaz e corrente eficaz, ao invés de tensão máxima V_m ou corrente máxima i_m. O valor eficaz i_{ef}, ou valor médio quadrático de uma corrente alternada, é a corrente capaz de dissipar a mesma quantidade de calor numa resistência ôhmica, produzida por uma corrente contínua i, em um mesmo intervalo de tempo, sendo definida matematicamente por:

$$i_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} \qquad (18)$$

Onde $T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$ é o período de oscilação da corrente alternada do tipo:

$$i(t) = i_m (\text{sen}\omega t - \phi)$$

O valor eficaz da corrente alternada está relacionado com o valor máximo i_m, pela equação:

$$i_{ef} = \frac{i_m}{\sqrt{2}} \tag{19}$$

Da mesma forma, a tensão eficaz alternada é:

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \tag{20}$$

Para simplificar a notação, representa-se V_{ef} e i_{ef} por V e i. Nesta notação simplificada, impedância pode ser definida como:

$$Z = \frac{V}{i} \tag{21}$$

8.4 Procedimentos Experimentais

1. Faça a leitura nominal (ou meça) os valores da resistência (R ± ΔR), da capacitância (C ± ΔC) e da indutância (L ± ΔL) dos componentes usados. Anote os dados na Tabela 1:
2. Monte um circuito RLC em série alimentada pelo gerador de sinais. Selecione a tensão senoidal.
3. Utilize os três métodos a seguir para obter a frequência de ressonância (f_o) do circuito RLC série:

   MÉTODO I: Utilizando apenas um canal do osciloscópio, varie a frequência de alimentação até encontrar a situação em que a amplitude da tensão no resistor (V_{Rm}) passa por um máximo. Use escalas adequadas no osciloscópio para melhor observação. Anote o valor da frequência obtida no Quadro 1.

   MÉTODO II: Conecte o canal 1 do osciloscópio na fonte e o canal 2 no resistor. Meça as formas de onda das tensões e localize a frequência em estas se encontram em fase. Use escalas adequadas no osciloscópio para melhor observação. Anote o valor obtido no Quadro 1.

   MÉTODO III: Conecte aos canais 1 e 2 do osciloscópio as tensões no indutor e no capacitor e localize a frequência em que as amplitudes de tensão se igualam. Anote o valor obtido no Quadro 1.
4. Faça uma varredura em frequências em torno de f_o, variando a frequência da tensão alimentadora desde valores bem abaixo de f_o até valores bem acima de f_o. Meça diretamente na tela do osciloscópio os valores das amplitudes V_{Cm} e V_{Lm}. Use um multímetro digital para medir a tensão eficaz no resistor ($VR_{eficaz} = {V_{Rm}}/{\sqrt{2}}$). Anote os dados na Tabela 2:

8.5 O que Incluir no Relatório do Experimento

- Escreva uma expressão para as amplitudes de tensão no resistor (V_{Rm}), no capacitor (V_{Cm}) e no indutor (V_{Lm}). Estas expressões devem estar em termos de R, ω, U_m, C e L.
- Apresente os valores experimentais obtidos de frequência de ressonância, de acordo com os três métodos utilizados no item 3 da parte procedimento experimental. Compare estes valores com aquele obtido diretamente dos valores nominais de C e L.
- Monte um gráfico mostrando as variações de V_{Cm}, V_{Lm} e V_{Rm} em função de f. Inclua neste gráfico, a impedância do circuito RLC série, usando os valores nominais de L, C e R. Comente o comportamento da impedância próximo a frequência de ressonância.
- Obtenha a partir deste gráfico um valor para a frequência de ressonância do circuito RLC série. Compare este valor com aquele obtido a partir dos valores nominais de L e C e com os valores obtidos diretamente do osciloscópio e do multímetro.

8.6 Questões a Serem Discutidas no Relatório do Experimento

1. Qual o significado físico do fenômeno de ressonância? Explique comparando com o fenômeno similar que ocorre em diversos sistemas mecânicos.
2. Imagine que alguém lhe entregue um capacitor (ou um indutor) e lhe peça para determinar experimentalmente o valor de sua capacitância (ou indutância). Explique como os procedimentos utilizados nessa experiência podem ser aplicados para essa finalidade.
3. Como se pode concluir, num circuito RLC série, se a frequência de uma tensão senoidal aplicada está acima ou abaixo da frequência de ressonância?
4. Deduza as equações (11) e (12).
5. A potência média dissipada em um circuito RLC série pode ser escrita como:

$$P_{méd} = \frac{1}{2} U_m I_m cos\phi$$

Sendo o termo $cos\phi$ chamado de *fator de potência*. Quanto menor for o ângulo de fase ϕ (entre a tensão aplicada e a corrente), mais resistivo será o circuito e maior a taxa de transferência de energia da fonte para o resistor. Explique que parâmetros podem ser ajustados na prática para se obter um valor ideal para o ângulo de fase.

