

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*



# Física Experimental II

## Manual de Experimentos

Temas: Ótica, Eletricidade e Magnetismo

Disciplinas: CF0064 Física Experimental II  
CF0116 Física Experimental II

Turmas: Graduação em Engenharias

Física Experimental II  
Reprodução Proibida

*Prof. Dr. Mauro Gomes Rodbard  
Prof. Dr. Sérgio Meister Berleze  
Prof. Dr. Carlos de Carvalho  
Prof. Dr. Dietmar William Foryta  
Universidade Federal do Paraná  
Departamento de Física*

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*

---

---

## Sumário

---

---

Introdução . . . . .	1
1 Estrutura e Funcionamento dos Laboratórios . . . . .	1
2 Cronograma do Semestre: Física Experimental II . . . . .	2
3 Avaliação . . . . .	2
4 Endereço Eletrônico da Disciplina . . . . .	3
 BLOCO I ÓTICA . . . . .	 5
1 Reflexão e Refração da Luz . . . . .	7
1.1 Objetivos . . . . .	7
1.2 Material Utilizado . . . . .	7
1.3 Bibliografia . . . . .	7
1.4 Roteiro de Estudo . . . . .	8
1.5 Procedimento Experimental . . . . .	8
1.6 Análise de Resultados . . . . .	12
2 Instrumentos Óticos . . . . .	15
2.1 Objetivos . . . . .	15
2.2 Material Utilizado . . . . .	15
2.3 Bibliografia . . . . .	15
2.4 Roteiro de Estudo . . . . .	15
2.5 Procedimento Experimental . . . . .	18
2.6 Análise de Resultados . . . . .	22
3 Polarização da Luz . . . . .	25
3.1 Objetivos . . . . .	25
3.2 Material Utilizado: . . . . .	25
3.3 Bibliografia . . . . .	25
3.4 Roteiro de Estudo . . . . .	25
3.5 Procedimento Experimental . . . . .	27
3.6 Análise de Resultados . . . . .	29

4	Difração e Interferência da Luz . . . . .	31
4.1	Objetivos . . . . .	31
4.2	Material Utilizado . . . . .	31
4.3	Bibliografia . . . . .	31
4.4	Roterio de Estudos . . . . .	31
4.5	Procedimento Experimental . . . . .	32
4.6	Análise de Resultados . . . . .	36
BLOCO II ELETRICIDADE . . . . .		41
	Introdução aos Instrumentos de Medidas Elétricas. . . . .	43
1	Multímetro . . . . .	43
2	Modo de Uso do Multímetro . . . . .	44
3	Modo de Operação do Multímetro marca Agilent . . . . .	46
4	Tomadas . . . . .	47
5	Fontes de Alimentação . . . . .	48
6	Atividades Práticas: Medida da ... . . . .	49
7	Questões . . . . .	53
5	Superfícies Equipotenciais e Campos Elétricos. . . . .	55
5.1	Objetivos . . . . .	55
5.2	Material Utilizado . . . . .	55
5.3	Bibliografia . . . . .	55
5.4	Roteiro de Estudo . . . . .	55
5.5	Procedimento Experimental . . . . .	56
5.6	Análise de Resultados . . . . .	58
5.7	Apêndice . . . . .	59
6	Elementos Ôhmicos e não-Ôhmicos . . . . .	63
6.1	Objetivos . . . . .	63
6.2	Material Utilizado . . . . .	63
6.3	Bibliografia . . . . .	63
6.4	Roteiro de Estudo . . . . .	63
6.5	Procedimento Experimental . . . . .	64
6.6	Análise de Resultados . . . . .	66
7	Comportamento de Fontes de Tensão em Função da Corrente. . . . .	69
7.1	Objetivos . . . . .	69
7.2	Material Utilizado . . . . .	69
7.3	Bibliografia . . . . .	69
7.4	Roteiro de Estudo . . . . .	69
7.5	Procedimento Experimental . . . . .	70
7.6	Análise de Resultados . . . . .	72



BLOCO III	ELETROMAGNETISMO . . . . .	75
	Osciloscópio, Constante de Tempo e Diferença de Fase . . . . .	77
1	Operação (Modelo HP 54600b). . . . .	77
2	Realizando Medidas . . . . .	79
3	Procedimento Experimental . . . . .	82
8	Força Magnética sobre Condutores de Corrente . . . . .	87
8.1	Objetivos . . . . .	87
8.2	Material Utilizado . . . . .	87
8.3	Bibliografia . . . . .	87
8.4	Roteiro de Estudo . . . . .	87
8.5	Descrição do Experimento . . . . .	88
8.6	Procedimento Experimental . . . . .	88
8.7	Análise de Resultados . . . . .	92
9	Indução Magnética . . . . .	95
9.1	Objetivos . . . . .	95
9.2	Material Utilizado . . . . .	95
9.3	Bibliografia . . . . .	95
9.4	Roteiro de Estudo . . . . .	95
9.5	Descrição do Experimento . . . . .	96
9.6	Procedimento Experimental . . . . .	96
9.7	Análise de Resultados . . . . .	101
10	Circuitos RC e RLC no Regime Transitório . . . . .	103
10.1	Objetivos . . . . .	103
10.2	Material Utilizado . . . . .	103
10.3	Bibliografia . . . . .	103
10.4	Roteiro de Estudo . . . . .	103
10.5	Procedimento Experimental . . . . .	105
10.6	Análise de Resultados . . . . .	108
11	Circuitos RC e RLC no Regime Senoidal Permanente . . . . .	111
11.1	Objetivos . . . . .	111
11.2	Material Utilizado . . . . .	111
11.3	Bibliografia . . . . .	111
11.4	Roteiro de Estudo . . . . .	112
11.5	Procedimento Experimental . . . . .	112
11.6	Análise de Resultados . . . . .	116
	Apêndice . . . . .	119

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*

---

---

# Introdução

---

---

A aprendizagem dos conceitos básicos da Física é melhor desenvolvida quando se utilizam metodologias em que os fenômenos sejam apresentados em experiências simples de laboratório.

Porém, desenvolver os conceitos em laboratório não é tão simples. Necessita-se isolar o fenômeno, para que fique explícito o conceito a desenvolver. Para isto foi preparado este conjunto de experimentos com o objetivo de apresentar alguns dos conceitos básicos de eletromagnetismo e óptica.

Nesta disciplina são utilizados alguns equipamentos desenvolvidos mais recentemente e outros já utilizados há mais de um século com o mesmo fim, ou seja, fazer com que sejam entendidos alguns dos conceitos básicos do eletromagnetismo e da óptica.

Para que essa metodologia de curso, composto de 12 semanas com 2 horas de aula semanais, tenha êxito é necessário como contrapartida dos alunos iniciativa, criatividade e responsabilidade.

Os objetivos da disciplina são os seguintes:

- Desenvolver a capacidade de compreensão dos fenômenos físicos a partir das atividades experimentais.
- Disciplinar as anotações de um evento experimental de forma clara e objetiva.
- Analisar e discutir os experimentos realizados, bem como seus resultados.
- Ampliar a capacidade de apresentar um relatório de um evento experimental.
- Aprimorar a crítica com relação à comparação entre os resultados experimentais obtidos e os modelos teóricos do fenômeno estudado.

## 1. Estrutura e Funcionamento dos Laboratórios

As seguintes regras deverão ser observadas, com o objetivo de se obter a maior eficiência do laboratório e, consequentemente, um melhor aproveitamento por parte dos alunos.

- Cada turma comportará, no máximo, 12 alunos.
- Cada laboratório manterá 4 bancadas experimentais disponíveis.
- Em cada bancada, trabalhará um grupo de no máximo 3 alunos e no mínimo 2.
- Os grupos serão identificados por G1, G2,..., G4 e a programação dos experimentos, por semana, é feita no início do semestre. No cronograma semestral estão estabelecidos os experimentos que serão feitos em cada semana.
- Nos roteiros de experiência, há um item denominado “Roteiro de Estudo”. As questões apresentadas deverão ser respondidas antes de cada aula, pois corresponde a uma preparação para a realização do experimento.
- A tolerância para o ingresso do aluno no laboratório será no máximo de 10 minutos.
- Alunos que justificarem a falta ou atraso, de acordo com as normas previstas no regimento da UFPR, poderão fazer o experimento, condicionado à disponibilidade de tempo de laboratório e equipamentos.
- Cada grupo deve ter disponível, em cada aula, um pendrive ou um disquete, para gravar resultados de medidas e gráficos.

Módulo I	Semana			
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>
	06/06	13/06*	20/06	27/06
Reflexão e Refração da Luz	G1 a G4	G5 a G8		
Instrumentos Óticos	G5 a G8	G1 a G4		
Polarização da Luz			G1 a G4	G5 a G8
Difração e Interferência da Luz			G5 a G8	G1 a G4
Introdução aos Multímetros	04/07			
Módulo II	Semana			
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	
	11/07	18/07	25/07	
Superfícies Equipotenciais e Campos Elétricos	G1 a G4		G5 a G8	
Elementos Ôhmicos e Não-Ôhmicos	G5 a G8	G1 a G4		
Fontes de Tensão em Função da Corrente		G5 a G8	G1 a G4	
Introdução aos Osciloscópios	01/08			
Módulo III	Semana			
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>
	08/08	15/08	22/8	29/08
Força Magnética sobre Condutores de Corrente	G1 a G4	G5 a G8		
Indução Magnética	G5 a G8	G1 a G4		
Circuitos RC e RLC – Regime Transitório			G1 a G4	G5 a G8
Circuitos RC e RLC – Regime Senoidal Permanente			G5 a G8	G1 a G4

\* Turmas de Quinta e Sexta-feiras farão reposição no dia 25/06.

## 2. Cronograma do Semestre: Física Experimental II

Nos quadros que se seguem estão descritas as atividades mínimas da disciplina Física Experimental II, no período de um semestre. Está prevista a realização de 3 módulos de experimentos. Cada módulo contém um conjunto de experimentos diferentes, sendo que serão disponibilizados conjuntos iguais para cada experimento, perfazendo sempre a ocupação de 8 bancadas.

As datas das aulas referem-se sempre ao início da semana, uma vez que o laboratório tem sua programação prevista por semana.

O Cronograma está disponível na página da disciplina “<https://www.fisica.ufpr.br/cf064/>”.

## 3. Avaliação

### 3.1. Provas escritas

A disciplina terá em seu processo de avaliação, três provas escritas que serão realizadas num horário único para todas as turmas, fora dos horários de aula, cujas datas, horário e local serão publicados no edital da disciplina.

A média aritmética destas três notas terá peso 0,75 na formação da média geral.

### 3.2. Trabalho escrito – Relatório

Será solicitado um relatório por equipe, a ser indicado durante o semestre. O formato será especificado durante o curso.

Esta nota terá peso 0,25 na formação da média geral.

### 3.3. Frequência

A disciplina Física Experimental II tem a carga horária de 30 horas-aula. Para a aprovação é necessário ter 75% de presença. Com presença inferior a 75%, o aluno estará automaticamente reprovado.

O aluno poderá faltar, no máximo, em 03 experiências.

### 3.4. Média Geral e Média Final

$MÉDIA\ GERAL = (Média\ das\ provas\ escritas) \times 0,75 + (Nota\ do\ Relatório) \times 0,25$

## 4. Endereço Eletrônico da Disciplina

<https://www.fisica.ufpr.br/cf064/>

Física Experimental II  
Reprodução Proibida

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*

## BLOCO I

### Ótica

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*



# EXPERIMENTO 1

---

## Reflexão e Refração da Luz

---

### 1.1. Objetivos

- Verificar o princípio de propagação retilínea da luz.
- Verificar a Lei da Reflexão de um feixe de luz por espelhos planos e espelhos cilíndricos
- Verificar a Lei da Refração por um bloco acrílico semicilíndrico.
- Determinar o índice de refração do material do bloco acrílico semicilíndrico.
- Determinar o ângulo limite para Reflexão Interna Total.

### 1.2. Material Utilizado

Banco óptico, fonte de luz, disco graduado “Ray Table Degree Scale” e respectiva base, acessórios tipo fenda única “Slit Mask” e múltipla “Slit Plate” e respectivos suportes para o banco óptico, acessório Anteparo “Viewing Screen”, suporte específico para ser usado sobre o disco graduado, bloco acrílico semi-circular “Cylindrical Lens”, espelho óptico, lente de raios paralelos.

### 1.3. Bibliografia

- “Física”, F. Sears, M. W. Zemansky e H. D. Young; 2a Ed., Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro (1983), Vol. 4, Cap.38 e 39.
- “Física”, P. Tipler, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 2: 4a Ed. Cap.33 e 34; 5a e 6a Ed. Cap. 31 e 32.

Figura 1.1: MONTAGEM BÁSICA PARA OS EXPERIMENTOS DE REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ. Nesta montagem os acessórios de fendas múltiplas e de fenda simples permitem a passagem de um estreito feixe de luz. O feixe de luz, que incide sobre o disco graduado, deve ser alinhado com a linha **Normal** que passa pelo centro do disco. Perceba que o feixe de luz tem uma largura o que dá uma incerteza na hora da medida da posição angular do feixe, seja no de incidência, seja no refletido, ou refratado.

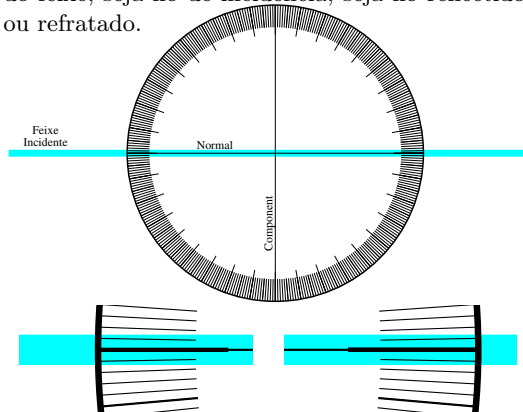
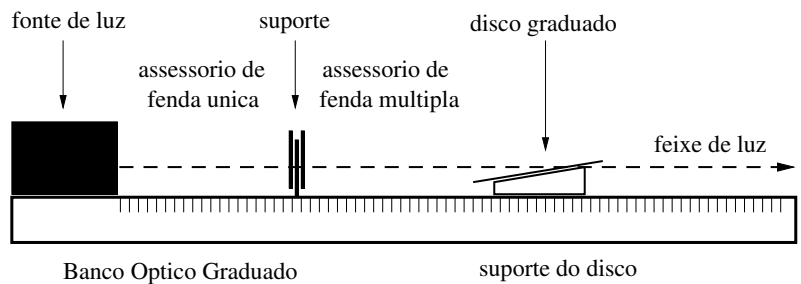


Figura 1.2: INCERTEZA. O feixe de luz utilizado nos experimentos de reflexão e refração de luz é obtido a partir de uma fenda estreita interposta entre a fonte de luz e o disco graduado. Assim a largura projetada do feixe luminoso sobre o disco graduado é uma medida da incerteza sobre o valor medido sobre a graduação no disco. É aceitável atribuir o valor numérico para a incerteza na medida de ângulo como sendo a metade da largura do feixe utilizado. Poderia o feixe ter uma largura diferente na saída? Se sim em que situações?

Tabela 1.1: ESPELHO PLANO. Os valores numéricos, obtidos no estudo da reflexão com espelho plano, devem ser anotados nesta tabela. Lembre-se de anotar a incerteza  $\delta\theta_r$  da medida de  $\theta_r$ .

Espelho Plano		
$\theta_i$ (°)	$\theta_r$ (°)	$\delta\theta_r$ (°)
0		
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		



“Fundamentos de Física”, D. Halliday e R. Resnick, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 4: 6a Ed. Cap.34 e 35; 8a Ed. Cap.33 e 34.

#### 1.4. Roteiro de Estudo

1. Escreva a lei da reflexão.
2. Quais são os dois fatos experimentais descritos na lei da reflexão?
3. Defina refração da luz.
4. Expresse a lei da refração e identifique cada grandeza envolvida.
5. O que é reflexão interna total?
6. Qual é a expressão que define o ângulo limite na reflexão interna total?
7. Para ocorrer reflexão interna total, ao incidir numa interface, a luz deve estar no meio de maior ou menor índice de refração?
8. Cite três situações do cotidiano onde os fenômenos estudados estão envolvidos e são relevantes.

#### 1.5. Procedimento Experimental

##### 1.5.1. Reflexão em Espelhos Planos

- Monte o equipamento conforme as figuras 1.1 e 1.2.
- Ajuste os componentes sobre o banco óptico, tal que um feixe de luz fique alinhado com a reta do disco graduado denominada “NORMAL”. Se for necessário, use o botão que está localizado na parte superior da fonte de luz para alinhar adequadamente o filamento da lâmpada.
- Sobre o disco graduado coloque o Espelho Ótico com a superfície plana voltada para a fonte de luz, conforme a figura 1.3.

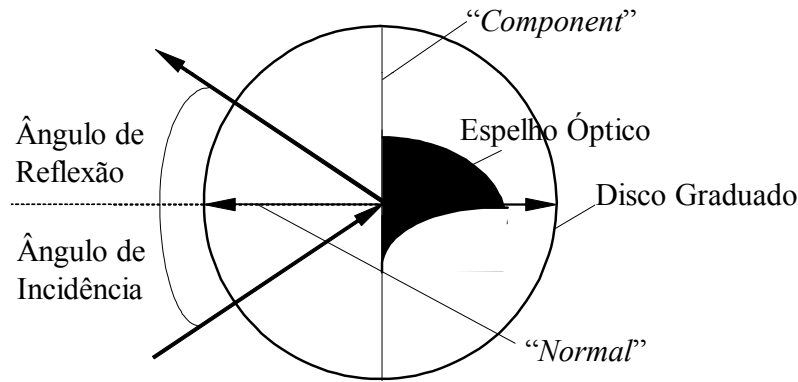


Figura 1.3: REFLEXÃO POR ESPELHOS. Visão superior do disco graduado na montagem experimental referente ao estudo da reflexão por espelhos plano, convexo e côncavo. Perceba que o espelho é alinhado com a direção da linha COMPONENT e perpendicular a linha NORMAL. Como você pode ter certeza que a colocação do espelho foi um sucesso para que se possa verificar a Lei da Reflexão? Enumere as verificações e justifique-as.

- Ajuste a distância do disco ao anteparo para que o feixe de luz não fique nem muito largo (muito próximo ao suporte) nem muito tênue (muito afastado).
- Com cuidado, alinhe a superfície plana do espelho formando um ângulo de  $90^\circ$  com a reta “NORMAL” do disco graduado, ficando completamente alinhada sobre a outra reta do disco, nomeada COMPONENT”.
- Gire o disco graduado e observe o feixe de luz. Meça, com incertezas, os ângulos de incidência e de reflexão com relação à reta “NORMAL”(observe a figura 1.2).
- Preencha a tabela 1.1 com as medidas escritas na forma explícita e responda as questões da Análise de Resultados.

1.5.2. Reflexão em Espelhos Cilíndricos

- Monte o equipamento conforme a figura 1.1.
- Ajuste os componentes sobre o banco óptico, tal que um feixe de luz fique alinhado com a reta do disco graduado denominada “NORMAL”. Se for necessário, use o botão que está localizado na parte superior da fonte de luz para alinhar adequadamente o filamento da lâmpada.
- Sobre o disco graduado coloque o Espelho Ótico com a superfície convexa voltada para a fonte de luz.
- Com cuidado, alinhe a parte central da superfície convexa do espelho formando um ângulo de  $90^\circ$  com a reta “NORMAL” do disco graduado, ficando alinhada tangencialmente com a reta denominada “COMPONENT”.
- Verifique se o ponto de incidência da luz no espelho coincide com o centro do disco graduado.
- Gire o disco graduado e observe o feixe de luz.
- Meça, com incertezas, os ângulos de incidência e de reflexão com relação à reta “NORMAL”. Preencha a primeira parte da tabela 1.2.
- Repita o procedimento para a superfície côncava do espelho cilíndrico. Termine o preenchimento da tabela 1.2.

Tabela 1.2: ESPELHOS CÔNCAVO E CONVEXO. Os valores numéricos, obtidos no estudo da reflexão com espelho plano, devem ser anotados nesta tabela. Lembre-se de anotar a incerteza  $\delta\theta_r$  da medida de  $\theta_r$ . Verifique se este erro permanece constante ou não, qual pode ser a causa desta variação, se ela houver?

Espelho Convexo		
$\theta_i$ (°)	$\theta_r$ (°)	$\delta\theta_r$ (°)
0		
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		
Espelho Côncavo		
$\theta_i$ (°)	$\theta_r$ (°)	$\delta\theta_r$ (°)
0		
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		

- Se o feixe incidente estiver paralelo ao eixo de simetria de um espelho cilíndrico, mas não for coincidente com este eixo, ainda será válida a Lei de Reflexão?
- Responda as questões da Análise de Resultados.

### 1.5.3. Distância Focal de Espelhos Cilíndricos

- Monte o equipamento conforme a figura 1.1, porém, somente com a fenda múltipla, sem a fenda única. Assim você terá então um conjunto de feixes de luz, mas divergentes.
- Coloque a lente de raios paralelos (lente convergente) entre a fonte e a fenda múltipla, ajustando para que todos os feixes fiquem paralelos à linha “NORMAL” do disco graduado.
- Coloque o espelho com a superfície plana alinhada como nas montagens anteriores. Observe os raios refletidos.
- Coloque o espelho com a superfície côncava alinhada como nas montagens anteriores.
- Determine a distância entre o ponto central (vértice) do espelho e o ponto onde os feixes refletidos pelo espelho convergem. Essa distância é denominada distância focal do espelho. Expresse esta medida com sua incerteza e anote na tabela 1.3.
- Repita a operação para o caso do espelho convexo. É importante colocar uma folha de papel entre o espelho e o disco, para marcar o vértice e também dois pontos sobre cada raio. Utilize o prolongamento dos raios para determinar a distância focal. Expresse esta medida com sua incerteza e anote na tabela 1.3.
- Compare geometricamente os raios de curvatura de ambos os espelhos, anote-os na tabela 1.3.

Tabela 1.3: DISTÂNCIA FOCAL. Anote os valores das distâncias focais  $f$ , bem como os raios de curvatura  $R$ , para os espelhos convexo e côncavo que você obteve.

Espelho	$f$ (mm)	$R$ (mm)
Convexo	_____	_____
Côncavo	_____	_____

### 1.5.4. Refração – Lei de Snell

- Monte o equipamento conforme a figura 1.1.
- Ajuste os componentes sobre o banco óptico, tal que um feixe de luz fique alinhado com a reta do disco graduado denominada “NORMAL”. Se for necessário, use o botão que está localizado na parte superior da fonte de luz para alinhar o filamento da lâmpada.
- Coloque o bloco acrílico semi-cilíndrico sobre o disco graduado, conforme a figura 1.4.
- Alinhe a superfície plana do bloco com a linha denominada “COMPONENT” do disco graduado, tal que a reta “NORMAL” seja perpendicular à superfície plana considerada. Verifique se o feixe refratado está saindo a  $0^\circ$ .

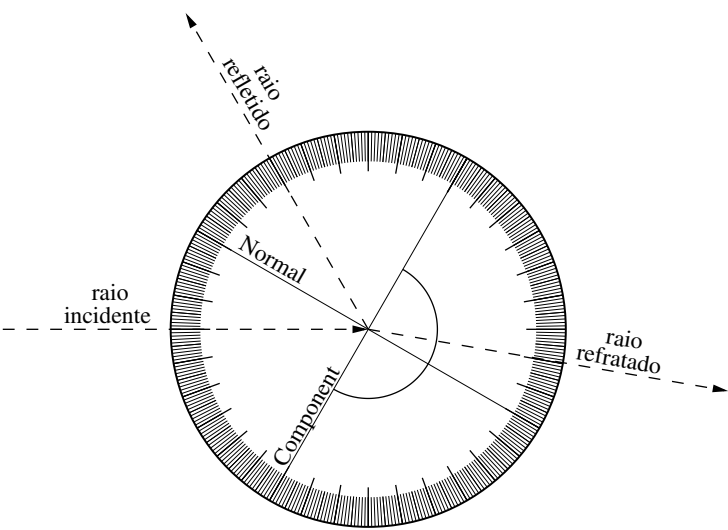


Figura 1.4: Detalhe da montagem experimental da etapa do estudo da Lei de Snell onde se tem a vista superior do disco graduado. Nesta montagem coloca-se um bloco de material acrílico semicilíndrica onde a face plana é ajustada a linha “COMPONENT” do disco graduado. Percebe-se que o raio que é refratado apresenta um ângulo de saída diferente do valor numérico ângulo de incidência. Quais os cuidados que se deve ter com o posicionamento do bloco de acrílico? Existe algum motivo em utilizar um bloco cuja superfície é semicilíndrica? O que acarretaria se esta superfície não fosse semicilíndrica?

- Gire o disco graduado e observe o que ocorre ao feixe de luz.
- Meça os ângulos de incidência e de refração com relação à reta “NORMAL”, observe a figura 1.4.
- Preencha a tabela 1.4 e responda as questões da Análise de Resultados.

1.5.5. Reflexão Interna Total

- Gire o disco, posicionando conforme a seção anterior, de 180° como na figura 1.5.
- Verifique se os ângulos de incidência e de reflexão são consistentes com a lei da reflexão.
- Observe atentamente se ocorre reflexão do feixe incidente para todos os ângulos de incidência.

$\theta_i$ (°)	$\theta_f$ (°)	$\text{sen } \theta_i$	$\text{sen } \theta_f$
0			
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			

Tabela 1.4: LEI DE SNELL. Os valores numéricos obtidos durante a etapa do estudo da Lei de Snell devem ser anotados nesta tabela. Pode-se perceber que os valores dos ângulo de refração não variam linearmente, portanto deve-se determinar uma relação entre estes dois ângulos. Propõe-se que sejam através dos senos dos respectivos ângulos. Seriam estes agora relacionáveis linearmente? Se sim, qual deve ser o coeficiente deste ajuste?

Figura 1.5: REFLEXÃO INTERNA TOTAL. Detalhe da montagem do experimento na etapa do estudo da Reflexão Interna Total. Aqui pode-se perceber que os ângulos de refração são maiores do que os de incidência, fazendo com que o ângulo de refração chegue antes ao valor de 90° do que o ângulo de incidência. Perto deste limite pode-se perceber que o feixe refratado, mas alargado, tem uma borda violeta e a outra borda vermelhada. Utilize um anteparo branco para facilitar a visualização. Qual o significado de haver ângulos de reflexão interna total diferentes para diferentes cores?

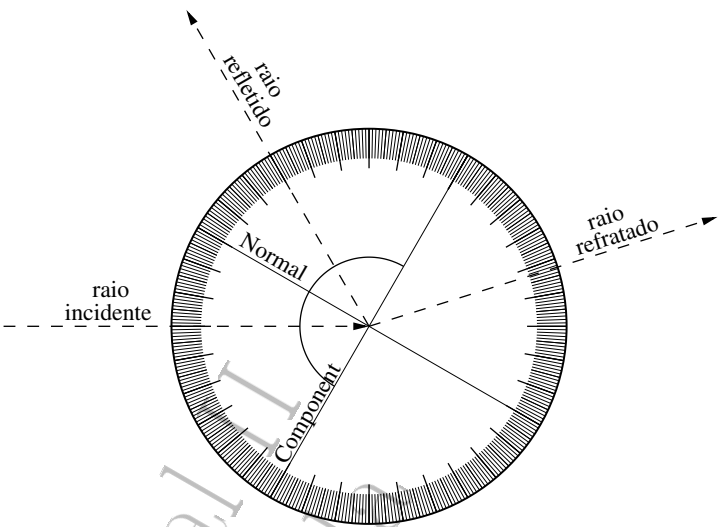


Tabela 1.5: REFLEXÃO INTERNA TOTAL. Observando-se o raio refratado próximo ao ângulo de reflexão interna total pode-se perceber que o desaparecimento das cores ocorrem para diferentes ângulos. Determine os valores numéricos para estes ângulos, bem como determine os índices de refração associados. Cada cor tem um índice de refração diferente para a mesma peça? O que isto significa?

Côr	$\theta$ (°)	$n$
Violeta		
Vermelho		

- Observe atentamente se há refração para todo feixe de luz que incide sobre o bloco. Repita este procedimento para todos os ângulos de incidência possíveis.
- Verifique como varia a intensidade do feixe refletido e refratado com o ângulo de incidência.
- Verifique a partir de qual ângulo de incidência toda a luz é refletida, não ocorrendo qualquer refração. Indique este ângulo na forma explícita.
- Para um ângulo de incidência próximo, porém pouco menor, daquele observado no item anterior, observe o feixe refratado (é possível projetá-lo sobre um anteparo “Viewing Screen”). Verifique a decomposição da luz branca (da fonte) anotando qual cor sofre maior desvio e qual sofre o menor desvio.
- Meça os ângulos de refração para o vermelho e para o violeta e anote-os na tabela 1.5.
- Utilizando a barra cilíndrica de acrílico que simula uma fibra ótica e uma fonte de laser, observe qualitativamente a trajetória do feixe de luz e as diversas reflexões internas.
- Responda as questões da Análise de Resultados.

1.6. Análise de Resultados

1.6.1. Reflexão

- Qual a relação observada entre o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão num espelho plano?
- Como se pode comprovar experimentalmente que o plano de incidência (formado pelo raio incidente e a normal) coincide com o plano de reflexão (formado pelo raio refletido e a normal)?

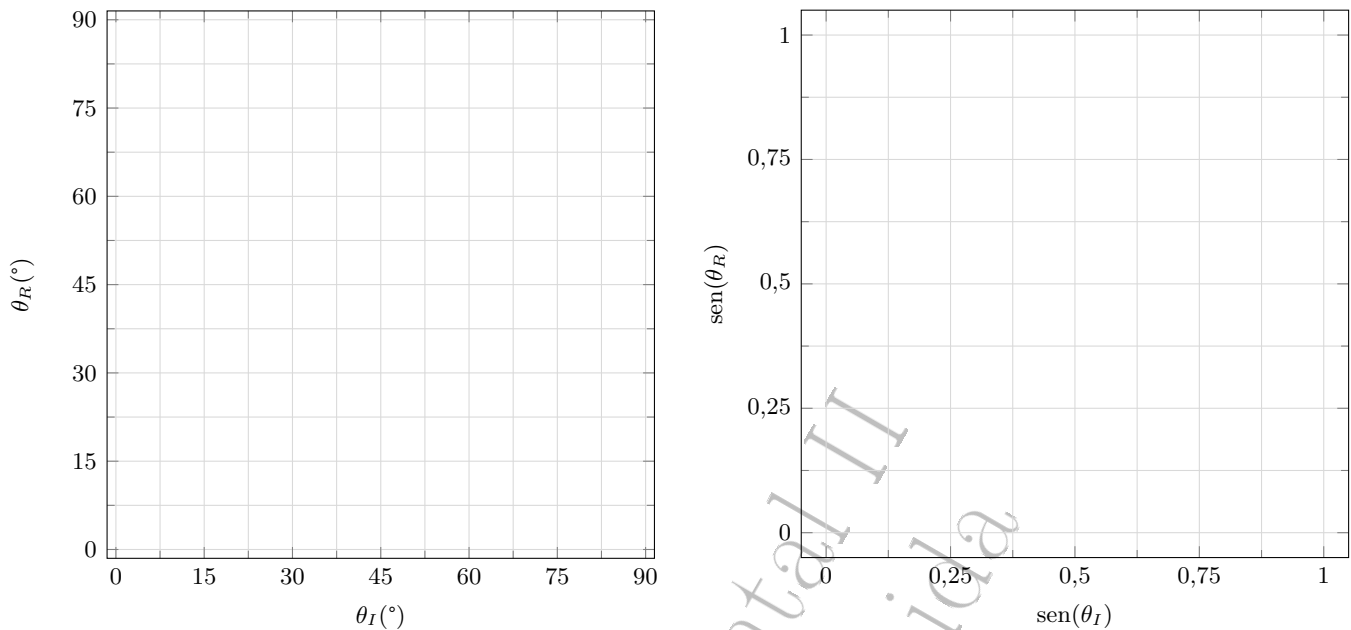


Gráfico 1.1: LEI DE SNELL. Faça dois esboços referentes aos dados da tabela 1.4, o da esquerda em ângulos e a direita em seus senos. Você consegue perceber qual dos gráficos não é linear? Os gráficos aqui usaram a mesma escala das duas direções, explique o motivo.

- Quando o feixe incidente estava paralelo ao eixo de simetria do espelho cilíndrico, mas não era coincidente com este eixo, ainda foi verificada a lei de reflexão? Explique.
- Compare os resultados obtidos para a distância focal dos espelhos côncavo e convexo. Estes resultados estão de acordo com os raios de curvatura? Explique.

### 1.6.2. Refração – Lei de Snell

- Construa um gráfico com  $\text{sen}(\theta_r)$  representado no eixo  $x$  e  $\text{sen}(\theta_i)$  representado no eixo  $y$ . Também pode ser feito um gráfico com os eixos trocados; então é necessário interpretar corretamente os coeficientes da curva ajustada. Coloque o esboço deste gráfico no gráfico 1.1.
- No final da apostila existem papéis milimetrados a disposição. Faça o gráfico tendo o cuidado de ocupar adequadamente o espaço disponível. Portanto uma boa escolha de escala e nomear os respectivos eixos. Após a marcação dos pontos experimentais determine através do método dos mínimos quadrados um ajuste linear e por meio de pontos auxiliares desenhe esta reta ajustada. Uma vez feito esta tarefa mostre ao seu professor para saber se esta foi levada a bom termo.
- Qual é a forma do gráfico encontrado?
- Determine o coeficiente angular da curva obtida acima.
- Com base no resultado do gráfico, determine o índice de refração do acrílico assumindo que o índice de refração do ar é 1,00. Anote o resultado na tabela 1.6.

Tabela 1.6: LEI DE SNELL. A partir do gráfico obtido, durante o estudo da Lei de Refração, determine o índice de refração do material acrílico fornecido.

---

$n =$

---

- O raio incidente desviou quando atingiu perpendicularmente a superfície plana da lente? E quando incidiu perpendicularmente à superfície curva?
- Há dificuldades para se medir o ângulo de refração para grandes ângulos de incidência ( $\theta > 70^\circ$ )? Por quê?

### 1.6.3. Reflexão Interna Total

- Ocorre reflexão para todo e qualquer ângulo de incidência?
- Ocorre refração para todo e qualquer ângulo de incidência?
- A partir de qual ângulo de incidência ocorre reflexão interna total?
- Neste caso, qual é o ângulo de refração?
- Com base nestes resultados calcule o índice de refração do acrílico, expressando-o com a incerteza. Anote os resultados na tabela 1.5.
- Compare os valores do índice de refração nas tabelas 1.5 e 1.6. Estes valores são compatíveis? Explique o critério para dizer se os valores são, ou não, compatíveis.
- Como a intensidade dos raios refletido e refratado varia com o aumento do ângulo de incidência?
- Qual a explicação para a decomposição da luz branca? Com base nos desvios diferentes apresentados para cada cor, o que se pode concluir com relação ao comportamento óptico do material?



## EXPERIMENTO 2

---

### Instrumentos Óticos

---

#### 2.1. Objetivos

- Estudar os princípios da ótica geométrica aplicada a instrumentos ópticos.
- Analisar a formação de imagens por lentes convergentes.
- Caracterizar as imagens obtidas através de lentes convergentes.
- Determinar a ampliação de imagens.

#### 2.2. Material Utilizado

Banco óptico, fonte de luz, lente convergente (distância focal +75 mm), lente convergente (distância focal +150 mm), acessório anteparo (“Viewing Screen”), acessório alvo/objeto (“Crossed Arrow Target”), suportes.

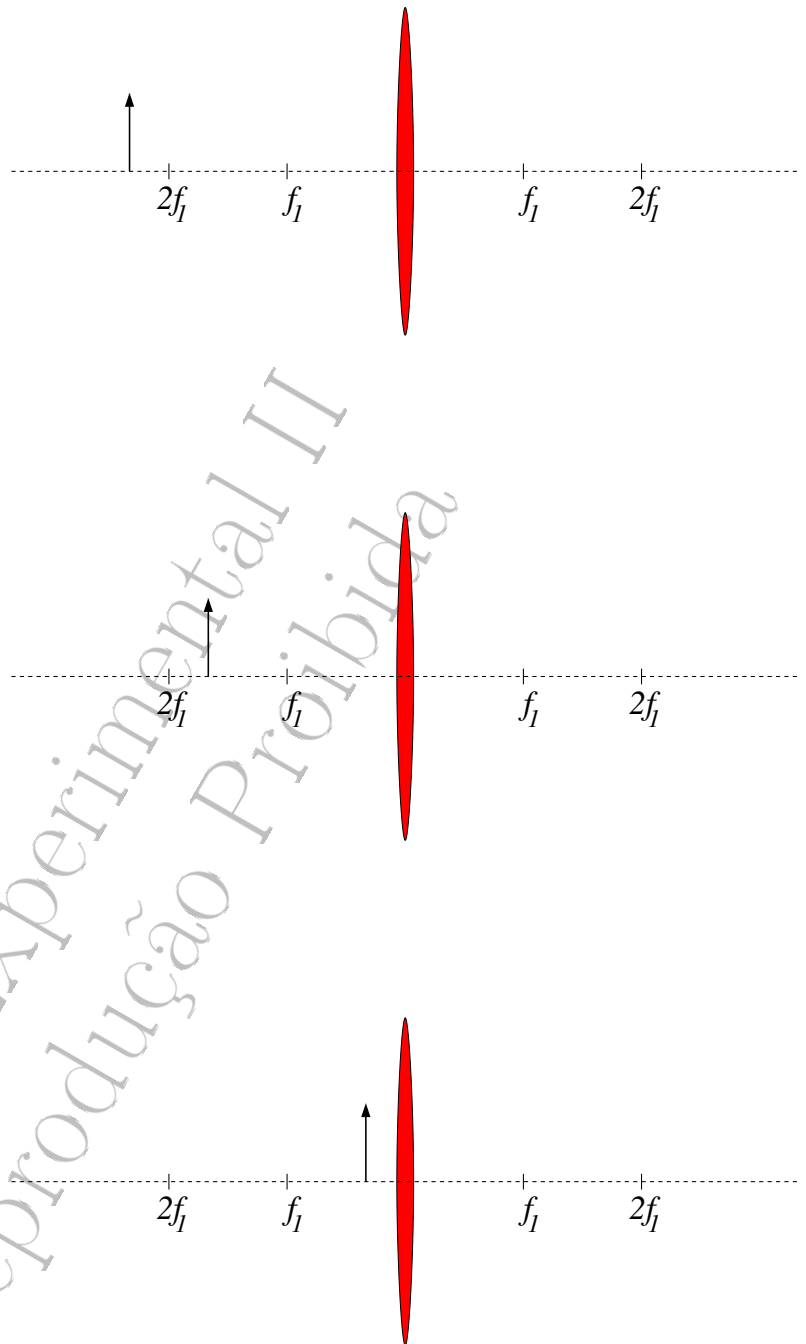
#### 2.3. Bibliografia

- “Física”, F. Sears, M. W. Zemansky e H. D. Young. Vol. 4, 2<sup>a</sup> Ed. (1985), Cap.40.
- “Física”, P. Tipler, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 2: 4a Ed. Cap.34; 5a e 6a Ed. Cap. 32.
- “Fundamentos de Física”, D. Halliday e R. Resnick, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 4: 6a Ed. Cap.35; 8a Ed. Cap. 34.

#### 2.4. Roteiro de Estudo

1. Escreva a equação fundamental das lentes, identificando cada variável.

Figura 2.1: FORMAÇÃO DE IMAGENS COM 1 LENTE. Através da técnica de raios notáveis construa as imagens para os três casos sugeridos. Perceba bem como resultam as imagens formadas, se elas aumentam de tamanho, se ficam invertidas, se elas formam a direita ou a esquerda da lente.



2. Defina ampliação linear e aumento angular.
3. Para uma lente convergente simples, esboce o diagrama de raios para cada uma das situações da figura 2.1, localizando a posição, o tamanho (em relação ao objeto) e as demais características (virtual/real e invertida/direita) de cada imagem formada.
4. Complete a tabela 2.1, usando a equação fundamental das lentes onde  $d_o$ ,  $d_i$  e  $m$  são as distâncias objeto-lente, imagem-lente e a ampliação, respectivamente. Considere que a lente tenha uma distância focal genérica  $f$ .

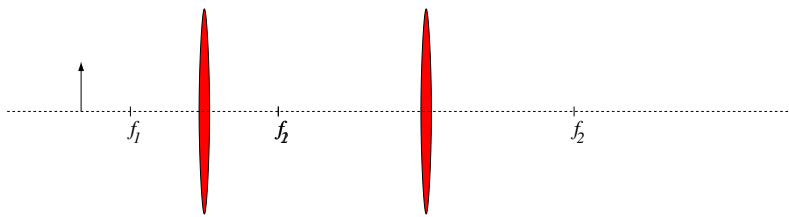
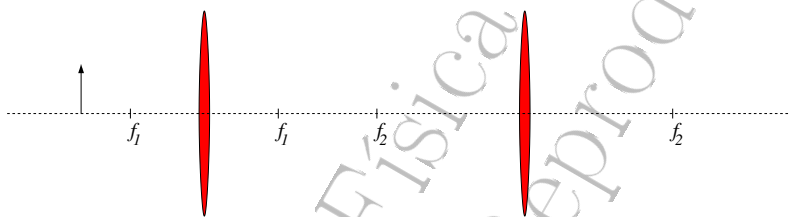
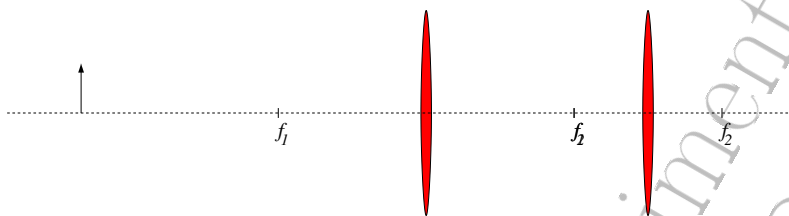


Figura 2.2: FORMAÇÃO DE IMAGENS COM 2 LENTES. A associação de lentes convergentes tem sua utilidade, para compreender a construção da imagem a partir do objeto da primeira lente. Esta imagem intermediária é o objeto da segunda lente. Qual o resultado? Extrapole os resultados obtidos neste três diagramas que você construiu para compreender o funcionamento da luneta e do microscópio. Atente às diferenças nas distâncias focais e às distâncias entre as lentes.



5. Para uma associação de duas lentes convergentes, esboce o diagrama de raios para cada uma das situações das figura 2.2, localizando a posição, o tamanho (em relação ao objeto) e as demais características (virtual/real e invertida/direita) de cada imagem formada.
6. Qual a função das lentes Objetiva e Ocular em um microscópio? E em uma luneta/telescópio?
7. O que é aberração cromática? E aberração esférica? Como é possível reduzir seus efeitos?
8. Cite três situações do cotidiano onde os fenômenos estudados estão envolvidos e são relevantes.

$d_o$	$d_o$ (mm)	$d_i$ (mm)	$m$	Propriedades da imagem	
				real/virtual	direita/inv.
$0.05f$					
$0.15f$					
$0.25f$					
$0.50f$					
$0.80f$					
$1.00f$					
$1.50f$					
$2.00f$					
$5.00f$					
$10.0f$					
$100.f$					

Tabela 2.1: PROJETO/LUPA. Usando a expressão matemática para as lentes, complete o quadro abaixo, lembrando que  $f$  é a distância focal da lente utilizada. Considere como distância focal uma lente convergente de 75 mm. Isto permite você comparar os valores numéricos que você obterá na etapa que estuda o comportamento de uma lente. Atenção! Esta tabela não deverá ser preenchida no laboratório mas sim durante o estudo que antecede o experimento.

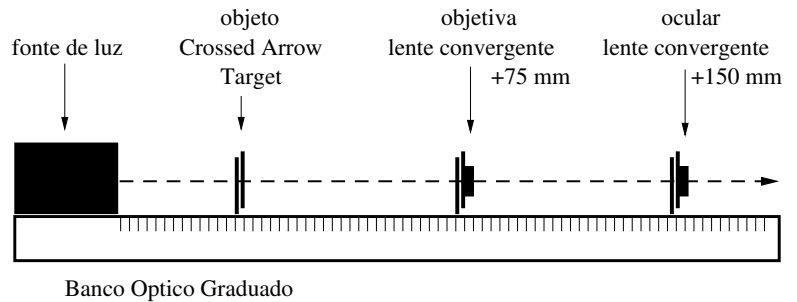
## 2.5. Procedimento Experimental

### 2.5.1. Uma Lente: Projetor e Lupa

- Monte o equipamento sobre o banco óptico conforme a figura 2.3. Utilize inicialmente a lente convergente de +75 mm de distância focal.
- Para os próximos passos deixe o objeto fixo, aproximadamente a 10 cm da fonte de luz, e desloque a lente de modo a variar a distância entre ela e o objeto  $d_o$ . Existem distâncias distintas para  $d_o$  que devem ser avaliadas:  $d_o \geq 2f$ ,  $2f > d_o > f$  e  $d_o < f$ .
- Coloque o objeto (“Crossed Arrow Target”) em 4 posições  $d_o$  diferentes situadas entre as distâncias  $2f$  e  $f$ , de modo que a imagem se forme na região do trilho. Para cada uma delas verifique com o anteparo (“Viewing Screen”) onde se localiza e quais as características da imagem formada. Em todos os casos em que exista imagem formada esta pode ser observada olhando-se ao longo do eixo ótico.
- Meça as distâncias lente-objeto  $d_o$  e lente-anteparo  $d_i$ , bom como o tamanho do objeto  $O$  e o da imagem  $I$ , anotando os valores na tabela 2.2. Expresse estas medidas com incertezas. Verifique visualmente que dificuldade surge quando o objeto se aproxima do foco.



Figura 2.4: MICROSCÓPIO ÓTICO. O objetivo do uso de um microscópio é a observação de um objeto de pequenas dimensões que está próximo. Por estar próximo pode-se escolher colocar este objeto em uma distância conhecida da lente objetiva. Esta escolha tem objetivo obter uma imagem maior que o objeto e com o auxílio de uma segunda lente, uma ocular, obter uma ampliação ainda maior.



imagem? Tente observá-la diretamente.

- Troque a lente de  $+75\text{ mm}$  pela de  $+150\text{ mm}$  e repita o procedimento descrito nos itens anteriores para duas posições do objeto apenas.
- Responda as questões da Análise de Resultados.

### 2.5.2. Associação de Lentes

- Utilizando a montagem anterior, coloque mais uma lente convergente sobre o banco óptico. Tem-se agora um sistema de lentes, no qual a imagem formada pela primeira lente (imagem intermediária) servirá de objeto para a segunda, que produzirá a imagem final.
- É possível escolher a distância de separação entre as lentes, conforme a distância entre o objeto e a primeira lente, para obter uma determinada configuração do sistema.
- Monte algumas configurações possíveis, de forma a observar imagens finais com diferentes características. Faça montagens de modo que a imagem intermediária seja real. É importante que pelo menos uma das configurações produza imagem final virtual e outra produza imagem final real. Como se verifica isso?
- Dentre as configurações estudadas acima, escolha uma que produza imagem final real. Anote as distâncias focais de cada lente e meça todas as distâncias necessárias para especificar o posicionamento dos componentes ópticos. Meça e anote também todas as características das imagens intermediária e final.
- Responda as questões da Análise de Resultados.

A seguir serão estudadas qualitativamente duas configurações particulares, que são utilizadas na montagem dos instrumentos ópticos: microscópio e luneta.

### 2.5.3. Microscópio

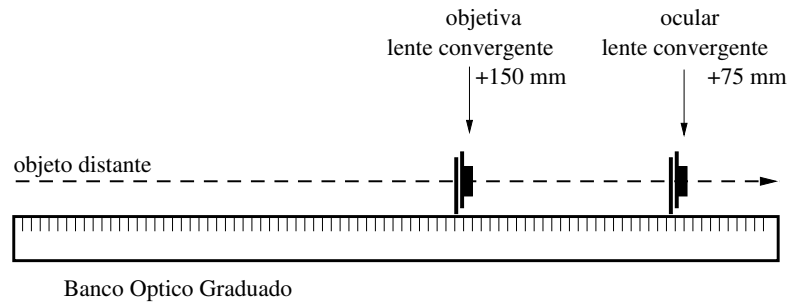
- Monte o equipamento sobre o banco óptico conforme a figura 2.4.

- Use a lente de +75 mm como objetiva e a de +150 mm como ocular.
- Posicione o Objeto (“**Crossed Arrow Target**”), em relação à lente Objetiva, tal que a distância entre eles seja maior que a distância focal desta lente
- Olhe através da lente Ocular, na direção da fonte (é conveniente utilizar um filtro colorido).
- Ajuste a posição da Ocular até obter uma imagem bem definida do objeto.
- Meça a distância entre o objeto e a lente Objetiva, bem como a distância entre as duas lentes.
- Verifique se a imagem observada é ampliada ou reduzida.
- Compare esta ampliação com aquela obtida usando somente a lente de +75 mm (retire momentaneamente a lente de +150 mm do banco óptico).
- Recoloque a lente de +150 mm.
- Olhando através da ocular, mova lentamente a lente objetiva na direção do objeto. Se for necessário, faça ajustes na posição da ocular para melhorar a nitidez da imagem. Verifique o que ocorre com a ampliação da imagem à medida que a objetiva se aproxima do objeto.
- Tem-se um sistema de lentes. A imagem produzida pela primeira lente serve de objeto para a segunda lente. Posicione o anteparo (“**Viewing Screen**”) entre as duas lentes, deslocando-o até obter uma imagem nítida, no caso a imagem intermediária. Verifique onde se localiza a imagem produzida pela primeira lente. Quais as características desta imagem? Nesta situação, qual é a distância entre a posição do anteparo e a segunda lente? Que tipo de imagem será formada pela segunda lente?

#### 2.5.4. Luneta

- Monte o equipamento sobre o banco óptico conforme a figura 2.5.
- Posicione as duas lentes com um determinado afastamento.
- Com a luneta pronta, observe algum objeto distante. Se for necessário, ajuste a distância entre as lentes até obter uma imagem bem definida. Meça a distância entre as lentes nesta condição. Qual a relação se obtém entre  $f_1$  e  $f_2$ ?
- Faça uma avaliação da ampliação resultante. Olhando para o objeto diretamente, compare esta imagem com aquela obtida olhando-se através da luneta. Anote as características da imagem.
- Inverta a montagem utilizando a lente de +150 mm como Ocular e a de +75 mm como Objetiva.

Figura 2.5: LUNETETA. O uso de uma luneta é a observação de objetos que estão a uma grande distância. Assim este objeto estará quase a uma distância infinita para a primeira lente chamada de objetiva. Sua imagem fica portanto próxima do ponto focal. Assim para a segunda lente, a ocular, a posição desta imagem é conhecida. Com o bom posicionamento desta segunda lente pode-se ter uma imagem final adequada à observação.



- Avalie novamente a ampliação e compare com a situação da montagem anterior.
- Quais as características da imagem produzida apenas pela Objetiva? O que se modifica quando se utiliza duas lentes (uma Objetiva e outra Ocular)?

## 2.6. Análise de Resultados

### 2.6.1. Uma Lente: Projetor e Lupa

- O que aconteceu com a imagem quando a distância objeto-lente era menor que a distância focal? A imagem foi focalizada no anteparo? Quais as suas características? Justifique.
- O que aconteceu com a imagem quando a distância objeto-lente era maior que o dobro da distância focal? A imagem pôde ser focalizada no anteparo? Quais as suas características? Justifique.
- É possível, usando uma lente apenas, projetar uma imagem direita não-invertida?
- Determine a ampliação linear  $m$  da imagem obtida com a lente de  $+75$  mm. Utilize os valores de  $d_o$  e  $d_i$ . Calcule também a ampliação utilizando as medidas de  $O$  e  $I$ . Compare os resultados fornecidos por estes dois procedimentos. Repita a análise para a lente de  $+150$  mm.
- Para a lente de  $+75$  mm, faça um gráfico de  $d_i$  em função de  $d_o$ , com os dados da tabela 2.2. A forma deste gráfico é compatível com a equação fundamental? Explique.
- Trace, no espaço reservado na gráfico 2.1, o esboço deste gráfico mas em unidades da distância focal.
- Com os resultados do subseção 2.6.1, faça um gráfico de  $1/m$  em função de  $d_o$ . Ajuste uma curva e interprete os seus coeficientes. Faça uma comparação com os valores previstos teoricamente.
- Trace o esboço obtido em unidades de distância focal no espaço reservado na gráfico 2.1.



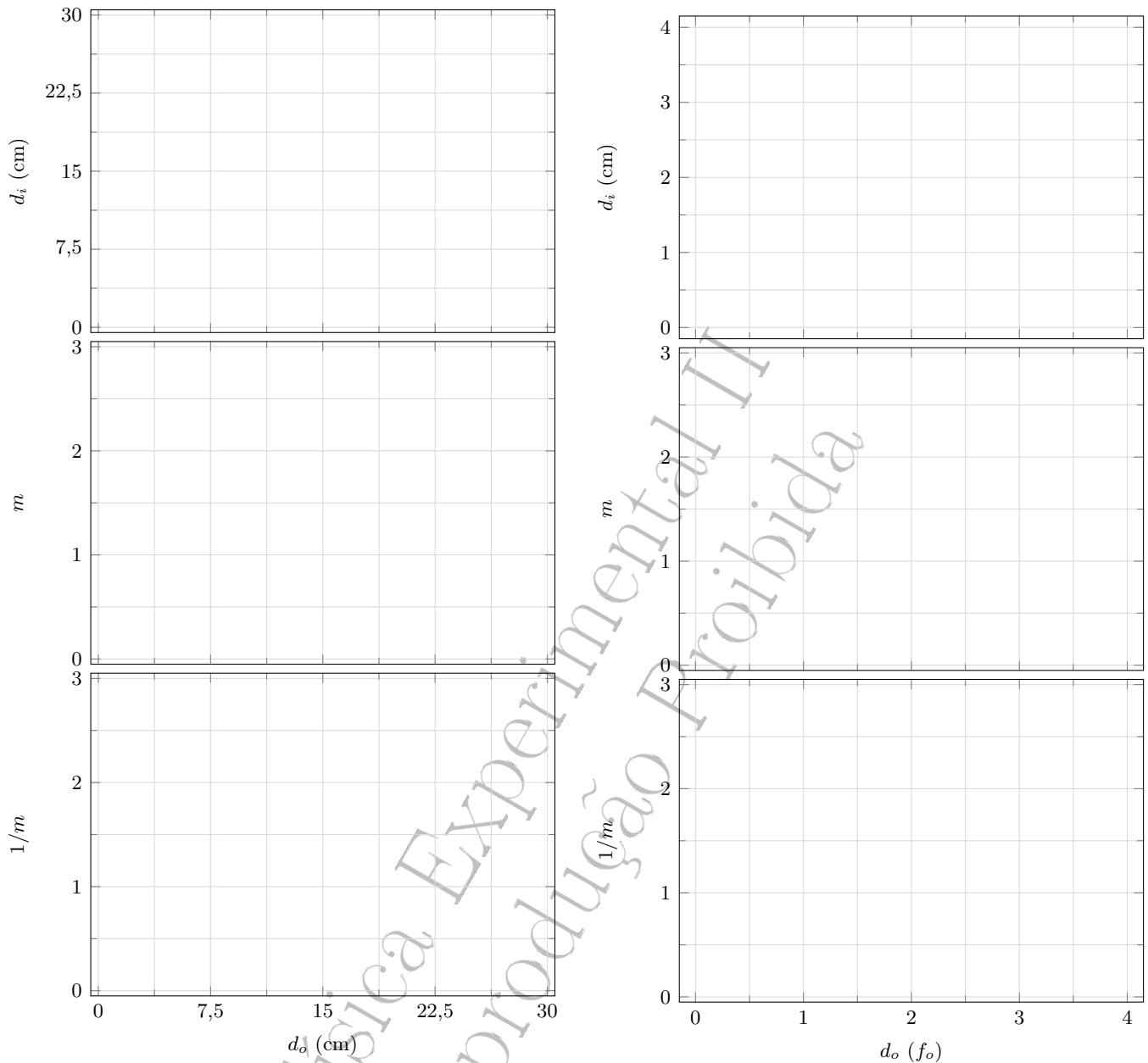


Gráfico 2.1: PROJETO. Faça o esboço do gráfico que você obteve durante a análise de dados que você fez para a lente de 75 mm. Faça também os esboços dos gráficos que você obteve durante a análise de dados que você fez para  $m$  em função de  $d_o$  e de  $1/m$  em função de  $d_o$ . No painel a direita refaça o mesmo esboço em unidades de distância focal.