FOLHA DE DADOS EXPERIMENTAIS

Experimento 8: Circuito RLC e Ressonância

Tabela 1- Valores da resistência ($R \pm \Delta R$), da capacitância ($C \pm \Delta C$) e da indutância ($L \pm \Delta L$).

($R \pm \Delta R$)	
($C \pm \Delta C$)	
($L \pm \Delta L$)	

Quadro 1 - Valor obtido de frequência de ressonância usando o método 1.

MÉTODO I: $f_o \pm \Delta f_o$ =
MÉTODO II: $f_o \pm \Delta f_o$ =
MÉTODO III: $f_o \pm \Delta f_o$ =

Tabela 2 – Valores medidos de frequências, amplitudes da tensão no indutor e no capacitor e, valores eficazes no resistor.

$f \pm \Delta f$ ( )	$V_{Lm} \pm \Delta V_{Lm}$ ( )	$V_{Cm} \pm \Delta V_{Cm}$ ( )	$V_R^{eficaz} \pm \Delta V_R^{eficaz}$ ( )

Especificações Elétricas dos Multímetros

ICEL MD 5770

Tensão Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200mV	100µV	±(0,5%+1d)
2V	1mV	
20V	10mV	
200V	100mV	
1000V	1V	±(0,8%+2d)

Tensão Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
200mV	100µV	±(1,2%+3d)
2V	1mV	±(1,0%+3d)
20V	10mV	
200V	100mV	
700V	1V	±(1,2%+3d)

Corrente Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
2mA	1µA	±(1,0%+1d)
20mA	10µA	
200mA	100µA	±(1,2%+1d)
20ª	10mA	±(2,0%+5d)

Corrente Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
200mA	100µA	±(2,0%+3d)
20A	10mA	±(3,0%+5d)

Temperatura

Escala	Resolução	Exatidão
de –40º a 400ºC	1ºC	± (1,0%+3d)
de 400º a 1000ºC	1ºC	± (1,5%+3d)

Capacitância

Escala	Resolução	Exatidão
2000pF	1pF	±(2,5%+5d)
20nF	10pF	
200nF	100pF	
2µF	1nF	
20µF	10nF	

Resistência

Escala	Resolução	Exatidão
200Ω	0,1Ω	± (1,0%+3d)
2KΩ	1Ω	± (0,8%+1d)
20KΩ	10Ω	
200KΩ	100Ω	
2MΩ	1KΩ	
20MΩ	10KΩ	± (1,0%+3d)

ICEL MD 1300

Tensão Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200mV	100µV	±(0,5%+2d)
2V	1mV	
20V	10mV	
200V	100mV	
500V	1V	±(0,8%+2d)

Tensão Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
200V	100mV	±(1,2%+10d)
500V	1V	

Corrente Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
2000µA	1µA	±(1,0%+2d)
20mA	10µA	
200mA	100µA	±(1,2%+2d)
10A	10mA	±(2,0%+5d)

Resistência

Escala	Resolução	Exatidão
200Ω	0,1Ω	± (0,8%+5d)
2KΩ	1Ω	± (0,8%+2d)
20KΩ	10Ω	
200KΩ	100Ω	
20MΩ	10KΩ	± (1,0%+5d)
200MΩ	100KΩ	± (5,0%(-10)+10d)

ICEL IK 1500

Tensão Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200mV	100µV	±(0,5%+1d)
2V	1mV	
20V	10mV	
200V	100mV	
1000V	1V	±(0,8%+2d)

Tensão Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
2V	100µV	± (0,8%+3d)
20V	1mV	
200V	10mV	
750V	1V	±(1,2%+3d)

Corrente Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200µA	0,1µA	± (0,8%+3d)
2mA	1µA	
20mA	10µA	
200mA	100µA	± (1,2%+1d)
20ª	10mA	± (2,0%+5d)

Corrente Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
2mA	1µA	± (1,2%+3d)
20mA	10µA	
200mA	100µA	± (1,8%+3d)
20A	10mA	± (3,0%+7d)