### 2.6.2. Associação de Lentes

- Para aquela configuração que produziu imagem final real, na qual foi medido o posicionamento dos componentes, trace o diagrama de raios em escala e compare com os resultados experimentais obtidos.
- Para a configuração do item anterior, calcule a ampliação das imagens intermediária e final com base nas medidas das posições dos componentes. Compare estes resultados com aqueles obtidos a partir das medidas do tamanho do objeto e das imagens.
- Na montagem do microscópio, determine as características das imagens intermediária e final a partir das medidas feitas no experimento. Compare com o que foi observado.

- No microscópio surge algum problema quando a ampliação aumenta? Explique.
- Para a montagem da luneta, explique as características da imagem produzida pela lente objetiva e pela lente ocular.

Física Experimental II  
Reprodução Proibida

## EXPERIMENTO 3

---

### Polarização da Luz

---

#### 3.1. Objetivos

- Estudar a polarização da luz por absorção e reflexão.
- Analisar a intensidade da luz polarizada.
- Medir o ângulo de Brewster.

#### 3.2. Material Utilizado:

Banco óptico, fonte de luz, disco graduado (“Ray Table Degree Scale”) e respectiva base, polarizadores, acessórios fenda única (“Slit Mask”) e múltipla (“Slit Plate”) e respectivos suportes para o banco óptico, suporte específico para ser usado sobre o disco graduado, bloco acrílico semi-circular (“Cylindrical Lens”), fotômetro e acessórios.

#### 3.3. Bibliografia

- “Física”, F. Sears, M. W. Zemansky e H. D. Young. Vol. 4, 2<sup>a</sup> Ed., (1985), Cap. 42.
- “Física”, P. Tipler, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 2: 4a Ed. Cap.33; 5a e 6a Ed. Cap.31.
- “Fundamentos de Física”, D. Halliday e R. Resnick, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 4: 6a Ed. Cap.34; 8a Ed. Cap.33.

#### 3.4. Roteiro de Estudo

1. Se a luz é uma onda eletromagnética transversal, qual o ângulo entre a vibração dos campos elétrico e magnético e a direção de propagação?

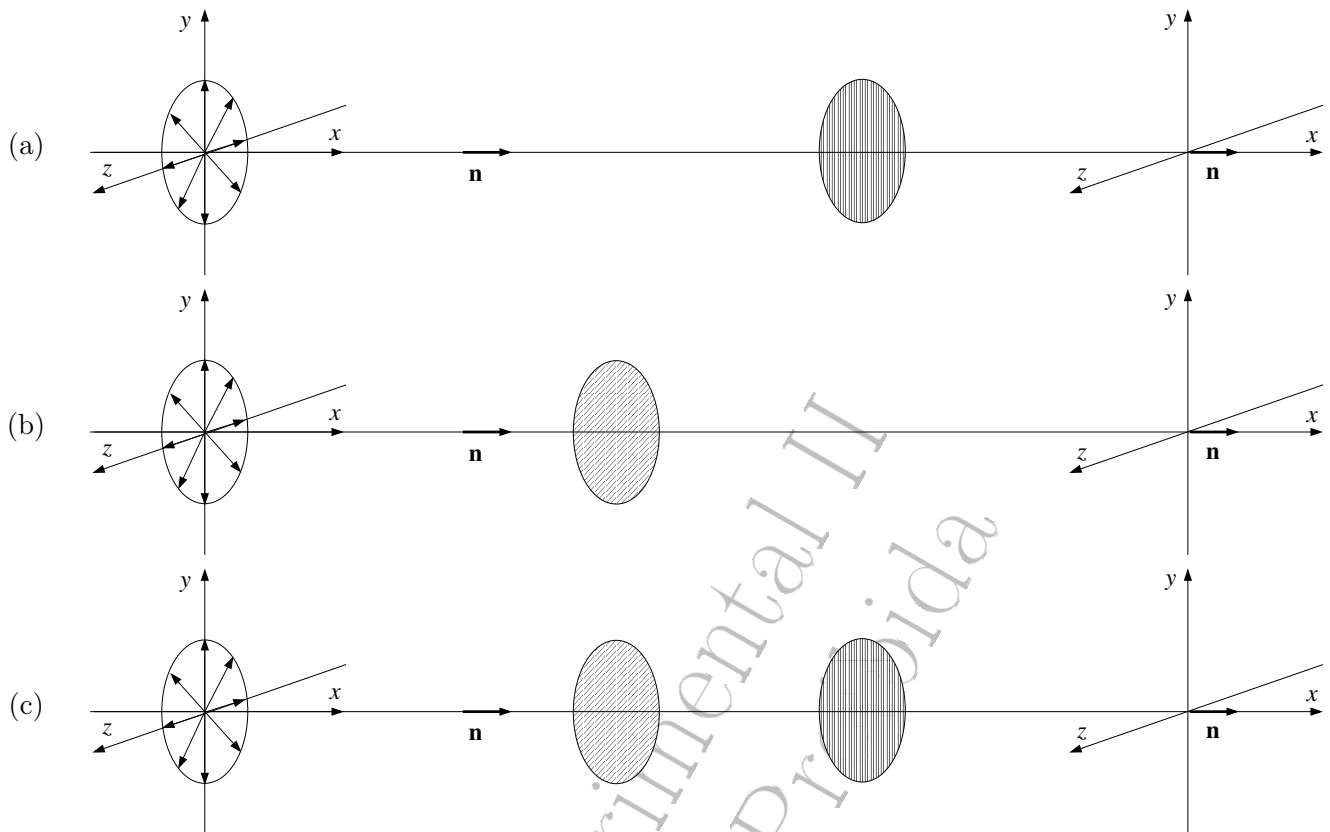


Figura 3.1: DIAGRAMAS DE POLARIZAÇÃO. A partir de uma fonte de luz não polarizada, represente os planos de oscilação da luz transmitida pelas peças polarizadoras, nos três casos propostos. No primeiro caso a peça polarizadora tem eixo na direção de  $y$ , no segundo na direção  $z$  e no terceiro caso tem-se duas peças polarizadoras cruzadas.

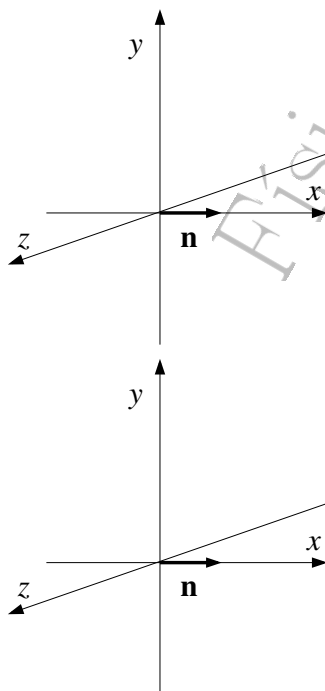
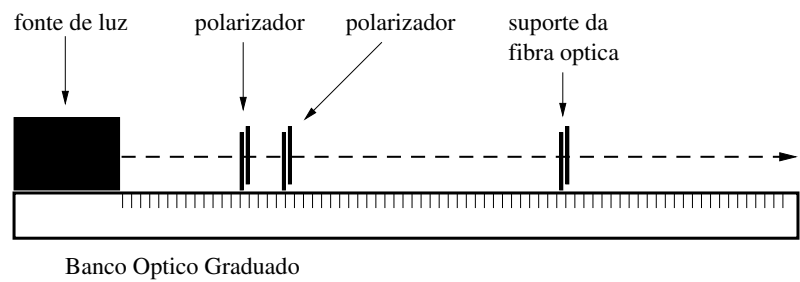


Figura 3.2: POLARIZAÇÃO. Desenhe a direção de vibração do campo elétrico para a luz polarizada em duas direções,  $y$  e  $z$ .

2. Quando se fala de luz polarizada (também chamada de totalmente polarizada) na direção  $y$ , qual o ângulo formado entre a direção de vibração do campo elétrico  $\vec{E}$  e o eixo  $y$ ?
3. Qual é a expressão matemática da lei de Malus? Mostre sua dedução. Explique o significado de cada variável.
4. Represente, nos diagramas da figura 3.2, a direção de vibração do campo elétrico para luz polarizada nas direções  $y$  e  $z$  respectivamente, onde o vetor  $\mathbf{n}$  representa a direção de propagação da onda.
5. Cite alguns fenômenos que levam à obtenção de luz polarizada a partir de luz não-polarizada.
6. A maioria das lâmpadas incandescentes emite luz cuja direção de vibração do campo elétrico varia rápida e aleatoriamente com o tempo, como na figura 3.1. Represente, nos diagramas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , a seguir, o campo elétrico da onda após atravessar o(s) polarizador(es) cuja direção de polarização é:

- vertical - eixo  $z$  (figura 3.1),
- horizontal - eixo  $y$  (figura 3.1) e
- vertical e horizontal - eixos  $z$  e  $y$  (figura 3.1).



- 7. Após analisar os diagramas acima explique o que faz um polarizador.
- 8. O que é o fenômeno da polarização por reflexão?
- 9. Explique o que é ângulo de Brewster.
- 10. Cite três situações do cotidiano onde os fenômenos estudados estão envolvidos e são relevantes.

3.5. Procedimento Experimental

3.5.1. Polarização por Absorção: Lei de Malus

- Monte o equipamento conforme a figura 3.3 (não posicione ainda os polarizadores).
- Ligue a fonte de luz e olhe em direção a esta.
- Coloque o polarizador A sobre o suporte.
- Faça uma rotação gradual e completa no polarizador, observando a fonte de luz. Verifique se houve alteração na intensidade da luz. Isso permite concluir se a luz da fonte é plano polarizada, ou seja, se o campo elétrico está alinhado com alguma direção preferencial do polarizador. Esboce esta observação na gráfico 3.1.
- Posicione o polarizador A com indicação 0°-180° na posição vertical, próximo à fonte. Agora a luz transmitida através dele estará polarizada verticalmente.
- Coloque o outro polarizador B sobre o Banco Ótico, também com a indicação 0°-180° na posição vertical (paralela ao A). Deixe-o próximo ao polarizador A, conforme ilustrado na figura 3.3.
- Observe a luz da fonte que atravessa ambos os polarizadores.
- Gire gradualmente o polarizador B e observe como varia a intensidade da luz transmitida através deste polarizador para vários ângulos, em relação ao 0° do polarizador A.
- Agora coloque um suporte para a fibra ótica logo após o polarizador B. Conecte esta fibra a um fotômetro. Ligue o fotômetro.

Figura 3.3: LEI DE MALUS. Montagem para o estudo da Lei de Malus. O primeiro polarizador é colocado após a fonte de luz, filtrando esta e deixando a luz polarizada. O segundo polarizador tem a função de analisador. Um detector é alinhado por meio de uma fibra ótica e mede a intensidade luminosa que atravessa o analisador. Os valores numéricos obtidos devem ser anotados na tabela 3.2 e tabela 3.3.

Tabela 3.1: INTENSIDADE. Com o fotômetro meça a intensidade da luz que vem da fonte em três situações, a primeira sem polarizadores, a segunda somente com um polarizador. Para o caso de dois polarizadores, preencha a tabela 3.2.

Situação	$I ( \quad )$
Sem	_____
1 Pol.	_____

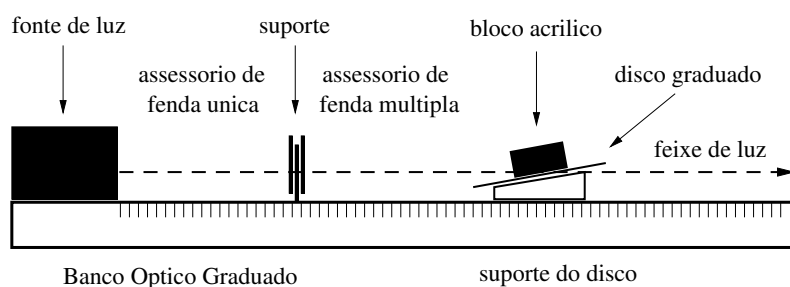
Tabela 3.2: LEI DE MALUS. Os valores numéricos obtidos durante o estudo da Lei de Malus devem ser anotados. Primeiro gira-se o analisador de 0° até 180° em passos de 10°.

Polarizador		Intensidade
A (°)	B (°)	transmitida
0	0	_____
	10	_____
	20	_____
	30	_____
	40	_____
	50	_____
	60	_____
	70	_____
	80	_____
	90	_____
	100	_____
	110	_____
	120	_____
	130	_____
	140	_____
	150	_____
	160	_____
	170	_____
	180	_____

Figura 3.4: POLARIZAÇÃO POR REFLEXÃO. A montagem experimental para o estudo da polarização por reflexão é semelhante aquela usada para a reflexão interna total. A diferença fundamental é que observamos o raio refletido utilizando um polarizador como analisador. Girando o analisador podemos perceber a variação da intensidade da luz refletida tendo uma máxima e um mínimo de intensidade. Para um ângulo bem determinado percebemos que o mínimo de intensidade chega a zero. Este ângulo particular chamamos de ângulo de Brewster.

Tabela 3.3: LEI DE MALUS. Na segunda parte da tabela mantém-se o analisador imóvel e o polarizador é girado com passos de  $30^\circ$  para evidenciar que o valor importante é o ângulo relativo, entre o plano da luz polarizada que passa pelo polarizador A e a direção de polarização do analisador, é que intervem na Lei de Malus.

Polarizador		Intensidade transmitida
A ( $^\circ$ )	B ( $^\circ$ )	
0	0	_____
30		_____
60		_____
90		_____
120		_____
150		_____
180		_____



- Complete a tabela 3.1, medindo a intensidade da luz para as situações sem polarizadores, com um polarizador.
- Com os dois polarizadores meça a intensidade variando-se o ângulo de polarização do polarizador B. Complete a tabela 3.2.
- Repita o procedimento do item anterior, girando agora o polarizador A e deixando o polarizador B fixo em  $0^\circ$ . Anote as medidas na tabela 3.3.
- A luz emitida pelos mostradores de cristal líquido de relógios e calculadoras também é plano-polarizada? Verifique com o auxílio dos polarizadores.
- Responda as questões da Análise de Resultados.

### 3.5.2. Polarização por Reflexão: Ângulo de Brewster

- Monte o equipamento conforme a figura 3.4.
- Ajuste os componentes sobre o banco óptico, tal que apenas um feixe de luz passe através do centro do disco graduado, alinhando-o com a reta "NORMAL" do disco.
- Posicione o acrílico sobre o centro do disco graduado, com a face plana voltada para o feixe de luz, como ilustrado na figura 3.4.
- Observe os raios refletido e refratado que são produzidos quando o feixe incidente atinge a superfície plana do bloco.
- Gire o disco até que o ângulo entre o feixe refletido e refratado forme um ângulo de aproximadamente  $90^\circ$ .
- Observe o raio refletido pelo bloco através de um polarizador. Você deverá ver a imagem do filamento da fonte de luz.
- Gire o polarizador atentamente para todos os ângulos e verifique se a luz refletida no acrílico apresenta variação de intensidade de luz.
- Você deve perceber que em uma determinada posição angular do polarizador a intensidade observada é zero. Caso necessário ajuste a posição do disco graduado para que isto aconteça. Esboce as variações de intensidade observada no gráfico 3.1. Determine em que ângulo está o plano de polarização da luz refletida em relação ao eixo vertical do disco.

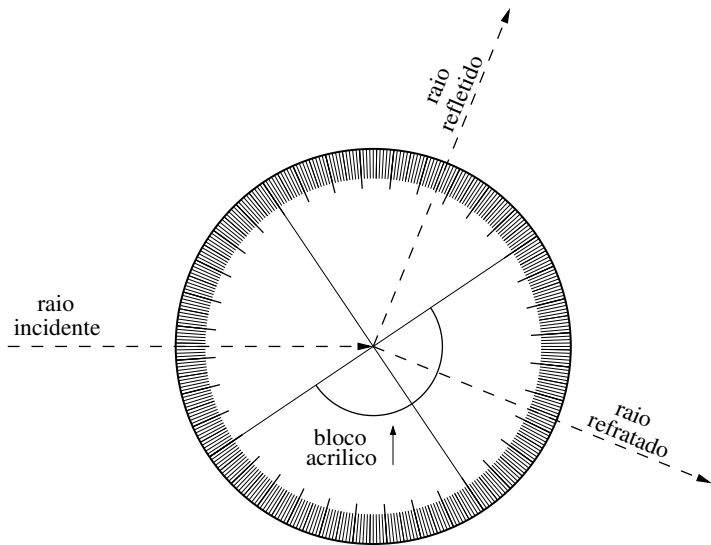


Figura 3.5: POLARIZAÇÃO POR REFLEXÃO. Quando se inspeciona o caracter polarizado da luz que é refletida por um objeto pode-se perceber que a luz refletida é parcialmente polarizada para todos os ângulos de incidência com exceção de um determinado ângulo quando a luz é totalmente polarizada. Este ângulo chamamos de ângulo de Brewster. Neste caso constata-se que o ângulo formado entre o feixe refletido e o refratado é de 90 degree.

- Anote o ângulo de incidência medido na tabela 3.4, este é o ângulo de Brewster.
- Gire o disco graduado de  $\pm 10^\circ$  em relação ao ângulo de Brewster. Usando o polarizador, qual o comportamento da intensidade da luz refletida conforme varia o ângulo do polarizador?
- Esboce as variações de intensidade na gráfico 3.1.
- Troque a peça semicilíndrica de acrílico pelo espelho metálico plano. Verifique para diferentes ângulos de incidência se a luz refletida pelo espelho é polarizada.
- Responda as questões da Análise de Resultados.

### 3.6. Análise de Resultados

#### 3.6.1. Polarização por Absorção: Lei de Malus

- Por que há diferença entre a intensidade da luz da fonte quando se olha diretamente para ela, e aquela vista através do polarizador? Em qual das duas situações a imagem é mais intensa?
- A luz da fonte de luz é plano-polarizada? Justifique a resposta.
- Na etapa com os dois polarizadores, faça um gráfico da intensidade da luz transmitida pelos dois polarizadores em função do ângulo entre suas direções de polarização.
- Para que ângulos entre os polarizadores um máximo de luz é transmitida?
- Para que ângulos entre os polarizadores um mínimo de luz é transmitida? O mínimo é realmente zero?

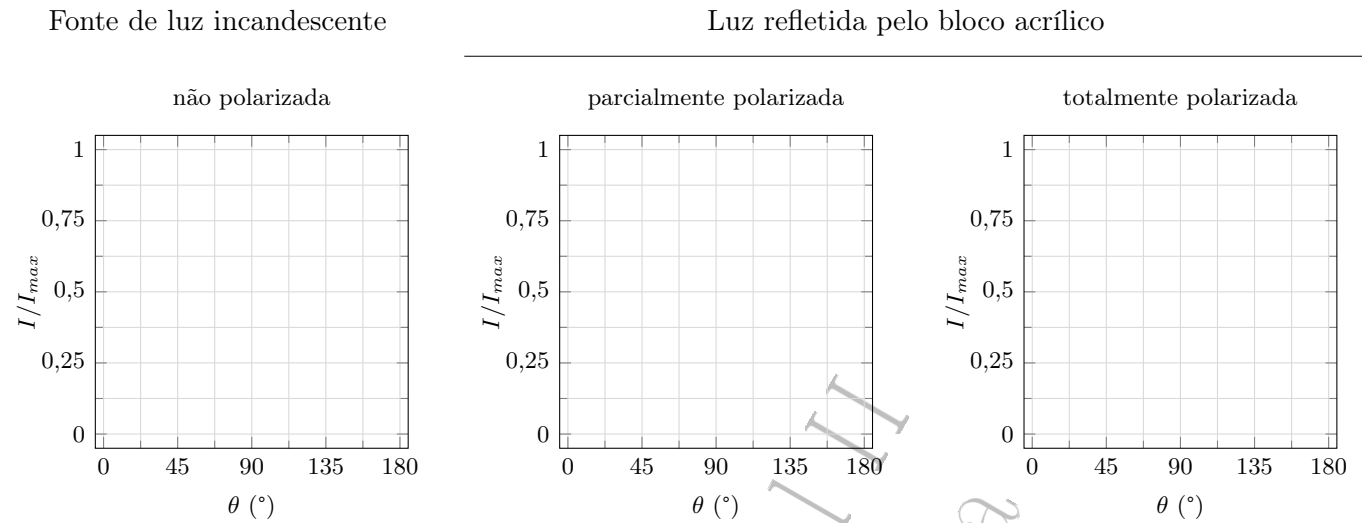


Gráfico 3.1: INTENSIDADE DE POLARIZAÇÃO. Esboce aproximadamente a intensidade observada enquanto você girava o polarizador em três situações. No primeiro quadro quando você girou o polarizador em frente a fonte de luz e mediu o ângulo entre a marcação superior do polarizador e a vertical. No segundo quadro quando o ângulo de incidência na peça de acrílico era próxima porém diferente do ângulo de Brewster. E no terceiro quadro quando o ângulo era o ângulo de Brewster. Compare os quadros. Atenção, o  $I_{max}$  representa o valor máximo da intensidade transmitida, não confundir com o valor da intensidade incidente.

- Os resultados estão de acordo com a lei de Malus? Comprove isto ajustando a função

$$I = a + b \cos^2(\theta + c)$$

por mínimos quadrados, onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os parâmetros a serem ajustados. Interprete os parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

Tabela 3.4: ÂNGULO DE BREWSTER. Pela observação da luz refletida na peça de acrílico pode-se perceber que para um determinado ângulo de incidência há uma polarização total da luz refletida. Anote este ângulo e determine qual é o índice de refração deste material. Compare o valor com aquele que você havia determinado por meio do estudo da Lei da Refração, via o ajuste da Lei de Snell tabela 1.6 e via a Reflexão Total Interna tabela 1.5.

$\theta_B$ (°)	$n$

3.6.2. Polarização por Reflexão: Ângulo de Brewster

- A luz incidente na peça de acrílico é plano-polarizada? Em caso afirmativo, qual o ângulo de polarização em relação ao eixo vertical?
- A luz refletida pela peça de acrílico é plano-polarizada? Em caso afirmativo, qual o ângulo de polarização em relação ao eixo vertical?
- Com o ângulo de Brewster medido experimentalmente que está tabela 3.4, calcule o índice de refração do acrílico, expressando o resultado com incerteza.
- Compare este resultado com o obtido na tabela 1.6. Dadas as incertezas de medida discuta a compatibilidade dos dois resultados.
- Para ângulos de incidência diferentes do ângulo de Brewster, o raio refletido é plano-polarizado? Este resultado era esperado?
- O raio refletido pelo espelho metálico é polarizado? Por que seu comportamento difere do refletido pelo acrílico?



## EXPERIMENTO 4

---

---

### Difração e Interferência da Luz

---

---

#### 4.1. Objetivos

- Estudar o comportamento ondulatório da luz.
- Estudar o fenômeno da difração utilizando um laser e fendas de diferentes aberturas.
- Verificar os padrões de interferência e difração produzidos por fendas duplas.

#### 4.2. Material Utilizado

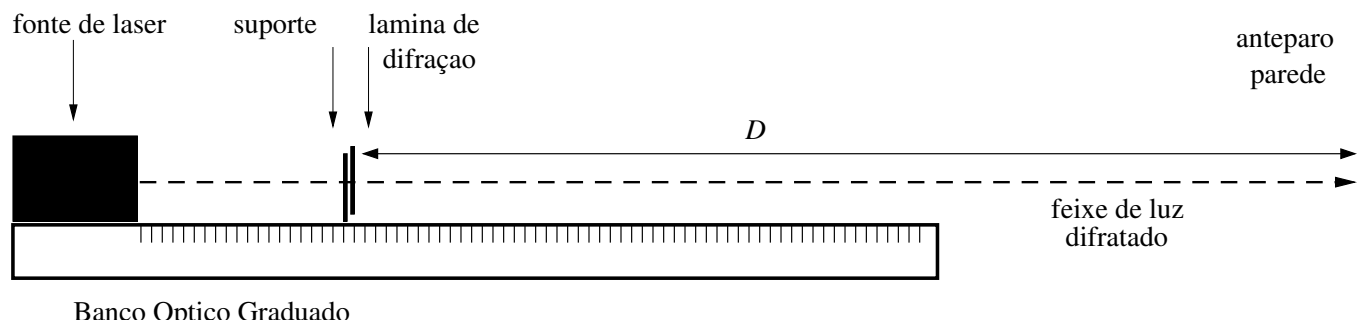
Banco óptico, fonte de laser, base para o disco graduado, suportes para o banco óptico, anteparo, régua, lâmina com diferentes aberturas para difração (“Diffraction Plate”), fotômetro e acessório posicionador milimétrico.

#### 4.3. Bibliografia

- “Física”, F. Sears, M. W. Zemansky e H. D. Young; 2a Ed. Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro (1983), Vol. 4, Cap. 41.
- “Física”, P. Tipler, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 2: 4a Ed. Cap.35; 5a e 6a Ed. Cap. 33.
- “Fundamentos de Física”, D. Halliday e R. Resnick, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 4: 6a Ed. Cap.36 e 37; 8a Ed. Cap.35 e 36.

#### 4.4. Roterio de Estudos

1. O que diz o princípio de Huygens?



Banco Óptico Graduado

Figura 4.1: DIFRAÇÃO E INTERFERÊNCIA. Montagem básica para o estudo da Difração e da Interferência. Esta mesma montagem deve ser usada para as fendas A, B, C, D, E e F. As medidas do espalhamento da luz deve ser feito em um anteparo, por exemplo a parede, cuja distância  $D$  deve ser medida.

2. Explique o que é interferência.
3. O que são as franjas de interferência?
4. Com base na ótica física, qual é a equação para a posição dos mínimos de interferência com relação ao máximo principal?
5. Qual é a previsão teórica para o espaçamento entre as franjas?
6. Explique o que é difração.
7. Com base na ótica física, qual é a equação para a posição dos mínimos na figura de difração? E para os máximos?
8. Qual é a equação que relaciona a intensidade da luz difratada em função do ângulo  $\theta$ .
9. Cite três situações do cotidiano onde os fenômenos estudados estão envolvidos e são relevantes.

#### 4.5. Procedimento Experimental

##### 4.5.1. Difração de Fenda Única

Tabela 4.1: DIFRAÇÃO. Anote o número da lâmina de fendas utilizada:

---



---

Tabela 4.2: DIFRAÇÃO. Anote a distância entre o anteparo e a lâmina de fendas.

---

$D =$

---

- Monte o equipamento conforme a figura 4.1.
- Anote o número da lâmina de fendas utilizada na tabela 4.1.
- Verifique o posicionamento do banco óptico em relação ao anteparo; eles devem estar perpendiculares entre si. O suporte com a lâmina de fendas deve estar a aproximadamente 1 m do anteparo, onde deve ser colada uma folha de papel.
- Meça a distância entre o anteparo e a lâmina de fendas. Anote este valor na tabela 4.2.
- Ligue o laser.

Cuidando para que o feixe não atinja o olho das pessoas.

Mínimo	Fenda Única			Fenda Dupla		
	A	B	C	D	E	F
	$L = 0,04 \text{ mm}$	$L = 0,08 \text{ mm}$	$L = 0,16 \text{ mm}$	$L = 0,04 \text{ mm}$ $S = 0,125 \text{ mm}$	$L = 0,04 \text{ mm}$ $S = 0,250 \text{ mm}$	$L = 0,08 \text{ mm}$ $S = 0,250 \text{ mm}$
1						
2						
3						
4						
5						

Tabela 4.3: A partir da figura observada no anteparo pode-se perceber que para caracterizá-la basta inicialmente medir as distâncias dos mínimos de intensidade. Por causa da simetria é mais simples medir a distância entre os mínimos de cada lado do máximo central, fendas A, B e C. Já as fendas duplas D, E e F tem figuras parecidas com as precedentes mas existem mais mínimos, localizando a região central também procede-se com a medida da distância entre os mínimos para cada lado. Perceba que  $L$  representa aqui a largura da fenda enquanto que  $S$  representa a separação entre as fendas.

- Posicione a lâmina de fendas, alinhando a fenda padrão A (uma fenda de largura nominal 0,04 mm) de forma que o feixe de luz atravesse essa fenda e produza uma figura de difração no anteparo.
- Coloque no anteparo (parede) uma folha de papel, alinhando-a em relação ao padrão de difração.
- Inicialmente, identifique a posição central do máximo mais intenso.
- Marque sobre a folha as posições dos mínimos, tanto à direita quanto à esquerda do máximo mais intenso. Esboce a figura observada na figura 4.3.
- Meça a distância  $2y$ : entre os dois primeiros mínimos; entre os dois segundos mínimos; e assim por diante, anotando na tabela 4.3.
- Repita a operação para as fendas B e C, sem mudar a distância da lâmina de fendas ao anteparo.
- Esboce as figuras observadas, as posições de mínimos na folha de papel, na figura 4.3. Compare-as.
- Responda as questões da Análise de Resultados.

#### 4.5.2. Interferência em Fenda Dupla

- Utilize a configuração da figura 4.1 (não posicione a lâmina de fendas ainda).
- Posicione o suporte a aproximadamente 1 m do anteparo.
- Verifique o posicionamento do banco óptico em relação ao anteparo: eles devem estar perpendiculares entre si.
- Ligue o laser.
- Posicione no suporte a lâmina de fendas, alinhando o padrão D (duas fendas de largura nominal 0,04 mm e separadas por 0,125 mm) com o feixe de luz.





Tabela 4.6: DIFRAÇÃO. A distância entre a lâmina de fendas e o sensor (a entrada da fibra ótica).

$D =$
-------

- Observe a formação dos padrões de difração sobre a fibra ótica e verifique o mostrador do fotômetro.
- Meça a distância da lâmina de fendas ao sensor (posição da fibra ótica) e anote na tabela 4.6.
- Desloque o posicionador milimétrico até a sua extremidade em 0 mm. Avance o posicionador a cada 2 mm, medindo em cada ponto a intensidade da luz difratada e preenchendo as duas primeiras colunas da tabela 4.5. Ajuste a escala do fotômetro conforme a necessidade.
- Responda as questões da Análise de Resultados.

#### 4.6. Análise de Resultados

O comprimento de onda da luz do laser de He-Ne é  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ . Da literatura as equações usadas para a localização dos mínimos de difração e de interferência são

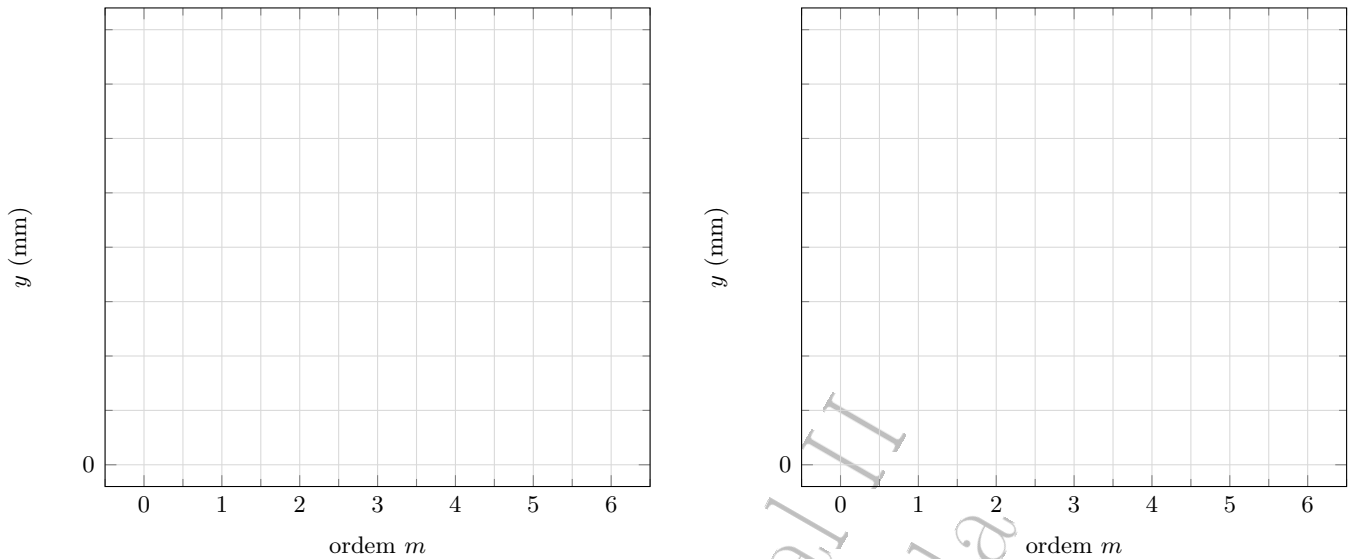
$$a \sin \theta = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, 4, \dots)$$

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots)$$

onde  $a$  é a abertura da fenda,  $d$  é a distância entre as fendas e  $m$  é um inteiro que representa a ordem do mínimo (observe que no caso da interferência  $m = 0$  representa o primeiro mínimo!).

##### 4.6.1. Difração em Fenda Única

- Pela observação das figuras de difração e dos resultados da tabela 4.3, como o espaçamento entre as franjas varia com a largura da fenda?
- Com base na geometria, escreva uma expressão para calcular o ângulo formado entre a direção do feixe central e a direção de cada mínimo. Estes ângulos são calculados considerando que a direção do feixe em cada mínimo, a direção do feixe central, a distância  $D$ , e a distância  $y$  dos mínimos até o feixe central no anteparo formam um triângulo retângulo.
- Com base na ótica física, escreva uma expressão para calcular o ângulo formado entre a direção do feixe central e a direção de cada mínimo devido à difração.
- Combine as expressões dos itens anteriores de forma a resultar em uma equação para a distância  $Y$  entre cada mínimo e o feixe central em função da ordem  $m$  destes mínimos. Lembre que para  $\theta$  pequeno vale a aproximação  $\sin \theta \sim \theta \sim \tan \theta$ .
- Usando os resultados para a fenda A na tabela 4.3, faça um gráfico representando no eixo horizontal a ordem dos mínimos e no eixo vertical a distância  $y$  entre os mínimos e o eixo central. Qual o significado físico dos coeficientes deste gráfico?



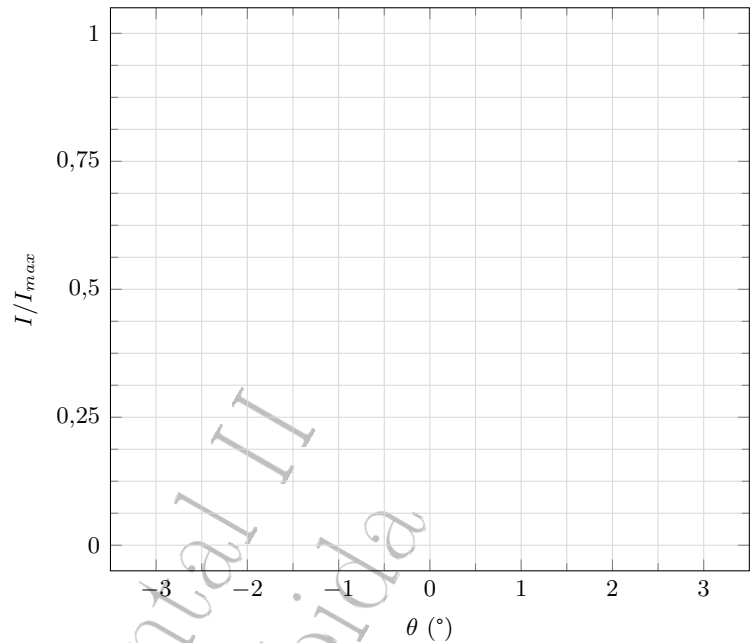
- Ajuste uma reta aos pontos medidos e determine a sua equação.
- A partir deste resultado calcule a largura da fenda A.
- Compare este valor obtido experimentalmente com o nominal citado na tabela 4.3.
- Pergunte ao professor qual deveria ser o valor da largura desta fenda.
- Repita os passos anteriores para as fendas B e C. Esboce estes resultados no gráfico 4.1.

Gráfico 4.1: DIFRAÇÃO E INTERFERÊNCIA. No painel à esquerda esboce os gráficos obtidos para as fendas A, B e C em uma mesma escala para que você possa comparar suas inclinações. Da mesma maneira no painel da direita esboce os gráficos obtidos para as fendas D, E e F. Você pode perceber que nestes esboços não estão escritos explicitamente os valores numéricos do eixo vertical, portanto você deverá escrevê-los com os valores típicos que você obteve durante o seu experimento.

#### 4.6.2. Interferência em Fenda Dupla

- Como o padrão de interferência em fenda dupla se diferencia do padrão obtido para a fenda simples? Compare os padrões produzidos por larguras iguais: A e D ou B e F.
- Com base na geometria, escreva uma expressão para calcular o ângulo formado entre a direção do feixe central e a direção de cada mínimo. Estes ângulos são calculados considerando que a direção do feixe em cada mínimo, a direção do feixe central (distância  $D$ ) e a distância  $y$  dos mínimos até o feixe central no anteparo formam um triângulo retângulo.
- Com base na ótica física, escreva uma expressão para calcular o ângulo formado entre a direção do feixe central e a direção de cada mínimo devido à difração.
- Combine as expressões dos itens 2 e 3 de forma a resultar uma equação para a distância entre cada mínimo e o feixe central  $y$  em função da ordem destes mínimos. Lembre que para  $\theta$  pequeno vale a aproximação  $\sin \theta \sim \theta \sim \tan \theta$

Gráfico 4.2: INTENSIDADE DE DIFRAÇÃO DE FENDA ÚNICA. Faça o esboço do gráfico obtido com os dados experimentais que estão listados na tabela 4.5.



- Usando os resultados para as fendas D na tabela 4.3, faça um gráfico representando no eixo horizontal a ordem dos mínimos e no eixo vertical a distância  $y$  entre os mínimos e o eixo central. Qual o significado físico dos coeficientes deste gráfico?
- Ajuste uma reta aos pontos medidos e determine a sua equação.
- A partir deste resultado calcule a separação das fendas D.
- Compare este valor obtido experimentalmente com o nominal citado na tabela 4.3.
- Pergunte ao professor qual deveria ser o valor da separação destas fendas.
- Repita os passos anteriores para as fenda E e F. Esboce este no gráfico 4.1.

#### 4.6.3. Intensidade da Luz Difrata de Fenda Única

- Com os dados que você registrou na tabela 4.5, verifique para qual posição do sensor ocorreu a máxima intensidade medida (máximo central). Esta posição corresponderá a zero na coluna “Distância” em relação ao máximo central.
- Calcule a distância entre cada ponto observado e esta posição (máximo central), completando assim a coluna “Distância”. Este procedimento chamamos de translação.
- Com base na geometria, calcule o ângulo  $\theta$  entre as direções correspondentes a cada ponto observado e o máximo central, completando a coluna “Ângulo”.



- Utilizando os resultados do item anterior, a determinação do “Ângulo”, e os dados do sistema, calcule a intensidade  $I/I_{max}$  prevista teoricamente, completando a coluna  $I/I_{max}$  teórico.
- Verifique qual é o maior valor de intensidade medida pelo sensor. Divida sucessivamente todos os valores da coluna “Intensidade” por este valor e transcreva na coluna  $I/I_{max}$ . Este procedimento chamamos de normalização.
- Faça um gráfico da intensidade da luz difratada, já normalizada, em função do ângulo  $\theta$ . Não esqueça de fazer o esboço do resultado no gráfico 4.2.
- O gráfico resultante concorda com a teoria? Comprove isto sobrepondo a curva teórica. Explique o resultado.

Física Experimental II  
Reprodução Proibida

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*

## BLOCO II

### Eletricidade

Física Experimental II  
Reprodução Proibida

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*

---

## Introdução aos Instrumentos de Medidas Elétricas

---

### 1. Multímetro

Em várias situações torna-se necessário efetuar medidas de diferentes grandezas elétricas em circuitos de corrente contínua ou corrente alternada. Os dispositivos que medem intensidade de corrente elétrica, diferença de potencial e resistência elétrica são, respectivamente, os amperímetros, voltímetros e ohmímetros. É comum encontrar estes três dispositivos reunidos em apenas um equipamento, denominado de multímetro. Esse equipamento múltiplo é dividido basicamente em três partes: sensor de corrente, resistências acopladas e indicador de valores.

**Sensor de corrente** O princípio básico que é utilizado num multímetro é a capacidade de medir correntes elétricas. Nos multímetros analógicos o papel de “sensor” de corrente é desempenhado por um galvanômetro, que consiste em uma bobina colocada sob a influência do campo magnético de um ímã. A bobina pode girar em torno de um eixo e quando a corrente passa através dos fios da bobina uma força magnética irá atuar em cada parte do fio fazendo a bobina girar em torno do eixo. Uma mola faz uma força contrária a esse movimento permitindo a bobina girar de ângulos diferentes para valores diferentes da corrente que passa pela bobina.

**Resistências acopladas** As resistências são colocadas em série ou em paralelo com o galvanômetro para realizar uma calibração do equipamento para os diferentes usos do multímetro.

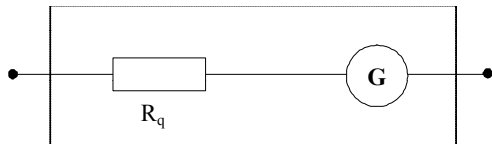


Figura 4.4: VOLTÍMETRO. Esquema interno de um medidor de tensão que utiliza um galvanômetro. Aqui a resistência elétrica  $R_q$  é escolhida para que a corrente elétrica que atravessa o galvanômetro seja pequena o suficiente para não danificá-lo, portanto o valor dessa resistência deve ser grande.

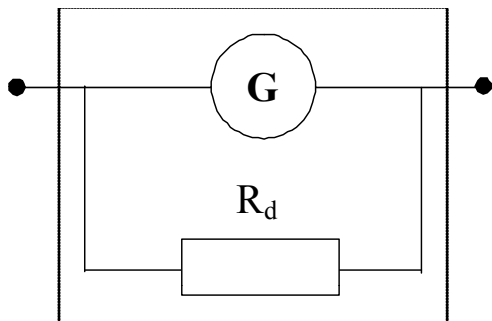


Figura 4.5: AMPERÍMETRO. Esquema interno de um medidor de corrente elétrica que utiliza um galvanômetro. Aqui a resistência elétrica  $R_d$  é escolhida para que a corrente elétrica que atravessa o galvanômetro seja pequena o suficiente para não danificá-lo, portanto o valor dessa resistência deve ser pequena comparada com a resistência elétrica do galvanômetro.

Indicador de valores Um ponteiro e uma escala calibrada.

Nos multímetros digitais, também, temos três as partes principais:

- o sensor é um circuito eletrônico que compara uma corrente a medir com um valor pré-determinado gerado no próprio aparelho;
- o conjunto de resistências é praticamente o mesmo, variando apenas os valores absolutos e
- o indicador de valores é um dispositivo eletrônico onde os valores são transformados em dígitos (números).

Na figura 4.4 apresentamos um voltímetro com o galvanômetro e a resistência acoplada  $R_q$ , colocada em série com o galvanômetro para limitar a corrente. Essa resistência tem valor elevado e com isto a corrente que atravessa o galvanômetro é pequena devido ao fato de que a maior parte da diferença de potencial fica aplicada no resistor  $R_q$ .

Com a aplicação de uma diferença de potencial ao conjunto aparecerá uma corrente circulando pelo galvanômetro. Se a resistência em série for baixa, a corrente no galvanômetro será demasiadamente alta e o instrumento será danificado. Um dos maiores cuidados que se deve tomar ao se utilizar um multímetro é não deixar passar altas correntes pelo galvanômetro. Isto acontece se o multímetro estiver ajustado para medir baixas diferenças de potencial ou ajustado para medir correntes. Neste caso uma corrente elevada passará pelo galvanômetro e o instrumento não irá suportar tal situação. Portanto, muito cuidado deve ser tomado na hora de utilizar esse equipamento. Por isso, devemos sempre escolher corretamente a função a ser utilizada e começar a medir sempre da maior escala, baixando para menores valores à medida que o valor medido assim o permitir.

Na figura 4.5 é apresentado um amperímetro, onde o galvanômetro e a resistência acoplada  $R_d$  são colocadas em paralelo.

Neste caso, se aplicarmos grandes diferenças de potencial, a corrente no galvanômetro será elevada e o instrumento ficará danificado. Para diferentes escalas de medida da corrente deveremos utilizar diferentes valores da resistência  $R_d$ . O papel de  $R_d$  neste caso é diminuir o valor da corrente que passa pelo galvanômetro. Assim, se quisermos medir grandes correntes deveremos utilizar baixos valores para  $R_d$ .

## 2. Modo de Uso do Multímetro

Na figura 4.6 temos um desenho do aspecto externo do multímetro marca Minipa que iremos utilizar nos experimentos. Podem ser observados o mostrador e as diferentes escalas para as funções: amperímetro, voltímetro e ohmímetro. Aparecem

também os locais onde devem ser ligados os cabos, também chamados de “pontas de prova”, para as funções de voltímetro, ohmímetro e amperímetro.

### 2.1. Amperímetro

- Girar a chave seletora do multímetro para a região “ $\tilde{A}$ ” - quando estiver trabalhando com corrente alternada - ou então para a região  $\overline{A}$  - quando trabalhar com corrente contínua;
- Selecionar inicialmente a maior escala do amperímetro;
- Conectar o pino banana do terminal da ponta de prova preto no borne “COM” do multímetro;
- Conectar o pino banana do terminal da ponta de prova vermelho no borne “A” do multímetro;
- Abrir o circuito e colocar o amperímetro EM SÉRIE com os demais elementos do circuito;
- Baixar gradualmente a escala até obter uma boa condição de leitura;
- Após fazer a leitura, desconectar o amperímetro do circuito e só depois desligá-lo.
- Para trocar de função no multímetro, isto é, passar de voltímetro para amperímetro e vice-versa, SEMPRE desconectar os cabos do aparelho.

### 2.2. Voltímetro

- Girar a chave seletora do multímetro para a região  $\tilde{V}$  - quando estiver trabalhando com circuitos de corrente alternada - ou então para a região  $\overline{V}$  - quando trabalhar com circuitos de corrente contínua;
- Selecionar inicialmente a maior escala do voltímetro;
- Conectar o pino banana do terminal da ponta de prova preto no borne “COM” do multímetro;
- Conectar o pino banana do terminal da ponta de prova vermelho no borne “V/ $\Omega$ ” do multímetro;
- Colocar o voltímetro em paralelo com o elemento do circuito sobre o qual se deseja medir a diferença de potencial;
- Baixar gradualmente a escala até obter uma boa condição de leitura;
- Após fazer a leitura, desconectar o voltímetro do circuito e só depois desligá-lo.

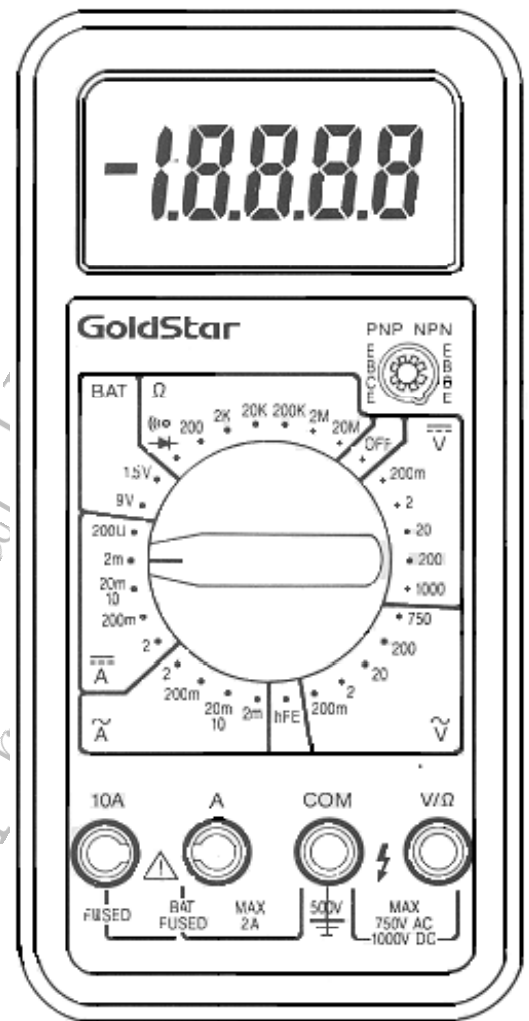


Figura 4.6: MULTIMETRO. Esta é o aspecto externo de um multímetro da marca Minipa utilizado no Laboratório.





- Para trocar de função no multímetro, isto é, passar de voltímetro para amperímetro e vice-versa, SEMPRE desconectar os cabos do aparelho.

### 3.2. Voltímetro

- Girar a chave seletora do multímetro para a região  $\overline{\overline{V}}$  quando estiver trabalhando com circuitos de corrente contínua. Quando trabalhar com circuitos de corrente alternada, aperte o botão “SHIFT” para mudar para  $\widetilde{V}$ ;
- Conectar o pino banana do terminal da ponta de prova preto no borne “COM” do multímetro;
- Conectar o pino banana do terminal da ponta de prova vermelho no borne “V/ $\Omega$ ” do multímetro;
- Colocar o voltímetro em paralelo com o elemento do circuito sobre o qual se deseja medir a diferença de potencial;
- Este equipamento conta com ajuste automático da escala de medição;
- Após fazer a leitura, desconectar primeiro o cabo vermelho e depois o cabo preto do voltímetro do circuito e só depois o desligar-lo.

### 3.3. Ohmímetro

- Girar a chave seletora do multímetro para a região  $\Omega$ ;
- Este equipamento conta com ajuste automático da escala;
- Conectar o pino banana do terminal da ponta de prova preto no borne “COM” do multímetro;
- Conectar o pino banana do terminal da ponta de prova vermelho no borne “V/ $\Omega$ ” do multímetro;
- Certificar-se de que o componente ou circuito a ser medido NÃO contém fontes.
- Colocar o ohmímetro em paralelo com o resistor que se deseja medir;
- Este equipamento conta com ajuste automático da escala de medição;
- Após fazer a leitura, desconectar primeiro o cabo vermelho e depois o cabo preto do ohmímetro do circuito e só depois o desligar-lo.

## 4. Tomadas

As tomadas de energia existentes nas bancadas do Laboratório de Física são todas padronizadas, de dois tipos, observe a figura 4.8: ou são de 127 V de alimentação (2 pinos chatos conjugados com 2 circulares e ainda o pino semicircular para o

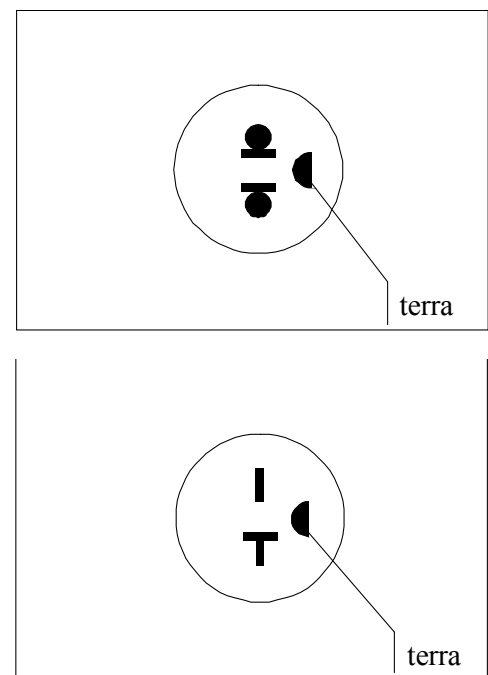


Figura 4.8: TOMADAS. Há dois tipos principais de tomadas elétricas no laboratório, uma que fornece 127 V e a que fornece 220 V. Perceba que os padrões utilizados não permitem o erro, conectar um equipamento para 127 V em 220 V. Mesmo assim fique atento.

terra) ou de 220 V (3 pinos chatos e um semicircular também para o terra).

Antes de ligar qualquer aparelho à rede de energia, verifique sempre a tensão de operação e procure na bancada o tipo específico de tomada para aquele aparelho.

Se, eventualmente, for necessário fazer um aterramento específico para um sistema de medidas, utilize um cabo conectado ao pino semicircular de uma das tomadas.

## 5. Fontes de Alimentação

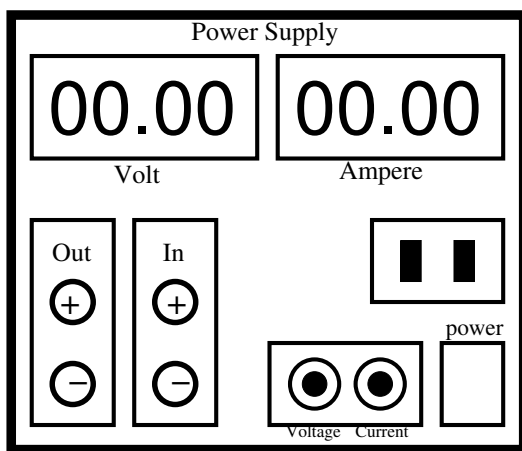


Figura 4.9: FONTE DE ALIMENTAÇÃO. A aparência da fonte de alimentação utilizada no laboratório está esquematizada nesta figura. Em cima pode-se ver os valores fornecidos por esta fonte em tensão e em corrente. Abaixo, no centro temos os controles para o ajuste da tensão e da corrente. Como pode-se perceber são dois botões giratórios superpostos para cada opção. O botão maior tem uma excursão maior e mais rápida dos valores enquanto que o botão menor o ajuste mais fino do valor pretendido. Com esta fonte pode-se ter a opção de tensão contínua ou de corrente contínua.