Resistência

Escala	Resolução	Exatidão
200Ω	0,1Ω	± (0,8%+3d)
2KΩ	1Ω	± (0,8%+1d)
20KΩ	10Ω	
200KΩ	100Ω	
2MΩ	1KΩ	
20MΩ	10KΩ	± (1,0%+2d)

HIKARI HM 1000

Tensão Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200mV	100µV	±(1,0%+2d)
2000mV	1mV	
20V	10mV	
200V	100mV	
600V	1V	±(1,2%+2d)

Tensão Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
200V	100mV	±(1,5%+10d)
600V	1V	

Corrente Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200µA	100nA	±(1,2%+2d)
2000µA	1µA	
20mA	10µA	
200mA	100µA	
10A	10mA	±(2,0%+2d)

Resistência

Escala	Resolução	Exatidão
200Ω	0,1Ω	± (1,2%+2d)
2000Ω	1Ω	
20kΩ	10Ω	
200kΩ	100Ω	
2000kΩ	1kΩ	± (1,5%+2d)

MINIPA 1002

Tensão Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200mV	100µV	±(0,5%+5d)
2000mV	1mV	±(0,8%+5d)
20V	10mV	
200V	100mV	
600V	1V	

Tensão Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
200V	100mV	±(1,2%+10d)
600V	1V	

Corrente Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200µA	100nA	±(1,0%+5d)
2000µA	1µA	
20mA	10µA	
200mA	100µA	±(1,2%+5d)
10A	10mA	±(2,0%+5d)

Resistência

Escala	Resolução	Exatidão
200Ω	100mΩ	± (1,0%+5d)
2000Ω	1Ω	± (0,8%+5d)
20kΩ	10Ω	
200kΩ	100Ω	
2000kΩ	1kΩ	± (1,5%+5d)

MD 6115

Tensão Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200mV	0,1mV	±(0,5%+1d)
2V	1mV	
20V	10mV	
200V	100mV	
1000V	1V	±(0,8%+2d)

Tensão Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
2V	1mV	±(0,8%+3d)
20V	10mV	
200V	100mV	
750V	1V	±(1,2%+3d)

Corrente Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
20mA	10µA	± (1,5%+1d)
200mA	100µA	
10A	10mA	± (2,0%+5d)

Corrente Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
2mA	1µA	± (1,0%+3d)
200mA	0,1mA	± (1,8%+3d)
10A	10mA	± (3,0%+7d)

Temperatura

Escala	Resolução	Exatidão
de –20° a 0°C	1°C	± (5%+4d)
de 1° a 400°C		± (1,0%+3d)
de 401° a 1000°C		± (2,0%)

Resistência

Escala	Resolução	Exatidão
200Ω	0,1Ω	± (0,8%+3d)
2KΩ	1Ω	± (0,8%+1d)
20KΩ	10Ω	
2MΩ	1KΩ	
20MΩ	10KΩ	± (1,0%+2d)
200MΩ	0,1MΩ	± (5,0%-10d)+10

Capacitância

Escala	Resolução	Exatidão
20nF	10pF	±(4,0%+3d)
200nF	0,1nF	
2µF	1nF	
20µF	10nF	

HIKARI HA-300

Tensão Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200mV	0,1mV	±(1,0%+2d)
20V	0,01mV	
200V	0,1V	
1000V	1V	

Tensão Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
200V	0,1V	± (1,0%+4d)
750V	1V	

Corrente Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
20A	0,01A	± (2,0%+5d)
200A	0,1A	
1000A	1A	± (2,0 % + 5D) < 800A
		± (3,0 % + 5D) >800A

Resistência

Escala	Resolução	Exatidão
200Ω	0,1Ω	± (1,0%+2d)
2kΩ	1Ω	
20kΩ	10Ω	
200kΩ	100Ω	
2MΩ	1kΩ	

Capacímetro MC 153

Capacitância

Escala	Resolução	Exatidão
200pF	0,1pF	± (0,5%+7)
2nF	1pF	± (0,5%+5)
20nF	10pF	
200nF	100µF	
2µF	1000µF	
20µF	0,01µF	
200µF	0,1µF	
2000µF	1µF	± (2,0%+5)
20000µF	10µF	± (3,0%+10)

Multimeter EXTECH 410

Tensão Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200mV	0,1mV	±(0,3%+2d)
2V	0,001V	±(0,5%+2d)
200V	0,1V	
1000V	1V	±(0,8%+2d)

Tensão Alternada

Escala	Resolução	Exatidão	
		50 a 400Hz	400Hz a1kHz
2V	0,001V	±(1,0%+6d)	±(2,0%+8d)
200V	0,1V	±(1,5%+6d)	±(2,5%+8d)
750V	1V	±(2,0%+6d)	±(3,0%+8d)