As fontes de alimentação permitem que se estabeleça uma diferença de potencial entre dois pontos de um circuito elétrico, fazendo com que circule uma corrente no circuito. As fontes que normalmente são utilizadas no Laboratório de Física Experimental são as de corrente contínua, capazes de fornecer uma diferença de potencial entre 0 e 30 V e uma intensidade de corrente variando continuamente de 0,02 a 2,5 A. Esta fonte de corrente contínua é alimentada com uma tensão externa de 220 V.

- Verificar a tensão de operação da fonte de corrente contínua e a conecte à rede de energia específica na bancada.
- Observar que na fonte há quatro terminais de conexão, localizados a esquerda, abaixo: dois de saída “OUT” e dois de entrada “IN”. Os dois terminais de saída (OUT) são os que fornecem uma diferença de potencial entre 0 e 30 V e uma intensidade de corrente de 0,02 a 2,5 A, sendo identificados pela cor vermelha (positivo) e preta (negativo). Os terminais de entrada “IN” possibilitam efetuar medidas de intensidade de corrente e diferença de potencial. Normalmente esta função do aparelho não será utilizada nesta disciplina.
- É possível operar com este aparelho ajustando a corrente e/ou a diferença de potencial de saída. Para isso há dois botões controladores, localizados no centro e abaixo, que possibilitam um ajuste normal (botão maior, externo) e também um ajuste fino (botão menor, interno).
- Verificar se os botões controladores da diferença de potencial e de corrente estão posicionados no valor mínimo (gire-os no sentido anti-horário até o final).
- Ligue a fonte (chave “L/D”).
- Utilizando o multímetro como voltímetro compare os valores da diferença de potencial mostrados pela fonte e pelo voltímetro.

6. Atividades Práticas: Medida da ...

As atividades propostas abaixo visam familiarizar os alunos com a montagem de circuitos elétricos, a realização de medidas com multímetros e a operação da fonte de corrente contínua. Realize-as com atenção. Se tiver dúvidas, pergunte ao professor antes de ligar o circuito. Para os diagramas de circuitos, veja a simbologia na tabela 4.7.

6.1. Diferença de Potencial em Circuitos em Série

- Montar o circuito da circuito 4.1. Utilizar dois resistores de valores diferentes em que o de um seja aproximadamente o dobro/metade do do outro. Não utilizar resistores de valores menores do que 200 Ω nem superiores a 10 kΩ. Conectar a fonte de corrente contínua a este circuito, identificando a saída positiva e negativa. Não ligue a fonte ainda;
- Conectar os terminais das pontas de prova (preto e vermelho) do multímetro digital nos bornes “COM” e “V/Ω” respectivamente;
- Selecionar no voltímetro digital a maior escala de tensão em corrente contínua “CC”;
- Ligar a fonte e forneça uma diferença de potencial elétrico de 9 volts ao circuito;
- Com o voltímetro medir no circuito as diferenças de potencial sobre os resistores individualmente e da combinação deles em série. Observe a polaridade das pontas de prova (vermelho: positivo ou potencial alto, e preto: negativo ou potencial baixo, comum ou terra);
- Se a escala estiver inadequada vá progressivamente descendo de escala até obter uma boa condição de leitura;
- Anote os valores das medidas indicadas na tabela da circuito 4.1.

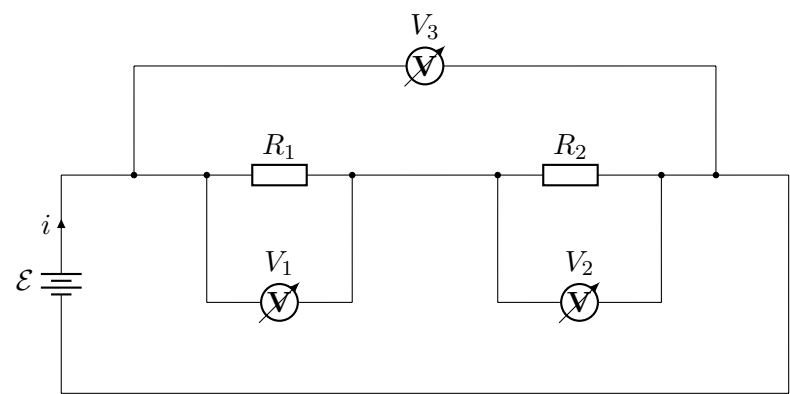


Tabela 4.7: SIMBOLOGIA. Símbolos utilizados nos equipamentos de testes elétricos e em desenhos de circuitos elétricos.

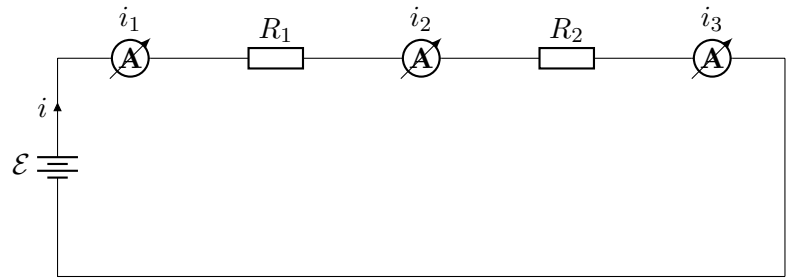
	Significado
.	Terra
$\overline{A}$	Corrente Contínua
$\tilde{A}$	Corrente Alternada
$\overline{V}$	Dif. de Potencial Contínua
$\tilde{V}$	Dif. de Potencial Alternada
$\Omega$	Resistência
BAT	Teste de Bateria

	Significado
	Resistor
	Diodo
	Lâmpada
	Capacitor
	Indutor
	Voltímetro
	Amperímetro
	Fonte de Tensão

Circuito 4.1: RESISTORES EM SÉRIE. Esquema elétrico da montagem experimental para o estudo da corrente elétrica em um sistema com dois resistores associados em série. O que podemos concluir sobre os valores das tensões elétricas?

$V_1$	_____
$V_2$	_____
$V_1 + V_2$	_____
$V_3$	_____

$i_1$	_____
$i_2$	_____
$i_3$	_____



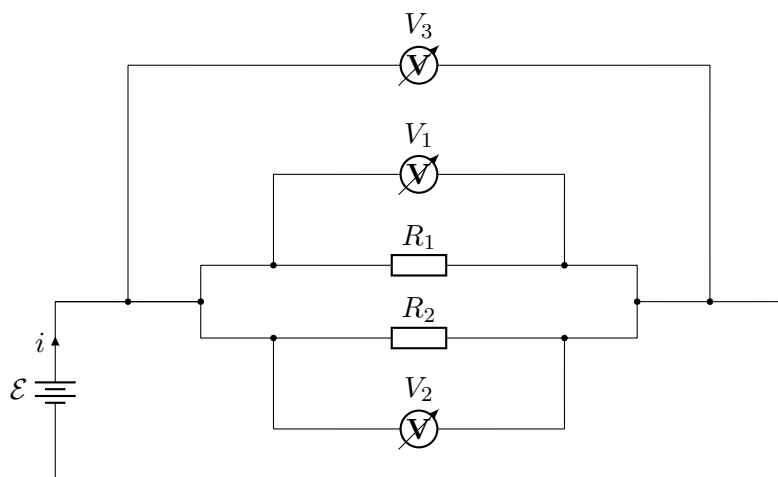
Circuito 4.2: RESISTORES EM SÉRIE. Esquema elétrico da montagem experimental para o estudo da corrente elétrica em um sistema com dois resistores associados em série. O que podemos concluir sobre os valores das correntes elétricas?

### 6.2. Intensidade de Corrente em Circuitos em Série

- Será utilizado o mesmo circuito montado na etapa anterior, trocando os medidores. Veja a circuito 4.2.
- Inicialmente preparar o multímetro para medidas de intensidade de corrente: conectar os terminais das pontas de prova (preto e vermelho) do multímetro digital nos bornes “COM” e “A” respectivamente;
- Posicionar a chave seletora da escala do amperímetro na escala máxima;
- Certificar que sempre se o amperímetro estiver ligado EM SÉRIE com algum elemento do circuito. Em caso de dúvida, consulte o professor.
- Ligar o amperímetro inicialmente na posição 1 indicada na circuito 4.2;
- Ligar a fonte de corrente contínua para 9 V de saída;
- Fazer a leitura indicada da intensidade de corrente. Anotar na tabela da circuito 4.2 o valor da corrente;
- Mover o amperímetro para as posições 2 e 3, observando sempre que para efetuar medidas de intensidade de corrente elétrica o circuito deve ser interrompido! Anote os valores da intensidade de corrente, preenchendo a tabela da circuito 4.2;
- Desligar a fonte.

### 6.3. Diferença de Potencial em Circuitos em Paralelo

- Montar o circuito da circuito 4.3;
- Conectar os terminais das pontas de prova (preto e vermelho) do multímetro digital nos bornes “COM” e “V/Ω” respectivamente;
- Selecionar no voltímetro digital a maior escala;
- Fornecer uma diferença de potencial elétrico de 9 V ao circuito;
- Com o voltímetro meça no circuito as diferenças de potencial sobre os resistores individualmente e da combinação deles em paralelo. Observar a polaridade das pontas de prova (vermelho positivo e preto negativo);



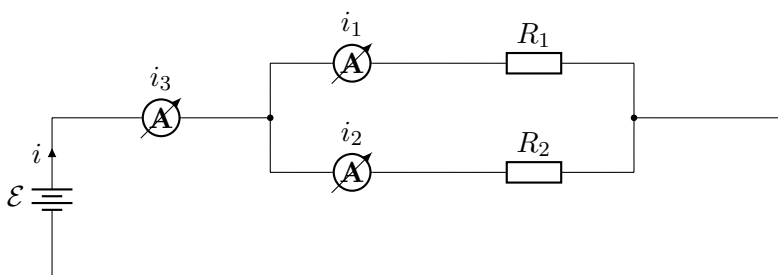
$V_1$	_____
$V_2$	_____
$V_3$	_____

Circuito 4.3: RESISTORES EM PARALELO. Esquema elétrico da montagem experimental para o estudo da corrente elétrica em um sistema com dois resistores associados em paralelo. O que podemos concluir sobre os valores das tensões elétricas?

- Se a escala estiver inadequada desça progressivamente descendo de escala até obter uma boa condição de leitura;
- Anotar os valores das medidas indicadas na tabela do circuito 4.3.

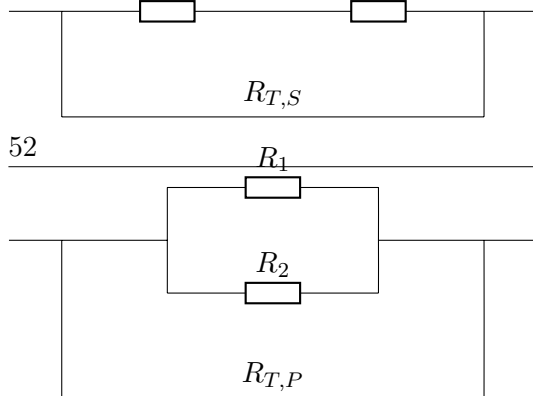
#### 6.4. Intensidade de Corrente em Circuitos em Paralelo

- Para estas medidas será utilizado o mesmo circuito montado na etapa anterior.
- Inicialmente preparar o multímetro para medidas de intensidade de corrente: conectar os terminais das pontas de prova (preto e vermelho) do multímetro digital nos bornes "COM" e "A" respectivamente;
- Posicionar a chave seletora da escala do amperímetro na escala máxima;
- Montar o amperímetro inicialmente na posição 1 indicada na circuito 4.4;
- Ligue a fonte de corrente contínua para 9 V de saída;
- Fazer a leitura indicada da intensidade de corrente. Anote na tabela do circuito 4.4 o valor da corrente nesta posição;



$i_1$	_____
$i_2$	_____
$i_1 + i_2$	_____
$i_3$	_____

~~Circuito 4.4: RESISTORES EM PARALELO.~~ Esquema elétrico da montagem experimental para o estudo da corrente elétrica em um sistema com dois resistores associados em paralelo. O que podemos concluir sobre os valores das correntes elétricas?



Medido	$R_1$	_____
	$R_2$	_____
	$R_{T,S}$	_____
	$R_{T,P}$	_____
calculado	$R_{T,S}$	_____
	$R_{T,P}$	_____

Tabela 4.8: ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES. Para verificar as expressões matemáticas de associações de resistores, em série e em paralelo, devemos medir os valores, por meio de um multímetro, destas associações. Nesta figura temos o diagrama elétrico das duas associações. Anote os valores necessários na tabela associada.

Tabela 4.9: RESISTÊNCIA INTERNA DO VOLTIMETRO. Um medidor de tensão elétrica pressupõe a passagem de corrente elétrica através de um galvanômetro, assim é necessário uma resistência  $R_q$  interna ao medidor. Assim é conveniente saber qual é a resistência utilizada, anotando-as para a duas escalas extremas.

Escala	Valor da Escala	Resistência Interna
Máxima	_____	_____
Mínima	_____	_____

Tabela 4.10: RESISTÊNCIA INTERNA DO AMPERÍMETRO. Um medidor de tensão elétrica pressupõe a passagem de corrente elétrica através de um galvanômetro, assim é necessário uma resistência  $R_d$  interna ao medidor. Assim é conveniente saber qual a resistência utilizada, anote-as para a duas escalas extremas.

Escala	Valor da Escala	Resistência Interna
	_____	_____

- Mover o amperímetro para as posições 2, 3 e 4, observando sempre que para efetuar medidas de intensidade de corrente elétrica o circuito deve ser interrompido! Anote os valores da corrente, preenchendo a tabela da circuito 4.4.

### 6.5. Resistência em Circuitos

- Selecionar no multímetro digital a escala para medir resistências. Escolha inicialmente a maior escala;
- Conectar os terminais das pontas de prova (preto e vermelho) do multímetro digital nos bornes “COM” e “V/ $\Omega$ ” respectivamente;
- Escolher dois resistores e determine com o multímetro a resistência de cada um deles. Os resistores devem estar desconectados da fonte de alimentação.
- Anotar estes valores.
- Conectar estes dois resistores em série (veja a tabela 4.8a) e meça a resistência da combinação.
- Conectar estes dois resistores em paralelo (veja a tabela 4.8b) e meça a resistência da combinação.

### 6.6. Resistência Interna de um Voltímetro Analógico

- Selecionar a escala mínima do voltímetro analógico em corrente contínua;
- Conectar as pontas de prova do multímetro digital nos terminais do voltímetro analógico;
- Se a escala da resistência selecionada no multímetro digital for inadequada, ajustar essa para um valor mais baixo até obter uma boa leitura. Anote o valor da resistência interna do voltímetro analógico na tabela 4.9.
- Repetir o mesmo procedimento para a maior escala do voltímetro analógico;
- Anotar o valor da resistência interna do voltímetro analógico para esta escala na tabela 4.9.

### 6.7. Resistência Interna de um Amperímetro Analógico

- No amperímetro analógico selecionar inicialmente a escala mínima;
- Conectar os terminais das pontas de prova (preto e vermelho) do multímetro digital nos bornes “COM” e “V/ $\Omega$ ” respectivamente;

- Selecionar no multímetro digital a escala para medir resistências. Escolha inicialmente a maior escala;
- Conectar as pontas de prova do multímetro digital nos terminais do amperímetro analógico;
- Se a escala da resistência selecionada no multímetro digital for inadequada, ajustar essa para um valor mais baixo até obter uma boa leitura. Anotar o valor para a resistência interna na tabela 4.10;
- Repetir o mesmo procedimento para a maior escala do amperímetro analógico;
- Anotar o valor da resistência interna do amperímetro para esta escala na tabela 4.10.

## 7. Questões

Para fixar o conteúdo desta aula, responda as seguintes questões:

- Qual a função do voltímetro?
- Como funciona um voltímetro?
- Qual a função do amperímetro?
- Como funciona um amperímetro?
- Qual a função do ohmímetro?
- Como funciona um ohmímetro?
- Por que a resistência interna de um amperímetro deve ser muito pequena? Mas por que não infinitamente pequena?
- Por que a resistência interna de um voltímetro deve ser a maior possível? Mas por que não infinitamente grande?
- O que acontecerá ao multímetro, quando ele estiver ligado a um circuito elétrico cuja intensidade de corrente elétrica  $I$  é muito maior que a escala selecionada no mostrador do amperímetro? Por quê?

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*



## EXPERIMENTO 5

---

### Superfícies Equipotenciais e Campos Elétricos

---

#### 5.1. Objetivos

- Determinação das superfícies (ou curvas) equipotenciais e dos vetores campo elétrico para uma distribuição de condutores e cargas elétricas.

#### 5.2. Material Utilizado

Fonte de corrente contínua, voltímetro, papel condutor, placa de cortiça, pinos metálicos, cabos para conexão e computador.

#### 5.3. Bibliografia

- “Física”, P. Tipler, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 2: 4a Ed. Cap.26; 5a e 6a Ed. Cap. 25.
- “Fundamentos de Física”, D. Halliday e R. Resnick, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 3: 6a Ed. Cap.27 e 28; 7ª e 8a Ed. Cap.26 e 27.
- “Física”, F. Sears, M.W. Zemansky e H.D. Young, Vol 3, (1984), Cap. 29.

#### 5.4. Roteiro de Estudo

1. Qual é a relação matemática entre campo elétrico e potencial elétrico?
2. Qual é a relação matemática entre a densidade de carga e o campo elétrico?
3. Como se define uma superfície (ou curva) equipotencial?

4. Qual é a direção do vetor campo elétrico em relação a uma superfície (ou curva) equipotencial?
5. Qual é o significado físico das linhas de campo elétrico?
6. Represente esquematicamente as superfícies equipotenciais e as linhas do campo elétrico para uma carga puntiforme positiva  $q$ .
7. Com base no seu desenho, onde o potencial é maior, próximo ou afastado da carga positiva?
8. Represente as superfícies equipotenciais para duas cargas pontuais de sinais opostos separados por uma distância  $d$ .
9. Cite duas situações do cotidiano onde os fenômenos estudados estão envolvidos e são relevantes.

### 5.5. Procedimento Experimental

Este experimento consiste em aplicar uma diferença de potencial entre eletrodos de diferentes formas geométricas (por exemplo: pontos, linhas paralelas e círculos) desenhados com uma caneta com tinta condutora sobre um papel condutor (cuja resistência entre dois pontos separados por 1 cm está entre 5 k $\Omega$  e 20 k $\Omega$ ).

Através da análise do potencial em diversos pontos do papel condutor faz-se um levantamento das superfícies (ou curvas no caso do papel) equipotenciais e, por consequência, dos vetores campo elétrico.

Trabalharemos sempre com diferenças de potencial de no máximo 5 V e marcaremos o papel condutor com coordenadas  $x$  de 1 a 27 e coordenadas  $y$  de 1 a 19 que representam as distâncias em centímetros a partir da origem.

O uso do papel especial condutor é necessário tendo em vista a necessidade de se fazer medidas do potencial elétrico com o voltímetro em diferentes regiões, o que só pode ser realizado se tivermos um meio que permita a passagem de uma corrente elétrica.

#### Coleta de Dados

Nesta montagem dois eletrodos desenhados com tinta condutora já estão conectados a fios condutores através de parafusos conforme a gráfico 5.2. Não desfaça esta conexão durante ou após o experimento.

Tabela 5.1: PAPEL RESISTIVO. Determine os espaçamentos nas duas direções em que estão sendo feitas a coleta dos valores dos potenciais.

$\Delta x$	_____
$\Delta y$	_____

- Medir a distância horizontal  $x$  entre dois pontos adjacentes marcados com o símbolo '+' no papel. Repetir o procedimento para a distância vertical  $y$ . Anote os valores na tabela 5.1.

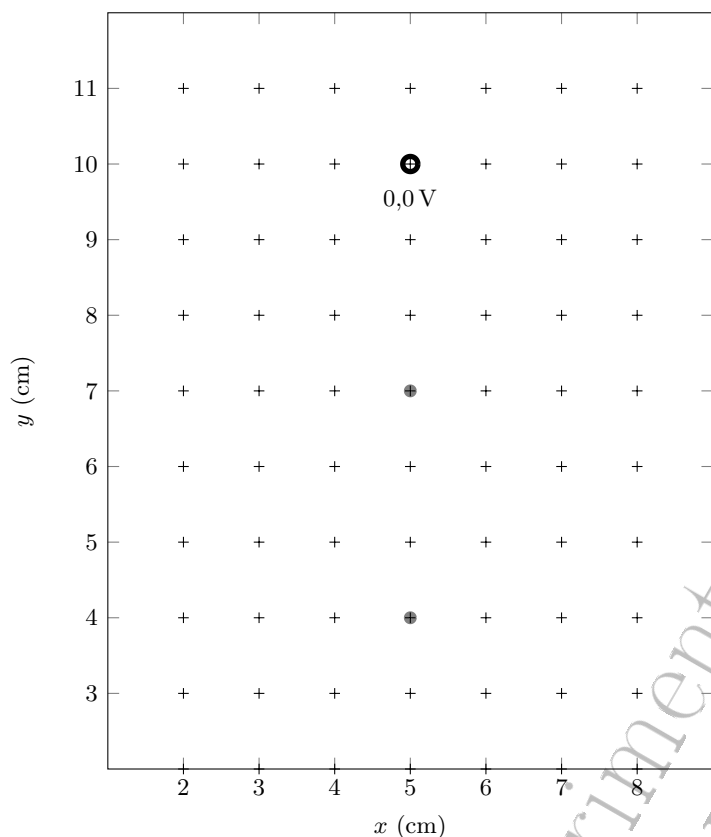


Gráfico 5.1: SUPERFÍCIES EQUIPOTENCIAIS. Transcreva os valores obtidos das medidas de potencial efetuadas sobre o papel resistivo nesta tabela, junto embaixo da marca correspondente. Perceba que a distância entre cada ponto obedece a escala espacial do papel. Tome como exemplo o valor escrito explicitamente para o eletrodo pontual. Para a análise dos dados obtidos veja a sessão 5.6. Percebe-se dois dos pontos em que se deve calcular e desenhar, sobre o diagrama, estes vetores obedecendo a escala de  $10 \text{ V/m:1 cm}$  (da régua). Não esqueça de transcrever estes dois vetores para gráfico 5.2. Desenhe, também, sobre este quadro duas superfícies equipotenciais, uma para  $1,0 \text{ V}$  e outra para  $2,0 \text{ V}$ , a partir dos valores que você escreveu.

- Ligar o terminal + da fonte ao eletrodo circular interno e o terminal – da fonte ao eletrodo em forma de ponto, mostrados na gráfico 5.2.
- Conectar a ponta preta do voltímetro ao terminal preto da fonte de corrente contínua. Assim, a diferença de potencial será medida em relação a este ponto.
- Ligar a fonte de corrente contínua e regule-a para fornecer  $5 \text{ V}$ .
- Com a ponta vermelha do voltímetro (ligado ao terminal “ $\text{V}/\Omega$ ”) você poderá fazer a medida de diferenças de potencial em relação ao terminal – da fonte.
- Para explorar o papel inicialmente faça a leitura da diferença de potencial do eletrodo pontual, do anel circular interno e de alguns pontos entre estes dois. Você percebe algum padrão?
- Agora faça sistematicamente a leitura do potencial em todos os pontos entre as coordenadas  $(1,1)$  e  $(27, 19)$  (seguindo a grade) do papel condutor.
- Digitar cada valor do potencial lido na planilha da tela do computador, respeitando as coordenadas de cada ponto.
- Após a leitura da diferença de potencial em todos os pontos, desligar a fonte de corrente contínua.
- Após concluir a digitação de todas as leituras você deverá salvar este arquivo com um formato bem específico: “**csv**”.

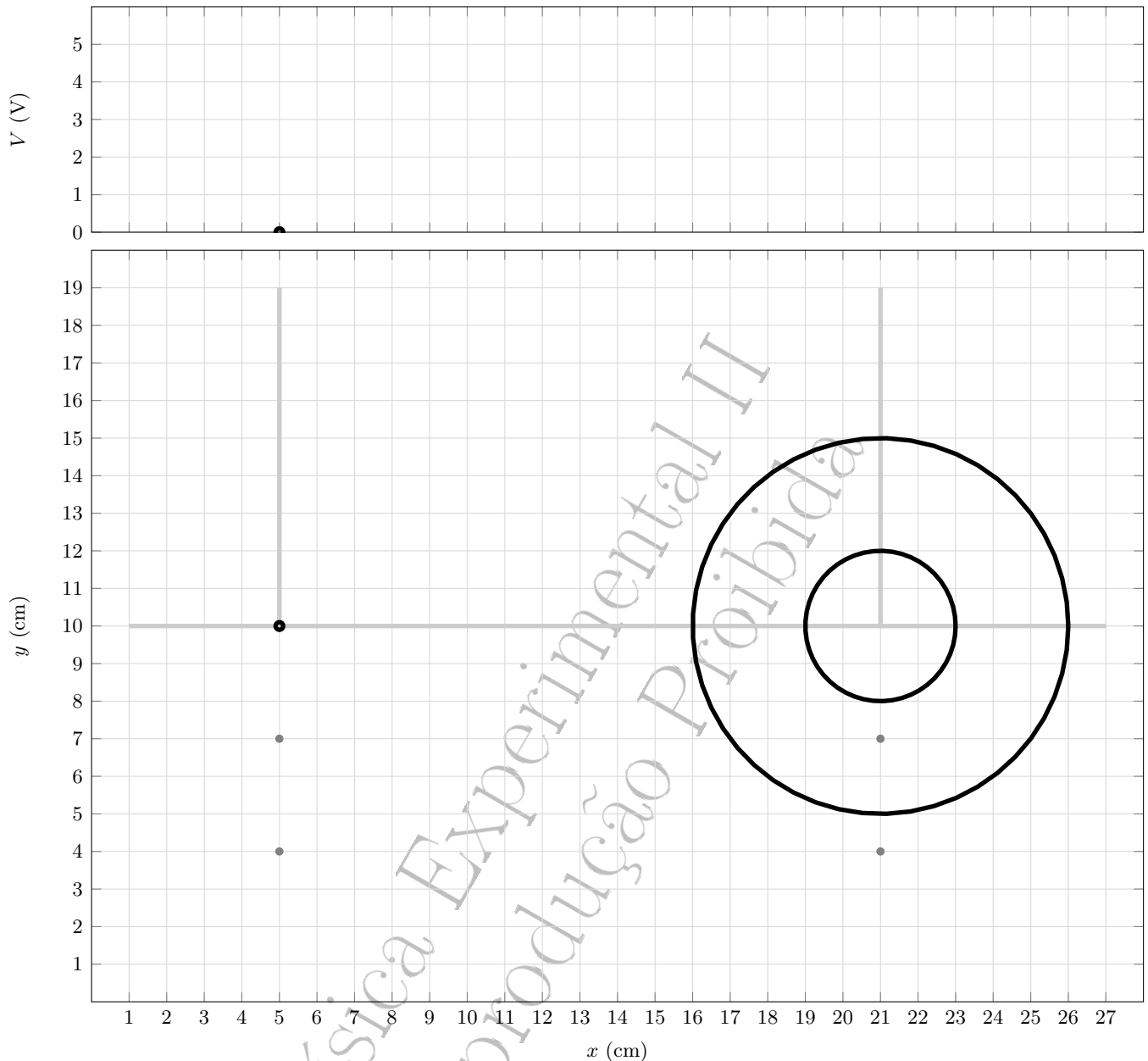


Gráfico 5.2: SUPERFÍCIES EQUIPOTENCIAIS E CAMPOS ELÉTRICOS. Esta figura é um esquema do papel resistivo que você utilizou para o experimento. Após a análise feita usando o computador, você deverá fazer o esboço das superfícies equipotenciais sobre este desenho. Você pode notar a existência de três linhas em cinza. Os valores dos potenciais medidos sobre a linha horizontal deverão ser usados para fazer o gráfico do painel superior. Já nos pontos medidos sobre linhas verticais você deverá desenhar os vetores campos elétricos que você obteve, com o computador, mantendo orientação e intensidade. Você também perceberá quatro pontos na parte inferior do papel. Para estes você deverá calcular o vetor campo elétrico e desenhar, sobre o diagrama, estes vetores obedecendo a escala de  $10 \text{ V/m:1 cm}$  (da régua). Note que esta escala é diferente da calculada pelo computador.

Quando perguntado sobre o tipo de delimitadores, escolha “espaços”.

### 5.6. Análise de Resultados

- Traçe, para esta configuração de eletrodos, as curvas equipotenciais usando um programa de construção de gráficos (programa: `equipot`) e esboçe as linhas de equipotenciais.
- Faça o esboço das linhas de equipotenciais obtidas sobre a gráfico 5.2.
- Qual é a forma geométrica das curvas de equipotencial próximas ao eletrodo pontual?

- Faça um gráfico da diferença de potencial ao longo da linha que une o eletrodo pontual ao centro dos círculos. Esboce o resultado na parte superior da gráfico 5.2. Esse gráfico é simétrico em relação à posição do eletrodo pontual? Por que? Que relação tem isso com a forma das curvas equipotenciais?
- Qual é a forma geométrica das curvas equipotenciais entre os dois círculos concêntricos?
- Como é o potencial elétrico no interior do eletrodo circular interno? Qual é o campo elétrico nesta região?
- Determinar, por meio da derivada (calculada numericamente), o campo elétrico em quatro pontos indicados na gráfico 5.2.

Lembre que  $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$  ou, aproximadamente,

$$\vec{E} = -\left(\frac{\Delta V_x}{\Delta x}\hat{i} + \frac{\Delta V_y}{\Delta y}\hat{j}\right).$$

- Desenhe os quatro vetores campo elétrico calculados, obedecendo a escala de 10 V/m:1 cm.
- Continuando com o mesmo programa, trace os vetores campo elétrico sobre a figura anterior. Analisar este gráfico.
- Sobre a gráfico 5.2 temos duas linhas na metade superior do esboço. Esboce os vetores campo elétrico sobre cada um destes pontos. Observe com cuidado o módulo, a direção e sentido destes vetores.
- Comente sobre a relação geométrica existente entre as curvas equipotenciais e os vetores campo elétrico.

## 5.7. Apêndice

Para esta atividade iremos inicialmente anotar em uma planilha as medidas obtidas sobre a folha resistiva.

- Para acessarmos esta planilha devemos inicialmente pegar um terminal que é acessível clicando sobre o ícone **konsole**, que está na área de trabalho. Com o terminal aberto você poderá chamar um programa que permite a digitação dos valores medidos utilizando os comandos a seguir.

```
% equipot.reset
% ooffice equipot.ods &
%
```

Você deve observar que o símbolo '%' não precisa ser digitado pois este está representando o 'pronto' do terminal. O símbolo '&' é necessário para que se possa colocar os próximos comandos no mesmo terminal. Caso você tenha esquecido, você terá que abrir um outro terminal para a sequência de comandos que virão depois.

- Uma vez digitado todos os dados na planilha você deverá salvá-la em um formato adequado para que os próximos comandos possam resultar. Você deverá escolher um nome para seu arquivo, aqui escolhemos `seunome.csv`. O conteúdo da planilha deverá ser salvo no formato “csv”, linha “filtro” abaixo do nome do arquivo. Caso o nome do arquivo não mude a extensão automaticamente faça-o. Ao salvar você deverá confirmar o formato do arquivo de saída.

Como existe a possibilidade de diversos tipos de delimitadores deve surgir uma janela para permitir estas escolhas. Aqui utilizaremos os seguintes delimitadores: `Field/Campo` será a vírgula e `Text/Texto` deverá ser as aspas, que em geral já está proposto.

- Como podem ter ocorrido erros de digitação você NÃO deverá fechar esta planilha. Para continuar a atividade você deverá clicar na barra do `konsole` que já havia sido aberta. Aqui em geral ela estará com o seguinte título: `laboratorio: bash`.
- Você pode verificar se o arquivo foi salvo pelo comando

```
% ls -l seunome.csv
```

Após a execução do comando você terá a resposta

```
% ls -l seunome.csv
-rw-r--r-- 1 laboratorio users 3630 Feb 16 20:16 seunome.csv
%
```

O importante é que este arquivo exista e tenha um tamanho não muito diferente do valor que aqui está como exemplo.

- Agora passamos à análise gráfica dos dados fazendo o comando no terminal

```
% equipot seunome.csv
```

Observe que neste comando NÃO colocou-se o símbolo ‘&’.

A partir deste comando deve surgir um gráfico que lembra a planilha com os valores numéricos modificados para um código de cores que representam a tensão medida sobre a folha resistiva.

- Para obter os próximos gráficos você deverá retornar a “mouse” sobre a janela do terminal. Para você ter certeza que a janela está ativa basta você olhar o quadro da janela, ele deverá ter uma cor forte enquanto que as janelas não ativas possuirão cores mais fracas.
- Você deverá
  - comparar as linhas das superfícies equipotenciais com o padrão de cores (pressione “enter”);
  - comparar o desenho dos condutores com as linhas das superfícies equipotencias (pressione “enter”);
  - comparar os vetores campo elétrico desenhados com as linhas das superfícies equipotenciais (pressione “enter”) e

- comparar os vetores campo elétrico desenhados com os condutores desenhados.
- Para salvar os gráficos você poderá clicar a lista do menu representado pelo acento circunflexo invertido. Você poderá clicar “exportar para PDF”. Surge uma janela onde a esquerda temos “locais” para gravação. Você poderá inserir uma pendrive no computador ea última linha dos “locais” será esta pendrive. Você deverá clicar nesta pendrive e escolher um nome para seu arquivo com extensão “.pdf”. Caso você escolha “Export to image” você salvará o gráfico em formato “png”, e assim por diante.
- Sugere-se que a cada passo da análise você salve o gráfico correspondente com um nome adequado. Para obter novamente os mesmos gráficos refaça o comando

```
% equipot seunome.csv
```

e continue como já havia feito...

Física Experimental II  
Reprodução Proibida

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*



## EXPERIMENTO 6

---

---

### Elementos Ôhmicos e não-Ôhmicos

---

---

#### 6.1. Objetivos

- Estudar a relação entre diferença de potencial, intensidade de corrente e resistência para resistores, diodos e lâmpadas.
- Determinar a variação da intensidade de corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em resistores, diodos e lâmpadas.
- Diferenciar a resposta de elementos ôhmicos e não ôhmicos sob diferentes valores da diferença de potencial aplicada.

#### 6.2. Material Utilizado

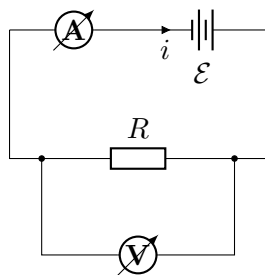
Fonte de corrente contínua; multímetros, placa para conexão de resistores, resistores diversos, diodo, lâmpada incandescente e cabos para conexão.

#### 6.3. Bibliografia

- “Física”, P. Tipler, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 2: 4a Ed. Cap.22 a 24; 5a e 6a Ed. Cap. 21 a 23.
- “Fundamentos de Física”, D. Halliday e R. Resnick, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 3: 6a Ed. Cap.23 a 25; 7ª e 8a Ed. Cap.22 a 24.
- “Física”, F. Sears, M.W. Zemansky e H.D. Young, Vol 3, (1983), Cap.28.

#### 6.4. Roteiro de Estudo

1. O que afirma a Lei de Ohm?



Circuito 6.1: CIRCUITO PARA A ANÁLISE DO RESISTOR. Esquema elétrico da montagem experimental para o estudo da resistência elétrica de um resistor comercial.

Tabela 6.1: RESISTOR. Medir a resistência elétrica do resistor utilizado por meio do multímetro.

$R =$
-------

Tabela 6.2: RESISTOR. As medidas da intensidade de corrente e da diferença de potencial no resistor devem ser anotadas aqui.

$V_F$ (V)	$I$ (A)	$V_R$ (V)
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
0		
-1		
-2		
-3		
-4		
-5		
-6		
-7		
-8		
-9		
-10		

- O que é um resistor?
- Com base na lei de Ohm, diferencie elementos ôhmicos de elementos não ôhmicos.
- Como se define a resistência entre dois pontos de um condutor?
- Quais são as unidades no S.I. para intensidade de corrente elétrica, diferença de potencial e resistência elétrica?
- O que é um diodo?
- Explique como se deve utilizar um multímetro em um circuito a fim de medir a intensidade de corrente elétrica num ponto de um circuito.
- Explique como se deve utilizar um multímetro em um circuito a fim de medir a diferença de potencial entre dois pontos de um circuito.
- Cite três situações do cotidiano onde os fenômenos estudados estão envolvidos e são relevantes.

## 6.5. Procedimento Experimental

Observação: Antes de iniciar as medidas, verificar se o limitador de corrente da fonte está na posição máxima.

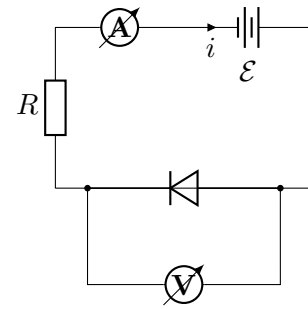
### 6.5.1. Resistor

- Inicialmente preparar um multímetro para a função de amperímetro (conectar os terminais das pontas de prova - preto e vermelho - do multímetro digital nos bornes "COM" e "A", respectivamente, e selecionar a escala de 2 A em corrente contínua);
- Preparar o outro multímetro para a função de voltímetro (conecte os terminais das pontas de prova - preto e vermelho - do multímetro digital nos bornes "COM" e "V/Ω", respectivamente) e selecionar no voltímetro a maior escala de tensão (em corrente contínua);
- Montar o circuito da tabela 6.2 com um resistor de 1 kΩ. Conecte a fonte de corrente contínua a este circuito, identificando a saída positiva e negativa;
- Ligar a fonte e ajuste-a para fornecer uma diferença de potencial de 1 volt ao circuito;
- Com o voltímetro, medir no circuito a diferença de potencial  $V$  sobre o resistor. Observar a polaridade das pontas de prova (vermelho corresponde ao pólo positivo e preto corresponde ao pólo negativo). Iniciar sempre pela escala de maior valor no multímetro.

- Se a escala estiver inadequada, ir progressivamente utilizando escalas de menor amplitude até obter uma boa condição de leitura;
- Com o amperímetro medir no circuito a intensidade da corrente elétrica  $I$  que atravessa o resistor. Observar a polaridade das pontas de prova (vermelho: positivo e preto: negativo);
- Se a escala estiver inadequada ir progressivamente descendo de escala até obter uma boa condição de leitura.
- Anote os valores de  $V$  e de  $I$ , e suas respectivas unidades, na tabela 6.2;
- Aumentar a diferença de potencial conforme os valores solicitados na tabela 6.2 e medir os respectivos valores para a diferença de potencial e intensidade de corrente elétrica, preenchendo a primeira metade da tabela 6.2.
- Inverta os cabos dos pólos da fonte (mantendo as mesmas conexões no voltímetro e no amperímetro) e medir novamente a diferença de potencial e a intensidade de corrente, completando a tabela 6.2. Este passo tem por objetivo verificar se o resistor muda o seu comportamento com a inversão do sentido da corrente.
- Desconectar o resistor do circuito e aplicar as pontas de prova do multímetro na função ôhmímetro nos terminais do resistor, anotando o valor indicado no multímetro na tabela 6.1.

### 6.5.2. Diodo

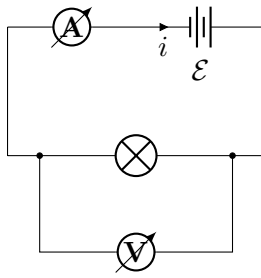
- Para esta etapa inicial, o diodo deve estar desconectado do circuito.
- Determinar a polaridade do diodo usando para isso o ohmímetro: conectar os terminais das pontas de prova - preto e vermelho - de um multímetro digital nos bornes “COM” e “V/ $\Omega$ ” respectivamente;
- Selecionar a função diodo, na escala da resistência;
- Aplicar as pontas de prova ao diodo e observe o mostrador. Os terminais do diodo podem ser encaixadas diretamente dos respectivos bornes do multímetro;
- Se o display indicar o valor 1 significa que não está passando corrente elétrica através do diodo, ou seja a polaridade dele está invertida. Inverter a posição das pontas de prova. Se agora surgir no mostrador algum valor numérico, então a ponta de prova vermelha está sobre o pólo positivo e a ponta de prova preta está sobre o pólo negativo do diodo. O valor numérico representa a tensão de condução do diodo em milivolts.



Circuito 6.2: CIRCUITO PARA A ANÁLISE DO DIODO. Esquema elétrico da montagem experimental para o estudo do diodo. Não esquecer de colocar um resistor em série com o diodo. Por que deve ser acrescentado um resistor ao circuito?

Tabela 6.3: DIODO. Intensidade de corrente e diferença de potencial no diodo. Poder-se-á perceber que será necessário detalhar as medidas no intervalo entre 0 e 1 V.

$V_F$ (V)	$I$ (A)	$V_D$ (V)
0		
0.1		
0.2		
0.3		
0.4		
0.5		
0.6		
0.7		
0.8		
0.9		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
0		
-1		
-2		
-3		
-4		
-5		
-6		
-7		
-8		
-9		
-10		



Circuito 6.3: CIRCUITO PARA ANÁLISE DA LÂMPADA INCANDESCENTE. Esquema elétrico da montagem experimental para o estudo de uma lâmpada incandescente.

Tabela 6.4: LÂMPADA INCANDESCENTE. Intensidade de corrente e diferença de potencial na lâmpada incandescente.

$V_F$ (V)	$I$ (A)	$V_L$ (V)
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
9		
12		
15		
18		
21		
24		
27		
30		
0		
-1		
-2		
-3		
-4		
-5		
-6		
-9		
-12		
-15		
-18		
-21		
-24		
-27		
-30		

- Torne a ligar este multímetro na função voltímetro ou amperímetro.
- Identificados os pólos do diodo, montar o circuito da circuito 6.2,

NÃO ESQUECER de associar o resistor de  $1\text{ k}\Omega$  em série no circuito;

- Repetir o procedimento descrito da seção relativa ao resistor;
- Com o voltímetro medir a diferença de potencial aplicada sobre o diodo e com o amperímetro medir a corrente que atravessa o diodo, anotando os valores na tabela 6.3.
- Inverter os terminais preto e vermelho da fonte e determinar novamente a intensidade de corrente e a diferença de potencial no diodo. Este passo permite observar se o diodo tem seu comportamento modificado com a inversão da polaridade da fonte.
- Desconectar o diodo do circuito e observar o que ocorre com a corrente.
- Construir um gráfico como pedido na Análise de Resultados.

### 6.5.3. Lâmpada Incandescente

Vamos aplicar o mesmo procedimento à uma lâmpada elétrica, mas antes de tudo meça a resistência elétrica da lâmpada utilizando um multímetro na função de ôhmímetro. Anote este valor na tabela 6.5.

- Seguir o procedimento descrito na seção relativa do resistor, trocar o resistor pela lâmpada incandescente de  $40\text{ W}$ . Observe a circuito 6.3.
- Ajustar a fonte e aplicar as tensões indicadas na tabela 6.4. Fazer as medidas da diferença de potencial e da intensidade de corrente, anotando na tabela 6.4.
- Inverter os terminais preto e vermelho da fonte e determinar novamente a intensidade de corrente e a diferença de potencial na lâmpada. Assim será possível avaliar o comportamento da lâmpada quando a corrente tiver seu sentido invertido.

## 6.6. Análise de Resultados

### 6.6.1. Resistor

- Com os dados da tabela 6.2, fazer um gráfico da corrente em função da tensão para o resistor. Representar num

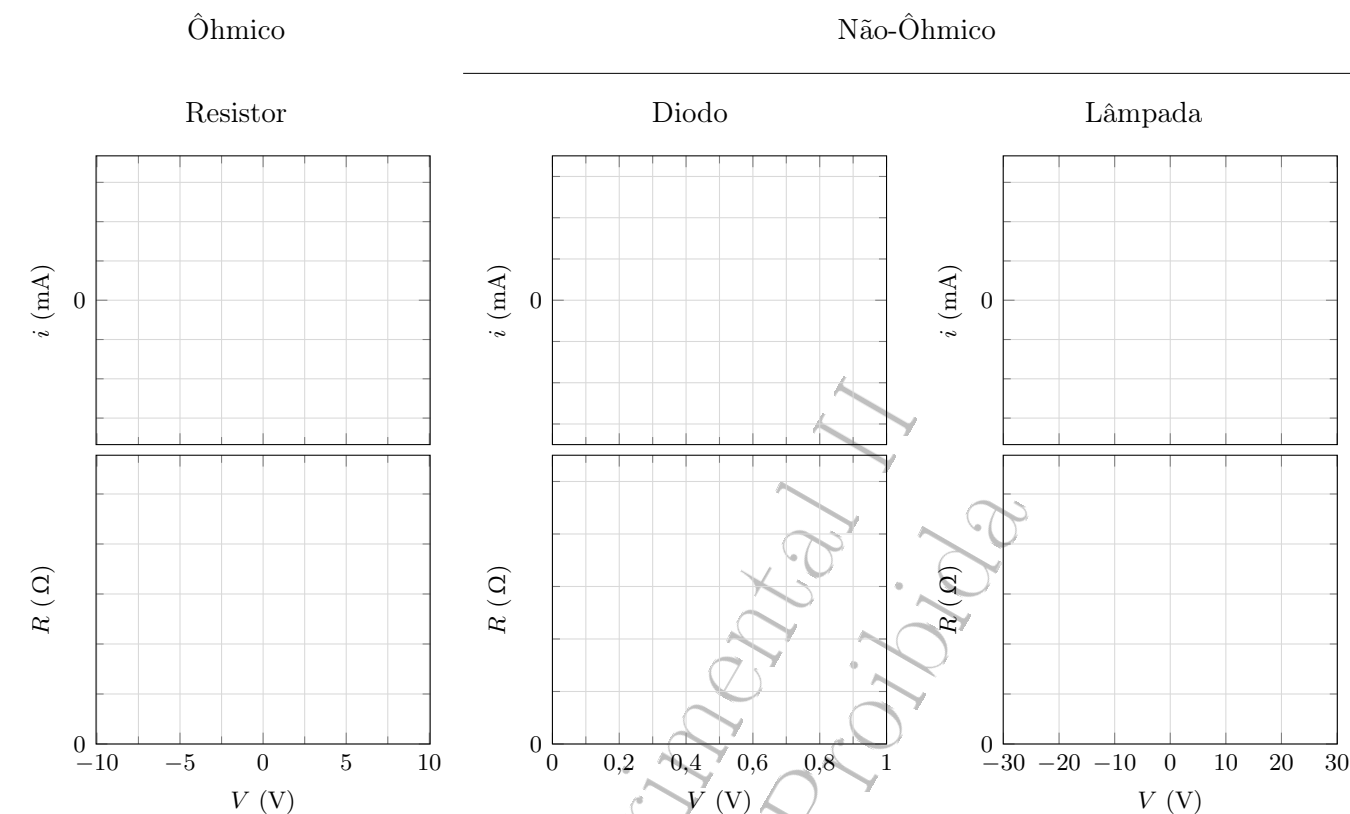


Gráfico 6.1: ELEMENTOS ÔHMICOS E NÃO-ÔHMICOS. Você deverá fazer o esboço dos gráficos obtidos durante a análise de dados para os três componentes considerados: o resistor, o diodo e a lâmpada. No diagrama inferior colocar o esboço da resistência elétrica associada ao gráfico superior. No caso do diodo considere somente o detalhe entre 0 V e 1 V deverá ser esboçado. Observe que a escala horizontal é a mesma nos diagramas superior e inferior. Nos eixos verticais deverão ser colocados os valores numéricos compatíveis com o seu experimento.

único gráfico os pontos para as tensões positivas e negativas. Qual a forma do gráfico? Ajustar uma função a estes pontos experimentais.

- De que modo é possível determinar, a partir do gráfico, a resistência  $R$  do resistor?
- Comparar o valor de  $R$  obtido através do gráfico com o valor nominal do resistor.
- Através do gráfico é possível dizer se o resistor é um elemento ôhmico? Justificar.
- O sentido da corrente modifica o comportamento do resistor? Explicar.

### 6.6.2. Diodo

- Com os dados da tabela 6.3, fazer um gráfico da corrente em função da tensão para o diodo. Representar em gráficos separados os pontos para as tensões positivas e negativas. Quais são as formas destes gráficos?
- É possível determinar de que forma varia a resistência  $R$  do diodo, a partir do gráfico? Justificar.
- Através do gráfico é possível dizer se o diodo é um elemento ôhmico? Justificar.

- Para a região de polarização direta, calcular a resistência  $R$  em cada ponto e faça um gráfico de  $R$  em função de  $V$ . Utilizar escala logarítmica no eixo correspondente a  $R$ .
- Como você pode explicar o comportamento da corrente após desconectar o diodo, na situação de polarização reversa?
- A polaridade da fonte modifica o comportamento do diodo? Explicar.

### 6.6.3. Lâmpada Incandescente

Tabela 6.5: Para efetuarmos o gráfico da resistência elétrica da lâmpada é necessário o valor desta resistência para a tensão 0 V, portanto quando não passa corrente elétrica. Então devemos usar um multímetro na função ôhmímetro para determinar esta resistência elétrica. Perceba que é importante fazer esta medida com a lâmpada ainda fria.

---


$$R(V = 0 \text{ V})$$


---

- Com os dados da tabela 6.4, fazer um gráfico da corrente em função da tensão para a lâmpada. Representar num único gráfico os pontos para as tensões positivas e negativas. Qual a forma do gráfico?
- É possível determinar de que forma varia a resistência  $R$  da lâmpada, a partir do gráfico? Justifique.
- Através do gráfico é possível dizer se a lâmpada é um elemento ôhmico? Justifique!
- Calcular a resistência  $R$  em cada ponto e fazer um gráfico de  $R$  em função de  $V$ .
- A resistência elétrica da lâmpada variou? Em caso afirmativo explicar por quê.
- O sentido da corrente modifica o comportamento da lâmpada incandescente? Explicar.

## EXPERIMENTO 7

---

### Comportamento de Fontes de Tensão em Função da Corrente

---

#### 7.1. Objetivos

- Analisar quantitativamente a tensão fornecida por uma fonte em função da corrente que circula por ela
- Verificar experimentalmente a condição de máxima transferência de potência.

#### 7.2. Material Utilizado

Fontes de corrente contínua com constituição interna desconhecida (“caixa preta”), dois multímetros digitais, placa para conexão, resistores diversos, cabos de conexão, interruptor de campainha.

#### 7.3. Bibliografia

“Física”, P. Tipler, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 2: 4a Ed. Cap.22 a 25; 5a e 6a Ed. Cap. 21 a 24.

“Fundamentos de Física”, D. Halliday e R. Resnick, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 3: 6a Ed. Cap.22 a 26; 7ª e 8a Ed. Cap.21 a 25.

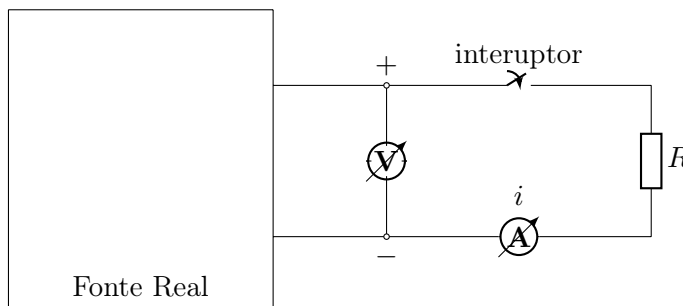
“Física”, F. Sears, M.W. Zemansky e H. D. Young, Vol. 3, (1984), Cap. 24 e 26.

<https://www.fisica.ufpr.br/cf064/fontes.pdf>

#### 7.4. Roteiro de Estudo

1. O que é força eletromotriz?

Circuito 7.1: FONTE REAL. Esquema elétrico da montagem experimental para o estudo de uma fonte real. Para compreender o que há no interior desta fonte podemos medir a tensão e a corrente elétricas fornecidas por ela.



2. Por que a tensão nos pólos de um gerador pode ser diferente de sua força eletromotriz?
3. Qual é a expressão matemática que descreve o comportamento aproximado de uma função na vizinhança de um ponto?
4. Como se calcula a potência elétrica dissipada num resistor?
5. O que é rendimento de um dispositivo ou sistema? Qual sua expressão para uma fonte de tensão?

### 7.5. Procedimento Experimental

- Montar o circuito mostrado na circuito 7.1 utilizando os terminais '+' (vermelho) e '-' (preto) da fonte na placa de circuitos. Faça o esboço da montagem utilizada na circuito 7.2.
- Para a fonte fornecida ("caixa preta"), medir com o voltímetro a força eletromotriz  $\mathcal{E}$ .
- Utilizar diferentes valores para o resistor  $R$ . Caso seja necessário, fazer associações de resistores. Alguns valores sugeridos para o resistor  $R$  são:  $1000\ \Omega$ ,  $780\ \Omega$ ,  $560\ \Omega$ ,  $220\ \Omega$ ,  $100\ \Omega$ ,  $68\ \Omega$ ,  $34\ \Omega$ ,  $22\ \Omega$ .

Circuito 7.2: FONTES REAIS. Uma vez montado o esquema da circuito 7.1 na placa de conexões do laboratório, anote o circuito montado neste espaço. Os pontos pretos dos componentes referem-se ao pino de referência de tensão dos respectivos componentes.

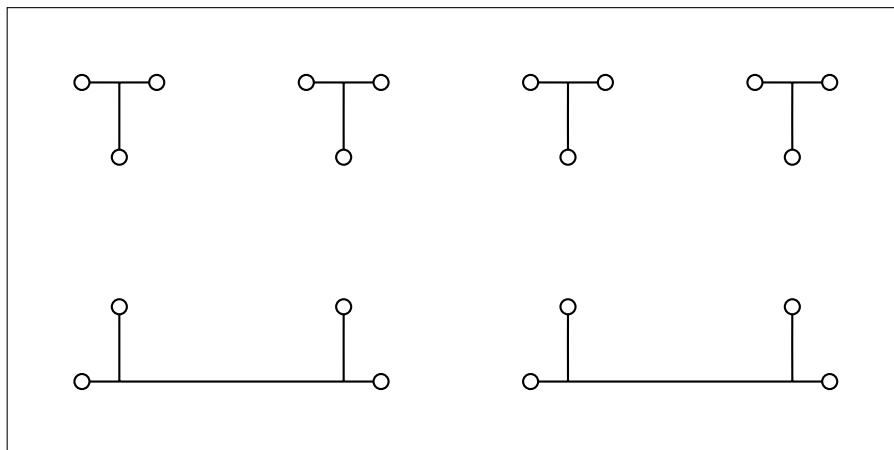
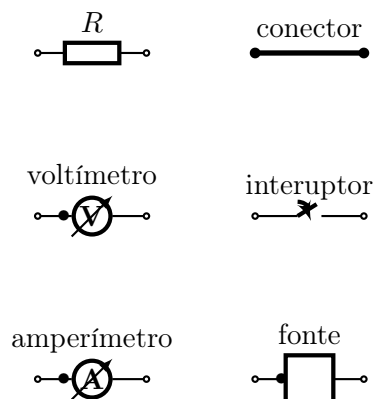
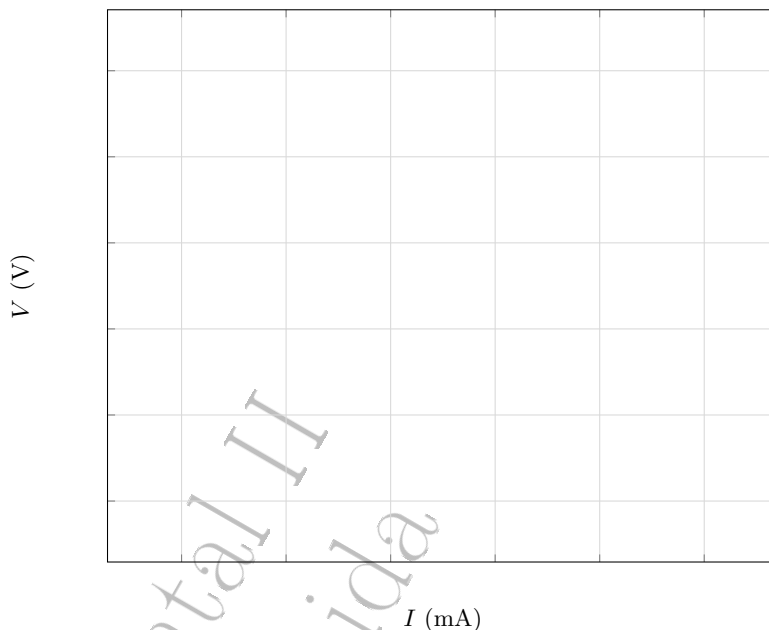






Gráfico 7.1: FONTES REAIS. A partir dos dados, coletados na tabela 7.2, para as duas fontes estudadas, faça o esboço do gráfico de  $V$  em função de  $I$  na mesma escala. Obtenha para cada uma das fontes, via o método dos mínimos quadrados, uma reta ajustada. Interprete fisicamente os coeficientes da reta ajustada. Compare as duas retas em termos dos coeficientes angulares bem como os coeficiente lineares. Qual possui a maior força eletromotriz? Qual possui a maior resistência interna?