Corrente Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200µA	0,1µA	±(1,5%+3d)
200mA	0,1mA	
20A	0,01A	±(2,5%+3d)

Corrente Alternada

Escala	Resolução	Exatidão	
		50 a 400Hz	400Hz a1kHz
200mA	0,1mA	±(1,8%+8d)	±(2,5%+10d)
20A	0,01A	±(3,0%+8d)	±(3,5%+10d)

Temperatura

Escala	Resolução	Exatidão
-4 a 1382°F	1°F	± (3,0%+3d)
-20 a 750°C	1°C	

Resistência

Escala	Resolução	Exatidão
200Ω	0,1Ω	± (0,8%+4d)
2000Ω	1Ω	± (0,8%+2d)
20kΩ	0,01kΩ	
200kΩ	0,1kΩ	± (1,0%+2d)
20MΩ	0,01MΩ	± (2,0%+5d)

Luxímetro ICEL LD 520

Função	Escala	Resolução	Exatidão
Lux	2000 Lux	1 Lux	±5% + 4dig.
	20000 Lux	10 Lux	

DT 830B

Tensão Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200mV	0,1mV	±(0,5%+2d)
2000mV	1mV	
20V	10mV	
200V	100mV	
1000V	1V	±(0,8%+2d)

Tensão Alternada

Escala	Resolução	Exatidão
200V	100mV	±(1,2%+10d)
750V	1V	±(1,2%+10d)
Resposta em Frequência: de 45 a 450Hz		
Forma de Onda: Senoidal		

Corrente Contínua

Escala	Resolução	Exatidão
200µA	0,1µA	±(1,0%+2d)
2000µA	1µA	
20mA	0,01mA	
200mA	0,1mA	±(1,5%+2d)
10A	10mA	±(3,0%+2d)

Resistência

Escala	Resolução	Exatidão
200Ω	0,1Ω	± (0,8%+3d)
2000Ω	1Ω	± (0,8%+2d)
20kΩ	10Ω	
200kΩ	100Ω	
2000kΩ	1kΩ	± (1,0%+2d)

NOTA: As especificações de precisão consistem em dois elementos:
- (% de leitura) - Esta é a precisão do circuito de medição.
- (+ dígitos) - Esta é a precisão do conversor analógico para digital.

True RMS – Modelo POL 76

Tensão DC

- Faixas: 200mV, 2V, 20V, 200V, 1000V
- Precisão: 200mV ~ 200V ± (0.5%+3D); 1000V ± (1.0%+5D)
- Resolução: 100µV, 1mV, 10mV, 100mV, 1V
- Impedância de Entrada: 10MΩ
- Proteção de Sobrecarga: 250V DC/pico AC p/ outras faixas; 1000V DC/pico AC p/ outras faixas

Tensão AC

- Faixas: 200mV, 2V, 20V, 200V, 750V
- Precisão: 200 mV ± (1.2%+3D); 2V ~ 200V ± (0.8%+5D); 1000V ± (1.2%+5D)
- Resolução: 1µV, 1mV, 10mV, 100mV, 1V
- Impedância de Entrada: 1MΩ p/ faixas de 200mV e 2V; 10MΩ p/ outras faixas
- Resposta em Freqüência: 40Hz a 100Hz p/ faixa 700V; 40Hz a 400Hz p/ outras faixas
- Proteção de Sobrecarga: 250V DC/pico AC p/ faixa de 200mV; 1000V DC/pico AC p/ outras faixas

Corrente DC

- Faixas: 200µA, 2mA, 20mA, 200mA, 20A
- Precisão: 200µA, 2mA ~ 20mA ± (0.8%+3D); 200mA ± (1.2%+4D); 20A ± (2.0%+5D)
- Resolução: 1µA, 10µA, 100µA, 10mA
- Queda de Tensão: 200mV (Máximo)
- Proteção de Sobrecarga: Fusível de Ação Rápida 0.2A/250V; para a Entrada mA. Sem Fusível para Entrada 20A (20A máximo por 10 segundos)

Corrente AC

- Faixas: 200µA, 2mA, 20mA, 200mA, 20A
- Precisão: 200µA, 2mA ~ 20mA ± (1.0%+5D); 200mA ± (2.0%+5D); 20A ± (3.0%+10D)
- Resolução: 1µA, 10µA, 100µA, 10mA
- Queda de Tensão: 200mV (Máximo)
- Resposta em Freqüência: 40Hz a 200Hz
- Proteção de Sobrecarga: Fusível de Ação Rápida 0.2A/250V; para a Entrada mA. Sem Fusível para Entrada 20A (20A máximo por 10 segundos)

Resistência

- Faixas: 200Ω, 2k Ω, 20kΩ, 200kΩ, 2MΩ, 20MΩ, 200MΩ
- Precisão: 200Ω ± (0.8%+5D); 2kΩ ~ 2MΩ ± (0.8%+3D); 20MΩ ± (1.0%+15D); 2000MΩ ±[5% (Leit. -10D)+20D]
- Resolução: 0.1Ω, 1Ω, 10Ω, 100Ω, 1kΩ, 10kΩ, 1MΩ
- Tensão de Circuito Aberto: < 3V
- Proteção de Sobrecarga: 250V DC / AC RMS

Indutância

- Faixas: 2mH, 20mH, 200mH, 2H, 20H
- Precisão: 2mH ~ 20H ± (2.5%+20D)
- Resolução: 1µH, 10µH, 100µH, 1mH, 10mH
- Freqüência de Teste: 1.6kHz para a faixa 2mH; 180Hz para as outras faixas
- Tensão de Teste: Aprox. 5Vpp
- Proteção de Sobrecarga: 36V AC RMS

Freqüência

- Faixas: 10Hz, 2kHz, 20kHz, 200kHz, 2000kHz, 10MHz
- Precisão: 2kHz ~ 10MHz ± (0.5%+4D)
- Resolução: 1Hz, 10Hz, 100Hz, 1kHz, 10kHz
- Sensibilidade de Entrada: 1.0V
- Proteção de Sobrecarga: 250V DC / AC RMS

Capacitância

- Faixas: 20nF, 200nF, 2µF, 20µF, 2000µF
- Precisão: 20nF ~ 20µF ± (2.5%+20D); 200µF ± (5.0%+5D)
- Resolução: 10pF, 100pF, 1nF, 10nF, 100nF
- Freqüência de Teste: 180Hz
- Tensão de Teste: Aprox. 10mVpp para a faixa 200µF; Aprox. 100mVpp para as outras faixas
- Proteção de Sobrecarga: 36V AC RMS

Temperatura

- Faixa: -40ºC ~ 400ºC, 400ºC ~ 1000ºC
- Precisão: -40ºC ~ 400ºC ± (0.8%+4D); 400ºC ~ 1000ºC ± (1.5%+15D)
- Resolução: 1ºC
- Tipo de Sensor: Termopar Tipo K (Conector Banana)
- Proteção de Sobrecarga: 25V AC RMS

Teste de hFE

- Faixa: 0 ~ 1000
- Ib: 10µA
- Vce: 3V DC

Diodo

- Indicação: Queda de Tensão Direta Aproximada sobre o Diodo
- Resolução: 0,001V
- Tensão de Teste: 3.0V DC
- Corrente de Teste: 1,0mA
- Proteção de Sobrecarga: 250V DC / AC RMS

Continuidade

- Indicação: Sonora
- Limiar: Um sinal sonoro é emitido quando a resistência medida estiver abaixo de 70Ω ±20Ω
- Tensão de Teste: 3.0V DC
- Proteção de Sobrecarga: 250V DC / AC RMS

Acessórios

- Par de Pontas de Prova (Vermelho e Preta)
- Manual de Instruções
- Bateria (Instalada)
- Holster Protetor (Instalado)
- Termopar

Bibliografia

- ✓ Apostila de física experimental da UFES, Centro de Ciências Exatas, Goiabeiras – ES.
- ✓ Física 4. Halliday, Resnick e Krane. 4ª edição. Editora LTC, Rio de janeiro RJ (1996).
- ✓ Ótica, Relatividade, Física Quântica. H. Moysés Nussenzveig. 4ª edição. Editora Blucher, São Paulo SP (2011).
- ✓ Lei de Malus e Lei Fotométrica da distância. Física experimental IV. Centro de Ciências da Natureza, Departamento de Física (Prof. Angel Alberto Hidalgo).
- ✓ Física 4. Halliday, Resnick e Krane. 4ª edição. Editora LTC, Rio de janeiro RJ (1996).
- ✓ Difração da luz por fendas Hugo L. Fragnito e Antonio C. Costa. Unicamp – IFGW, Março de 2010.
- ✓ Ótica, Relatividade e Física Quântica. Moysés Nussenzveig. 4ª edição. Editora Blucher, São Paulo SP (2011).