OBSERVAÇÃO: Em algumas fontes, por exemplo as de origem química, a força eletromotriz pode não se manter constante após o fornecimento de certa quantidade de corrente elétrica. Assim, é conveniente iniciar as medidas com os resistores de maior valor. É recomendável também que o interruptor fique na posição “ligado” somente durante o tempo necessário para se efetuar a medida.

## 7.6. Análise de Resultados

### 7.6.1. Comportamento da Tensão

- Para cada fonte, faça um gráfico de  $V$  em função de  $I$ . Ajuste uma função aos pontos e interprete seus coeficientes. Coloque um esboço dos gráficos obtidos na gráfico 7.1.
- Compare a força eletromotriz obtida acima com a obtida pela medida direta na tabela 7.1.
- Observe e explique o comportamento de  $V$  e  $I$  em função de  $R$  na gráfico 7.1.
- Compare as características das duas fontes.

### 7.6.2. Máxima Transferência de Energia

- Para cada fonte calcule a tensão sobre a resistência interna  $V_r$  e anote-a na tabela 7.2.
- Com os valores das tensões sobre as resistências externa e interna,  $V_R$  e  $V_r$ , faça um gráfico com estes valores em função da resistência externa  $R$  utilizada para cada uma das fontes. Faça o esboço na gráfico 7.2.

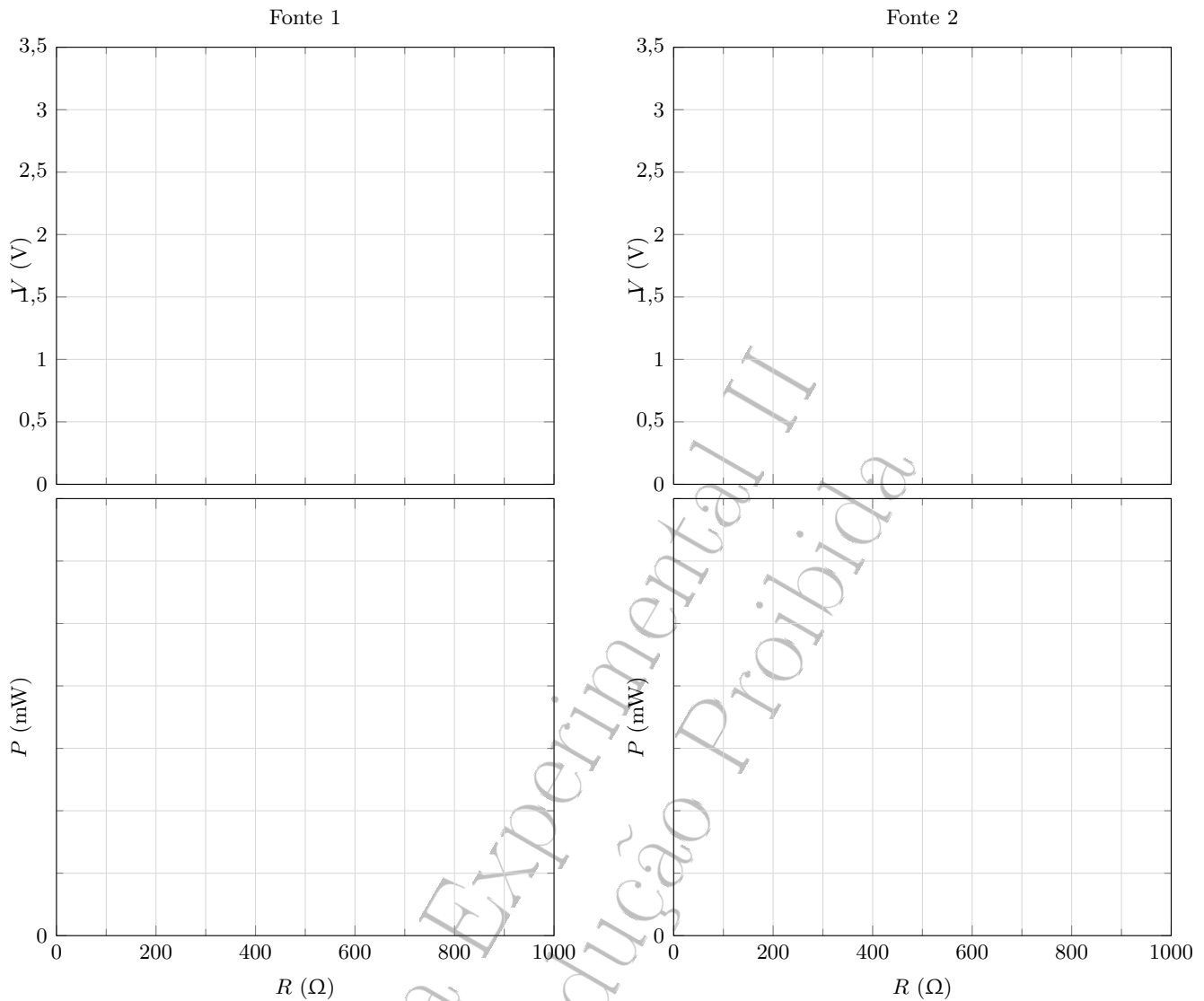


Gráfico 7.2: FONTES REAIS. A partir dos dados da tabela 7.2 faça o gráfico sobreposto das tensões sobre a resistência externa e interna,  $V_R$  e  $V_r$ , em função da resistência externa  $R$  utilizada para as duas fontes. Após isto faça a análise das potências para cada uma das duas fontes estudadas. Faça os esboços nestes espaços.

- Calcule a potência  $P_R$  dissipada no resistor externo  $R$  em cada caso e faça um gráfico de  $P_R$  em função de  $R$ .
- Sobre o gráfico de  $P_R$  trace a curva teórica usando os parâmetros ajustados anteriormente. Calcule a potência  $P_R$  pela expressão  $P_R = VI$ .
- Nos gráficos do item anterior, faça uma estimativa do valor de  $R$  em que ocorreu a máxima potência. Compare este valor com os resultados obtidos no gráfico ajustado cujo esboço estão na gráfico 7.1.
- De que forma a potência total gerada depende do valor de  $R$ ? Escreva a equação correspondente.
- Calcule os valores da potência dissipada  $P_r$  no resistor interno e anote na tabela 7.2. Compare os valores das potências dissipadas nos resistores externo e interno.

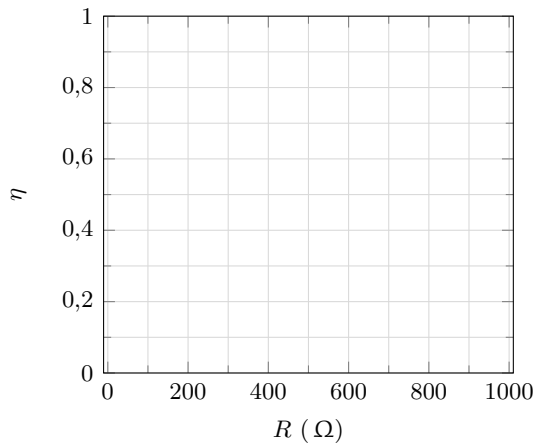


Gráfico 7.3: FONTES REAIS. A partir dos gráficos obtidos para as potências das duas fontes, gráfico 7.2, sobreponha as duas curvas da eficiência  $\eta$  contra a resistência externa  $R$ .

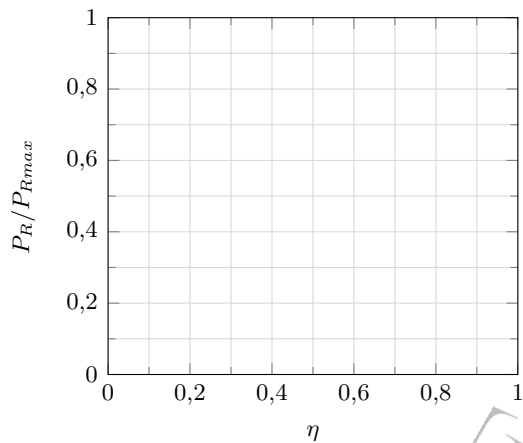


Gráfico 7.4: FONTES REAIS. Faça o esboço da potência dissipada na resistência externa normalizada ao seu valor máximo,  $P_R/P_{Rmax}$ , contra a eficiência  $\eta$ . O que você pode concluir vendo o esboço resultante?

- Explique por que o gráfico da potência dissipada no resistor externo  $P_R$  tem um pico.
- Para cada fonte, faça um gráfico da potência total gerada  $P_T$  e da potência dissipada na resistência interna  $P_r$  em função de  $R$ .
- Para ambas as situações, calcule o rendimento  $\eta$  da fonte (dado pela razão  $\eta = P_R/P_T$  para cada valor de  $R$ , faça um gráfico e discuta como este rendimento varia em função de  $R$ . Faça o esboço do gráfico obtido no gráfico 7.3.
- Faça um gráfico de  $P_R/P_{max}$  em função do rendimento, e faça o esboço no gráfico 7.4. Coloque os pontos das duas fontes no mesmo gráfico, juntamente com a curva teórica. Ela é realmente universal?

### 7.6.3. Comentário

Em sistemas eletrônicos e de telecomunicações normalmente se deseja a máxima transferência de energia, então faz-se com que a resistência do receptor seja igual à da fonte. Tem-se como exemplo a conexão entre uma antena e o aparelho de TV, ou também a conexão entre alto-falantes ou caixas de som e o amplificador. Por outro lado, em sistemas de distribuição de energia elétrica deseja-se que o equipamento desenvolva a sua potência nominal, assim, não é necessário que haja igualdade entre os valores das resistências do equipamento e da fonte.

## BLOCO III

### Eletromagnetismo

Física Experimental II  
Reprodução Proibida

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*

---

## Osciloscópio, Constante de Tempo e Diferença de Fase

---

O osciloscópio é um instrumento que permite medir e representar graficamente variações da diferença de potencial entre dois pontos de um circuito em função do tempo. Na maioria das vezes este gráfico mostra como o sinal de tensão está variando com o tempo: o eixo vertical  $Y$  representa a diferença de potencial, entre um ponto do circuito e a terra, e o eixo horizontal  $X$  representa o tempo. Com esse instrumento é possível visualizar oscilações periódicas e medir a diferença de fase, mas há também outras aplicações.

Há osciloscópios analógicos e osciloscópios digitais, sendo que estes últimos possuem sistemas adicionais de processamento de dados que permitem a coleta de dados durante certo período para então mostrá-las no visor.

Com um voltímetro somente seria possível construir o gráfico figura 7.1 para variações lentas, i.e., se mudanças no sinal ocorressem com frequência menor do que a frequência de coleta de dados (algo em torno de 1 medida a cada 5 segundos), ou seja, o tempo suficiente para fazer a leitura com o multímetro e anotar o resultado. A construção de uma curva requer vários pontos, o que torna a operação de monitoramento de um sinal com um voltímetro um recurso limitado. A grande vantagem do osciloscópio é poder fazer amostragens rápidas, possibilitando coletar muitos pontos em um intervalo de tempo muito curto. A amostragem, leitura do sinal, dos equipamentos digitais é discreta, enquanto que nos analógicos é contínua, mas ambas têm um tempo mínimo de resposta.

Apresentam-se a seguir os passos iniciais para a utilização de osciloscópios digitais existentes neste Laboratório.

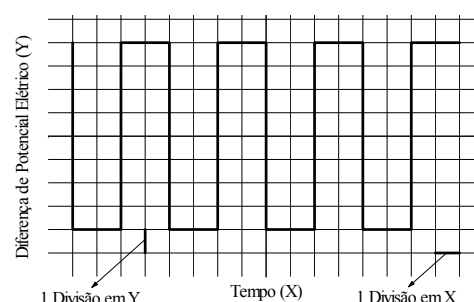


Figura 7.1: OSCILOSCÓPIO. Exemplo da tela do osciloscópio e de um sinal de medida.

### 1. Operação (Modelo HP 54600b)

- Verifique a tensão de operação do osciloscópio e do gerador de função (127 V ou 220 V).

- Conecte-os à rede de energia elétrica, nos terminais adequados.
- Ligue o osciloscópio (pressione a tecla “LINE”, localizada abaixo do visor, à direita) e o gerador de função.
- Conecte o terminal de saída do gerador de função ao terminal 1 do osciloscópio, com o cabo tipo BNC.
- Ajuste o sinal do gerador de função para uma forma senoidal de 1 kHz e um valor de amplitude na escala de 1,0 V.

### 1.1. Ajustando as Escalas

Os osciloscópios digitais possuem uma função que possibilita um ajuste automático de escala. Neste caso basta pressionar a tecla “AUTOSCALE”, que está localizada no painel de controle, à direita.

- Observe no visor o que acontece quando esta tecla é pressionada. O ajuste manual das escalas horizontal e vertical pode ser executado através dos botões “TIME/DIV” e “VOLTS/DIV”, respectivamente, ambos localizados no painel de controle.
- Depois de fazer um ajuste automático do sinal, verifique o que acontece com o sinal elétrico no visor quando se gira os botões “TIME/DIV” e “VOLTS/DIV”.
- Em ambos os casos aparecerá, na parte superior do visor, indicações das escalas utilizadas, que podem variar de 2 mV/divisão (ou  $2 \times 10^{-3}$  V/divisão) a 5 V/divisão para o eixo da diferença de potencial e, para o eixo relativo ao tempo, de 2 ns/divisão (ou  $2 \times 10^{-9}$  s/divisão) a 5 s/divisão.

### 1.2. Linha de Status

Na parte superior do visor aparecem indicações da configuração do osciloscópio. Quando os canais de entrada do osciloscópio 1 e/ou 2 estão ligados a algum tipo de sinal elétrico, aparece indicado na parte superior do visor (na linha de status) algumas informações, entre elas: a escala vertical de cada canal (1 e/ou 2) e também a escala horizontal, que corresponde ao tempo. A última indicação corresponde ao modo de operação do osciloscópio, que pode ser alterado através dos comandos no painel de controle, localizados acima e à direita.

RUN	neste modo o osciloscópio coleta dados e mostra no visor o traço mais recente do sinal elétrico;
STOP	este comando permite um “congelamento” da imagem, tornando possível analisar as características de um evento isolado;



AUTOSTORE	com esta função é possível coletar dados e colocar ao mesmo tempo o sinal elétrico mais recente (com um brilho intenso) e o sinal prévio (com um brilho menos intenso).
ERASE	limpa o visor. A indicação anterior ao modo de operação na linha de status (um símbolo ligado ao canal A ou B) diz respeito à função “TRIGGER”, que é o circuito que inicializa uma varredura horizontal no osciloscópio e determina o ponto inicial da função no visor.

## 2. Realizando Medidas

### 2.1. Medidas no Eixo Horizontal

Para melhor compreender todas as opções de medidas que este aparelho proporciona, observe a figura 7.2 que ilustra algumas das muitas características de um sinal, por exemplo, senoidal.

Localize no painel de controle a tecla “TIME”. Pressione esta tecla e observe que surge um menu de opções na parte inferior do visor, correspondente às seis teclas cinzas ali localizadas.

SOURCE	com esta tecla é possível selecionar qual sinal (do canal 1 ou 2) se deseja analisar;
FREQ	mede a frequência do sinal aplicada no canal selecionado;
PERIOD	determina o período do sinal aplicada no canal selecionado
DUTY CYCLE	ciclo de trabalho, fornece a relação entre a largura do semiciclo positivo e a largura total do ciclo, ambas medidas no nível 50% da amplitude.
CLEAR MEAS	apaga todas as medidas realizadas e remove os cursores;
NEXT MENU	dá acesso ao próximo menu com outras funções possíveis. Elas não serão detalhadas aqui porque não serão utilizadas nos experimentos da disciplina.

Ao pressionar estas teclas no osciloscópio observe no visor os valores indicados e a região (delimitada pelos cursores) onde elas são efetuadas.

### 2.2. Medidas no Eixo Vertical

A figura 7.3 ilustra alguns parâmetros ligados à diferença de potencial.

Localize no painel de controle a tecla “VOLTAGE”. Pressione esta tecla e observe que surge um menu de opções na parte inferior do visor, correspondente às seis teclas cinzas ali localizadas:

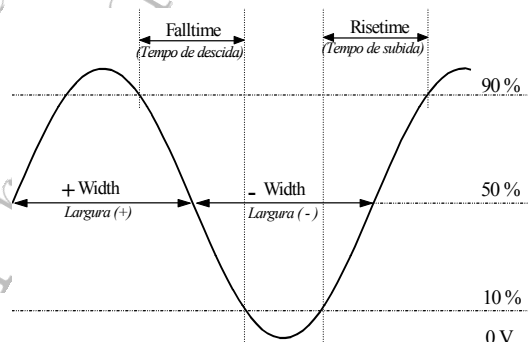


Figura 7.2: OSCILOSCÓPIO. Esquema de um sinal no visor do osciloscópio.

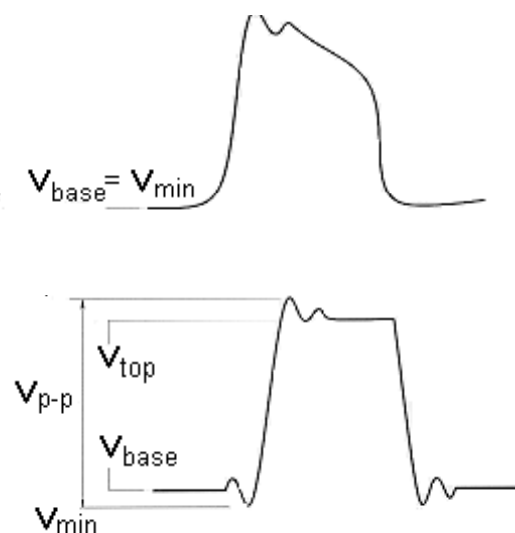


Figura 7.3: OSCILOSCÓPIO. Esquema de sinais transitórios na tela do osciloscópio.

SOURCE	com esta tecla é possível selecionar qual sinal (do canal 1 ou 2) se deseja analisar;
V p-p	determina a diferença de potencial entre os picos (superior e inferior);
V avg	determina a diferença de potencial média;
V rms	determina a diferença de potencial quadrática média ou eficaz que, para um sinal senoidal, é igual a $0,707V_{max}$ para um sinal senoidal;
CLEAR MEAS	apaga todas as medidas realizadas e remove os cursores;
NEXT MENU	dá acesso ao próximo menu com outras medidas possíveis. Elas não serão detalhadas aqui porque não serão utilizadas nos experimentos da disciplina.

### 2.3. Medidas Aleatórias nos Eixos Horizontal e Vertical

As possíveis medidas realizadas nos itens 10.2.1 e 10.2.2 se referem a parâmetros prédefinidos.

Também é possível realizar, com auxílio de cursores, quaisquer medidas tanto em um eixo, como no outro.

- Localize no painel de controle e pressione a tecla “CURSORS”.
- Observe no visor do osciloscópio o menu contendo as seguintes opções:

SOURCE	com esta tecla é possível selecionar qual sinal (do canal 1 ou do canal 2) se deseja analisar;
ACTIVE CURSOR	$V_1$ , $V_2$ , $t_1$ e $t_2$ , onde $V_1$ e $V_2$ são cursores para medidas da diferença de potencial, no eixo $Y$ , enquanto que $t_1$ e $t_2$ são cursores para medidas de tempo, no eixo $X$ .

- Selecione com o auxílio das teclas cinzas, abaixo do visor da tela, o que deseja medir:  $V_1$  e/ou  $V_2$ , e  $t_1$  e/ou  $t_2$ . Se apertar simultaneamente  $V_1$  e  $V_2$  ou  $t_1$  e  $t_2$  os dois cursores se movem juntos.
- Use o botão localizado logo abaixo da tecla “CURSORS” no painel de controle para mover o(s) cursor(es) selecionado(s) no osciloscópio, girando-o no sentido horário ou anti-horário.
- Verifique o que aparece no visor, logo acima do menu, após pressionar uma das teclas e mover o cursor.

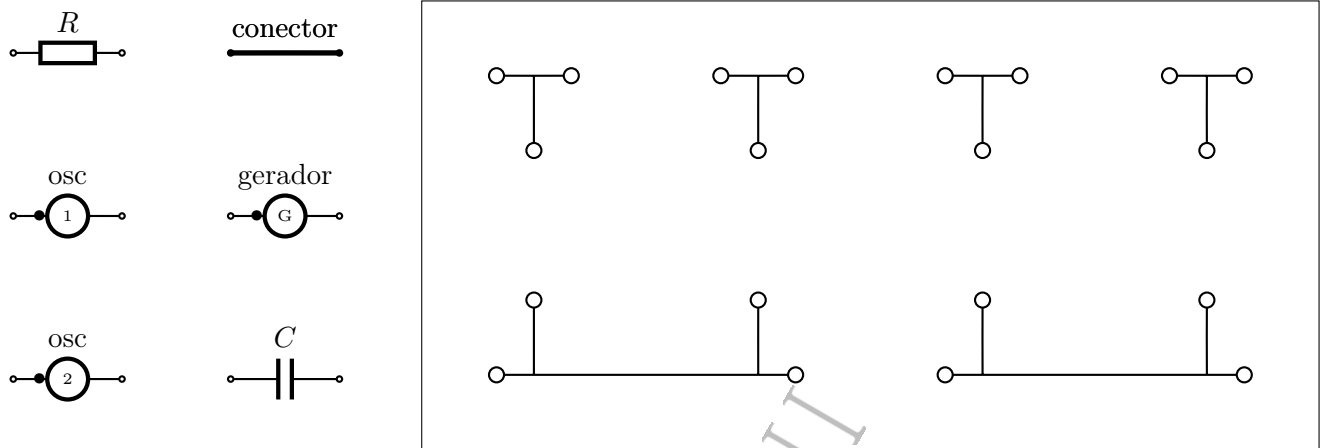
CLEAR CURSORS	Apaga as medidas realizadas e remove os cursores da tela.
---------------	---

#### 2.4. Trigger (Gatilho)

É graças ao Trigger (Gatilho) que repetidos trens de sinal oscilatório aparecem imóveis na tela do osciloscópio. Se o aparelho não dispusesse desta função, cada varredura horizontal poderia acontecer em diferentes pontos do sinal, causando uma imagem com vários trens de sinal oscilatório em movimento. Esta função permite então sincronizar o aparecimento do próximo trem de sinal oscilatório justamente sobre o anterior e assim dar a impressão de imobilidade do sinal. Ao girar o botão “LEVEL”, ou então ao pressionar a tecla “SOURCE” ou ainda “MODE” aparece, por alguns segundos logo abaixo do diagrama, o nível do Trigger (do canal em análise), indicando a partir de que nível o osciloscópio começará a fazer a varredura horizontal a fim de detectar algum sinal elétrico. Para ver esta função em operação, proceda da seguinte maneira:

- Selecione o gerador de função para fornecer uma tensão senoidal.
- Ajuste no gerador de função uma amplitude que ocupe aproximadamente duas divisões na escala vertical do osciloscópio.
- Pressione a tecla “MODE” e observe o nível do Trigger em relação ao Terra.
- Selecione o modo “NORMAL” no menu abaixo do diagrama.
- Gire o botão “LEVEL” deslocando o nível do Trigger para cima e observe que, a partir de um determinado nível, o símbolo do Trigger na linha de status começará a piscar. Quando isto acontecer, o osciloscópio não estará sincronizando qualquer sinal elétrico no canal em análise, pois estamos procurando um sinal com um valor (Level) maior do que aquele que é fornecido pelo gerador. (O diagrama fica congelado e se forem pressionadas as teclas “ERASE” e “RUN” sucessivamente, o último sinal que o osciloscópio capturou e congelou será apagado do monitor).
- Para encontrar o sinal, gire o botão “LEVEL” no sentido contrário ao realizado anteriormente até o símbolo do Trigger na linha de status parar de piscar. Além de controlar o nível da varredura horizontal, é possível também determinar se o ponto do Trigger está sobre a parte ascendente ou descendente do sinal.
- Pressione a tecla “SLOPE/COUPLING”.
- Selecione com a tecla cinza onde posicionar o Trigger, na parte ascendente ou descendente do sinal (Slope  $\uparrow$  ou  $\downarrow$ ).

Há diferentes modos de configurar o Trigger. Os mais comuns são “AUTO” e “NORMAL”. Para selecioná-los, pressione a tecla “MODE”. No modo “NORMAL” o osciloscópio somente mostra o sinal elétrico se este atingir o nível do Trigger (ou então irá



Circuito 7.3: MONTAGEM DE CIRCUITO. A partir do esquema da circuito 7.4 você teve que montar o circuito numa placa de conexões do laboratório. Aqui temos uma representação desta placa. Faça uma cópia da montagem que você fez neste espaço lembrando que os pontos pretos, tanto da fonte quanto dos canais do osciloscópios, indicam o pino terra dos cabos coaxiais.

congelar na tela o último sinal capturado por ele). Por outro lado, mesmo que o sinal sofra uma redução significativa na diferença de potencial, se o osciloscópio estiver no modo “AUTO”, este sinal não irá desaparecer do monitor, pois haverá um ajuste do nível do Trigger.

O osciloscópio reconfigura o nível do Trigger para o centro do sinal oscilatório quando se pressiona as teclas “MODE” e “AUTO LVL” ou “MODE” e “AUTO” ou ainda “MODE” e “NORMAL”. Se o osciloscópio estiver apropriadamente configurado em relação à varredura horizontal, o espaço relativo ao modo de operação do Trigger na linha de status fica sem qualquer indicação.

### 3. Procedimento Experimental

As Atividades Práticas a seguir objetivam fixar a utilização dos controles do osciloscópio.

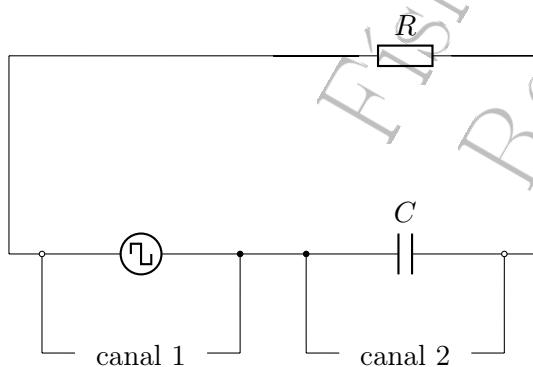
#### 3.1. Atividade Prática: Circuito RC Regime Transitório

Quando a capacitância é muito pequena, o tempo para carregar o capacitor também é pequeno e, muitas vezes, será impossível usar o multímetro para registrar as tensões. Neste caso deve ser empregado o osciloscópio.

Uma maneira eficaz de trabalhar alternadamente com as duas situações - carga e descarga - é substituir a fonte de força eletromotriz e a chave manual por uma diferença de potencial periódica externa, que ora é positiva possibilitando a carga do capacitor e ora é nula permitindo o seu descarregamento.

#### Descrição do Experimento

Será usado um Gerador de Função, o qual fornece ao circuito RC uma diferença de potencial periódica do tipo quadrada -



Circuito 7.4: CIRCUITO RC TEMPO CARACTERÍSTICO. Esquema elétrico da montagem experimental para o estudo de um circuito RC. Como o comportamento deste circuito é assintótico podemos alternar a tensão periodicamente e estudarmos o comportamento devido a transição de tensão. Esta alternância é feita com uma fonte que aplica ora uma tensão fixa em um valor positivo, ora em uma tensão fixa nula ou negativa.

$R$ (k $\Omega$ )	$C$ ( $\mu$ F)	$\tau_{\text{nominal}}$ (ms)	$\Delta t_{\text{medido}}$ (ms)
10	0,1		
5	0,1		

Tabela 7.3: ESTUDO DO CIRCUITO RC EM REGIME TRANSITÓRIO. Valores nominais de  $R$  e  $C$  e a constante de tempo de um capacitor, onde  $\tau_{\text{nominal}}$  é calculado por meio dos valores nominais de  $R$  e  $C$ , enquanto que  $\Delta t$  é o valor medido com o osciloscópio.

cuja frequência e amplitude podem ser controladas facilmente. Através do osciloscópio se monitora a resposta do elemento resistivo ou capacitivo do circuito sob ação daquele sinal externo. Com esta montagem é possível, por exemplo, determinar a constante de tempo capacitivo do circuito.

#### Montagem Experimental

- Observe a tensão de operação do osciloscópio e do gerador de função (127 V ou 220 V) e conecte-os à rede elétrica adequadamente.
- Observe a circuito 7.4 e monte o circuito RC sobre a placa de conexão, usando os componentes sugeridos na tabela 7.3.
- Conecte, com um cabo BNC-banana, o gerador de função à placa do circuito, identificando antes a polaridade dos cabos.
- Ligue o gerador de função e selecione uma tensão de forma quadrada com frequência de 100 Hz aproximadamente.
- Verifique com um dos canais do osciloscópio a tensão fornecida pela fonte.
- Verifique com outro canal do osciloscópio o sinal sobre o capacitor e depois sobre o resistor.

Observe que os terminais de terra (terminais pretos) tanto do gerador quanto do osciloscópio devem estar ligados no mesmo ponto. Deixe o terminal terra (ponta preta) do gerador de função fixo na placa do circuito e conecte o cabo terra do osciloscópio (ponta preta) a este terminal. Por causa desta restrição (de mesmo terminal terra para ambos os equipamentos) haverá necessidade de se realizar a troca de posição entre o capacitor e o resistor, e vice-versa, para monitorar a diferença de potencial sobre cada um desses elementos do circuito.

#### Aquisição de Dados

Com o osciloscópio, monitore o sinal sobre o capacitor. Ajuste as escalas vertical e horizontal no osciloscópio, tal que apareça na tela somente a parte que corresponde à carga do capacitor.

- Observando simultaneamente no osciloscópio a forma do sinal da tensão fornecida pelo gerador, meça seu valor máximo.

- Com o auxílio do botão “CURSORS” meça o tempo necessário para a tensão sobre o capacitor atingir 63% do valor máximo aplicado, ou o equivalente. Para esta situação específica o tempo medido no osciloscópio  $\Delta t$  é o próprio valor da constante de tempo. Anote os dados coletados na tabela 7.3.
- Repita os procedimentos acima para os demais resistores.

### Questões

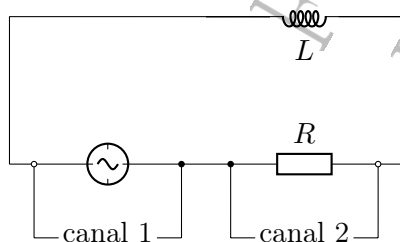
Para fixar os conceitos estudados nesta aula, responda as seguintes perguntas:

- Qual o valor da constante de tempo capacitiva para os circuitos analisados na tabela 7.3?
- Analise a diferença obtida entre o valor medido de  $\Delta t$  e o valor nominal de  $\tau$  para a tabela 7.3.
- Quais são as possíveis fontes de erros para as discrepâncias entre  $\Delta t$  e  $\tau_{\text{nominal}}$ ?

### 3.2. Atividade Prática: Circuito RL Regime Senoidal Permanente

Na etapa anterior observou-se a diferença de fase entre a corrente elétrica e a tensão aplicada ao circuito devido a presença de um capacitor. Agora faremos o mesmo experimento trocando o capacitor por um indutor. Utilizando o osciloscópio no modo V-t e, com o auxílio dos cursores, devemos medir o tempo decorrido entre dois pontos correspondentes sobre as curvas das duas grandezas.

#### Montagem Experimental



Circuito 7.5: CIRCUITO RL. Esquema elétrico da montagem experimental para o estudo de um circuito RL onde se aplica uma tensão senoidal sobre o circuito para perceber o problema da diferença de fase entre a tensão e a corrente elétrica que passa pelo componente.

- Observe a circuito 7.5 e monte um circuito RL conforme na Atividade Prática 2, utilizando um capacitor de 1200 espiras e um resistor de  $33\ \Omega$ .
- Deste ponto em diante alimente o circuito com o gerador de funções preparado para gerar tensão senoidais.
- Conecte com um cabo BNC-banana o gerador de função à placa do circuito, identificando antes a polaridade dos cabos.
- Verifique com o osciloscópio o sinal fornecido pela fonte e o sinal sobre o resistor. Observe que os terminais de terra (terminais pretos) tanto do gerador quanto do osciloscópio devem estar ligados no mesmo ponto. Deixe o terminal terra (ponta preta) do gerador de função fixo na placa do circuito e conecte o cabo terra do osciloscópio (ponta preta) a este terminal.

Frequência (Hz)		$V_{pp}$ ( )	$\Delta t$ (ms)	$\Delta \varphi$ ( )
Gerador	Medido			
30				
50				
150				
250				

Tabela 7.4: CIRCUITO RL DIFERENÇA DE FASE. Você pode perceber que os dois sinais senoidais no monitor do osciloscópio possuem uma diferença de fase entre elas. Anote a frequência medida, a amplitude e a diferença temporal,  $\Delta t$ , entre os dois sinais. A partir do intervalo de tempo entre os dois sinais pode-se então determinar uma diferença  $\phi$  em unidades angulares.

### Aquisição de Dados

- Um dos canais do osciloscópio irá medir a tensão total aplicada (gerador de função) e o outro canal irá medir a tensão sobre o resistor.
- Ajuste o gerador para produzir uma tensão com frequência aproximada de 30 Hz.
- Meça a amplitude e a frequência da tensão sobre o resistor.
- Faça a medida do intervalo de tempo  $\Delta t$  entre cristas adjacentes da tensão total e da tensão sobre o resistor.
- Usa-se a representação dos dois canais do osciloscópio no modo V-t, e mede-se na tela, com a ajuda dos cursores, o intervalo de tempo  $\Delta t$  entre as cristas adjacentes dos dois sinais, por exemplo. Depois disto calcula-se a diferença de fase  $\varphi$  lembrando que o tempo de um período  $T$  corresponde a  $360^\circ$  ou  $2\pi$  rad.
- Mude a frequência da fonte conforme a tabela 7.4 e repita as medidas dos passos anteriores. Anote os resultados.
- Escolha uma das medidas e esboce, na gráfico 7.5, a tensão aplicada pelo gerador e a corrente elétrica para evidenciar a diferença de fase entre estas duas funções;

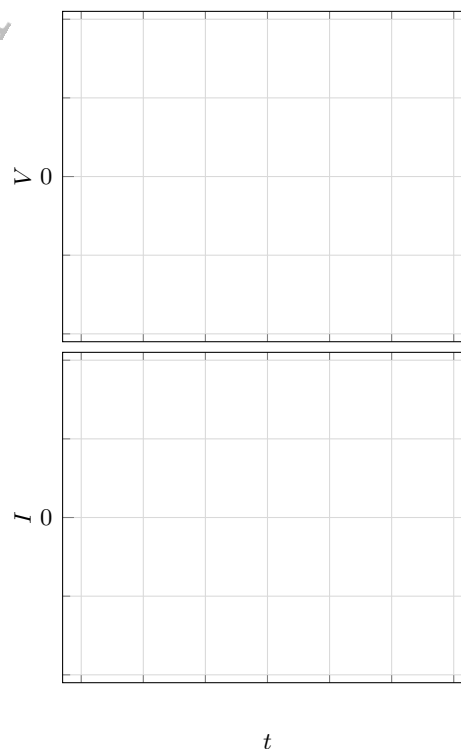


Gráfico 7.5: CIRCUITO RL DIFERENÇA DE FASE. Escolha uma das medidas que estão sendo efetuadas e esboce a tensão aplicada pelo gerador e a corrente elétrica que circula pelo circuito para evidenciar a diferença de fase entre estas duas funções. Lembre-se de sincronizar as duas figuras.

### Questões

- Qual o significado físico de fase de uma oscilação?
- Qual a definição quantitativa de fase e diferença de fase?
- Como se mede a diferença de fase? Deduza a expressão.
- Em que condições a diferença de fase é constante no tempo?
- Existe diferença entre as diferenças de fase obtidas por um capacitor e por um indutor? Explique baseado no comportamento dos componentes.

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*



## EXPERIMENTO 8

---

### Força Magnética sobre Condutores de Corrente

---

#### 8.1. Objetivos

- Analisar as forças magnéticas provocadas pela interação de correntes elétricas e campos magnéticos.
- Prever a direção e o sentido das forças que agem sobre fios e espiras condutoras de correntes imersos em campos magnéticos.

#### 8.2. Material Utilizado

Base de ferro com ímãs; fonte de corrente contínua; cabos para conexão; suporte; garras; interruptor tipo campainha; balança de braços; nível; placas com condutores em circuito impresso, ímã em forma de “U” com peças polares; motor elétrico elementar.

#### 8.3. Bibliografia

Física, F. Sears, M. W. Zemansky e H. D. Young. Vol. 3, 2a Ed., (1985), Cap. 31.  
“Física”, P. Tipler, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 2: 4a Ed. Cap.28; 5a e 6a Ed. Cap. 26.  
“Fundamentos de Física”, D. Halliday e R. Resnick, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 3: 6a Ed. Cap.29; 7ª e 8a Ed. Cap.28.

#### 8.4. Roteiro de Estudo

1. Qual é a expressão para o campo magnético  $B$  produzido por uma corrente elétrica  $i$  que circula num fio condutor retilíneo?

2. Qual é a expressão que define a força que age sobre um fio condutor retilíneo de comprimento  $L$ , por onde passa uma corrente elétrica  $i$ , imerso num campo magnético externo  $B$ ?
3. À medida que a intensidade da corrente  $i$  aumenta, o que acontece com o módulo da força magnética que age sobre este fio?
4. O que acontece com o sentido da força magnética se invertermos o sentido da corrente?
5. Cite três situações do cotidiano onde os fenômenos estudados estão envolvidos e são relevantes.

### 8.5. Descrição do Experimento

Este experimento está dividido em duas partes. Em ambas analisa-se o fenômeno da força magnética que atua sobre um condutor, quando este é percorrido por uma corrente elétrica imersa num campo magnético. A magnitude desta força depende da intensidade da corrente, da intensidade do campo magnético e do comprimento do condutor. Na primeira parte faz-se um estudo da orientação da força magnética em função da orientação do campo magnético, e do sentido da corrente que percorre o condutor. Na segunda parte é feito um estudo quantitativo, medindo-se a força que atua sobre o condutor.

Neste são utilizados quatro condutores com comprimentos diferentes e, para cada um deles, faz-se circular correntes com intensidades diferentes. O campo magnético é devido a um ímã permanente e, portanto, será constante. Para medir a força magnética é utilizada uma balança de braços. O equipamento usado na segunda parte em geral é chamado de balança de corrente.

### 8.6. Procedimento Experimental

#### 8.6.1. Caráter Vetorial da Força: Ímã e Fio Condutor

- Prenda a haste cilíndrica no suporte, observe a figura 8.1.
- Prenda os terminais do arame em forma de “U” na haste.
- Com os cabos elétricos ligue as saídas destes terminais ao interruptor tipo campainha e à fonte de corrente.
- Posicione o ímã na vertical, de modo que o arame fique entre seus pólos.
- Ligue a fonte e forneça inicialmente uma corrente pequena, por volta de 0,5 A.
- Ligue o interruptor e observe o que acontece ao arame.
- Varie lentamente a intensidade da corrente e observe o que acontece.

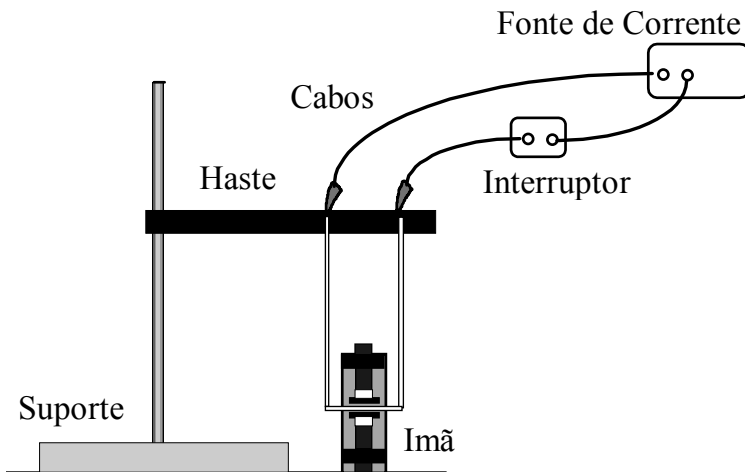


Figura 8.1: CARÁTER VETORIAL DA FORÇA MAGNÉTICA. Montagem experimental para a primeira parte.

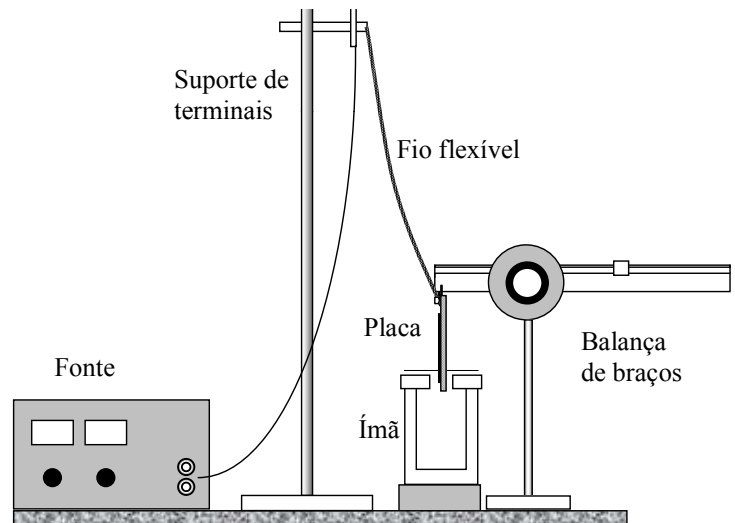
- Inverta os terminais da fonte, causando então uma inversão no sentido da corrente. Repita o experimento e observe o que acontece.
- Mantenha o mesmo sentido para a corrente, porém, inverta a posição do ímã, provocando uma inversão no sentido do campo magnético. Repita o experimento e verifique o que acontece.
- Responda as questões da Análise de Resultados.

Se o condutor estiver preso a um eixo, ao sofrer a ação de uma força magnética surgirá um torque sobre o eixo, que fará o sistema girar. Este é o princípio de funcionamento do motor elétrico. Num motor são utilizados muitos condutores para aumentar a magnitude do torque e proporcionar a continuidade da rotação.

#### 8.6.2. Intensidade da Força: Balança de Corrente

- Suspenda num braço da balança a placa isolante com o condutor de 100 mm, apertando o parafuso de fixação. Observe a figura 8.2. Observe que existem na placa de 100 mm dois condutores de 50 mm em paralelo e percorridos por correntes no mesmo sentido.
- Ligue a esta placa os fios flexíveis, que deverão estar conectados ao suporte de terminais.
- Posicione o ímã permanente de forma que a placa possa deslocar-se livremente entre as peças polares e, no equilíbrio, a trilha horizontal esteja exatamente na região central das peças polares do ímã; isto diz respeito à posição vertical e também horizontal. Caso seja necessário, ajuste a haste (suporte) vertical da balança.
- Nivela a base da balança com auxílio dos parafusos do tripé e de um nível de bolha.

Figura 8.2: BALANÇA DE CORRENTE. Montagem experimental para a determinação da força magnética gerada pela interação entre o campo magnético externo e a corrente elétrica submetida a este.



- Com a fonte desligada, equilibre a balança, de modo que os braços estejam na horizontal. Faça esta leitura e anote-a na tabela 8.1.
- Leitura da balança:
  - Inicialmente desloque a massa de 100 g, na haste posterior, até uma das posições marcadas, tal que o braço não mude o sentido da sua inclinação.
  - Repita o procedimento para a massa de 10 g na haste frontal.
  - Faça um ajuste fino girando a escala circular até o instante em que a haste da balança esteja perfeitamente na horizontal (observar o alinhamento das marcas horizontais).
  - Cada graduação da escala circular corresponde a 0,1 g.
  - Existe um vernier adjacente à escala circular, o qual subdivide cada divisão da escala circular em 10 partes, ou seja, possibilitando uma graduação de leitura de 0,01 g.
  - Na escala circular, leia o valor que está imediatamente à direita da marca “0” do vernier.
  - Para ler a escala do vernier, observe qual divisão está melhor alinhada com alguma divisão da escala circular.
  - A massa medida será dada pela soma: das leituras das duas massas nas hastes horizontais, da leitura na escala circular e da leitura no vernier. Será possível obter uma precisão da ordem do centésimo do grama.
- Faça circular pelo condutor uma corrente de 1 A. Equilibre novamente a balança e faça a leitura.
- Repita este procedimento para outros valores de corrente, conforme a tabela 8.1.

$I$ (A)	Leitura da Balança (g) para cada largura da placa $L$			
	$L = 100$ mm	$L = 50$ mm	$L = 25$ mm	$L = 12,5$ mm
0,0				
1,0				
1,5				
2,0				
2,5				
3,0				
3,5				
4,0				

Tabela 8.1: BALANÇA DE CORRENTE. Os valores das leituras obtidas na balança de corrente deverão ser anotados para a determinação da expressão matemática que descreve a força magnética como relação entre o campo magnético e a corrente elétrica a ele submetida.

- Terminadas as medidas para a primeira placa, substitua-a por outra com uma trilha horizontal de comprimento 50 mm. Lembre de fixar a placa ao braço da balança com o parafuso. Repita os passos anteriores.
- Siga os mesmos procedimentos para as trilhas horizontais de comprimento 50 mm, 25 mm e 12,5 mm. Para a trilha de 12,5 mm faça somente as medidas para corrente nula e 4,0 A.
- Anote a incerteza dos instrumentos de medida utilizados. Isso será necessário para alguns cálculos na Análise de Resultados.

Consulte o professor sobre a demonstração do motor e gerador elétrico.

### 8.6.3. Correntes de Foucault

- Sobre um suporte, fixe horizontalmente a barra cilíndrica preta.
- Coloque uma das três placas de alumínio para oscilar na extremidade da barra preta. Verifique se ela oscila livremente.
- Posicione o ímã no centro do pêndulo, figura 8.3a.
- Suspenda a placa até uma posição horizontal e então a solte, figura 8.3b.
- Observe o efeito produzido pela presença dos ímãs.
- Troque a placa de alumínio por outra e repita o procedimento.

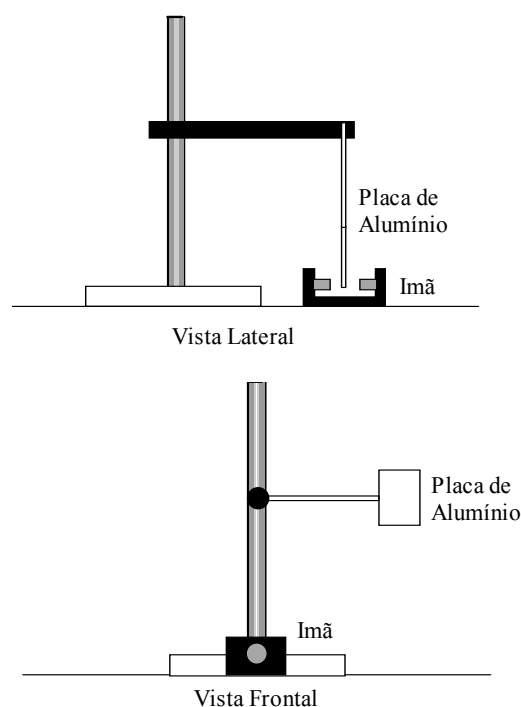


Figura 8.3: CORRENTES DE FOUCAULT. Montagem Experimental para o estudo das Correntes de Foucault. Qual a dependência com a quantidade de metal e forma com que este metal é distribuído? Como qualificar esta dependência?

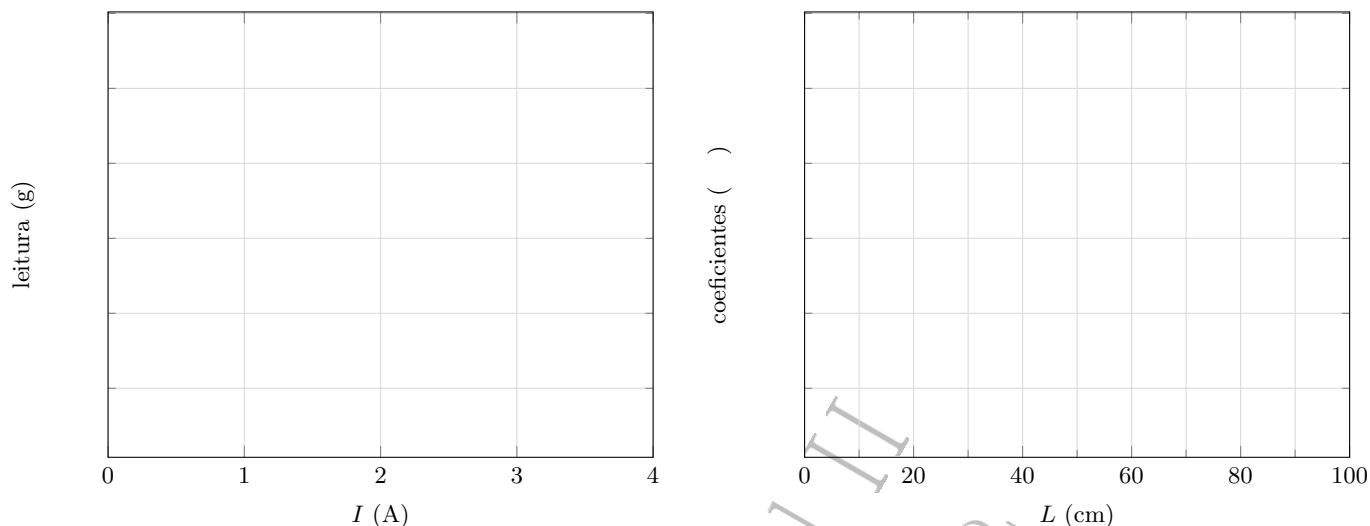


Gráfico 8.1: BALANÇA DE CORRENTE. Sobreponha o esboço da leitura na balança de corrente obtida para cada condutor em função da corrente elétrica aplicada, lembre-se de manter a mesma escala para as quatro curvas. Depois esboce o gráfico para os valores dos coeficientes angulares, para cada uma das curvas anteriores, como função do comprimento da trilha.

- Analise as diferenças observadas em função do tipo de placa de alumínio em questão.
- Responda a questão da seção de Análise de Dados.

## 8.7. Análise de Resultados

### 8.7.1. Carácter Vetorial da Força: Ímã e Fio Condutor

- Desenhe esquematicamente, na figura 8.4, o sentido da corrente elétrica, do campo magnético e da força magnética para cada situação analisada no experimento. Utilize para isso o triedro de vetores.
- Qual é a variação que ocorre, quando se inverte a polaridade dos fios?
- Explique o que aconteceu quando a intensidade de corrente foi aumentada.

Figura 8.4: ÍMÃ E FIO CONDUTOR. Faça o esboço indicando as direções e sentidos das força magnética observada experimentalmente bem como o sentido da corrente elétrica. Assumindo que é necessário uma operação matemática para converter um vetor associado ao sentido da corrente elétrica e o vetor força magnética, para onde pode estar a direção e sentido do campo magnético?

### 8.7.2. Intensidade da Força: Balança de Corrente

Com os dados medidos será possível fazer dois estudos que permitirão obter a relação entre a força magnética e a intensidade da corrente, e a relação entre a força magnética e o comprimento do condutor.

- Considere o condutor de comprimento 100 mm. Utilizando os resultados da tabela 8.1, referentes às correntes de 1 A, 2 A e 4 A que circularam pelo condutor, calcule a força magnética correspondente a cada leitura. A força peso das massas em um dos braços da balança é equilibrada pela força magnética sobre o condutor acrescida da força peso deste condutor, que estão aplicadas no outro braço da balança. Lembre que o que interessa é a variação da força em relação ao valor medido sem corrente.

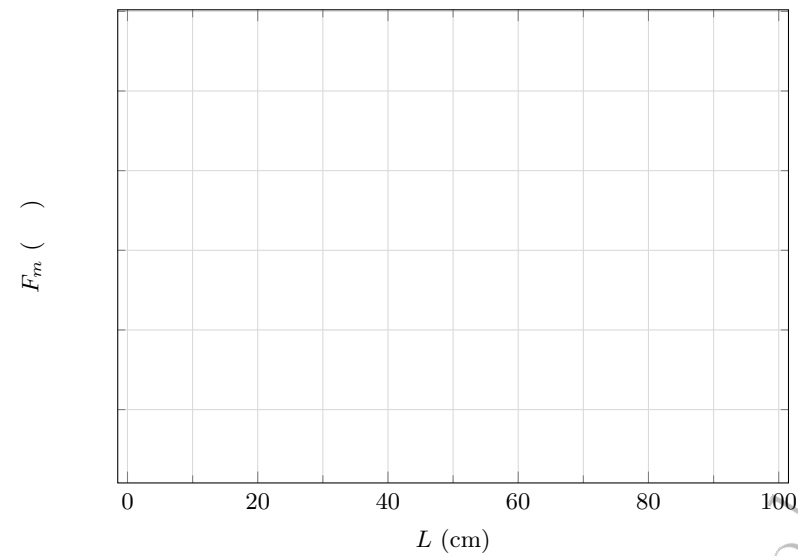


Gráfico 8.2: BALANÇA DE CORRENTE. Esboço da força magnética em função do comprimento da trilha.

- O que você observa com a força magnética à medida que a corrente aumenta?
- Considerando as incertezas da leitura da balança e da aceleração da gravidade e os resultados da tabela 8.1 calcule, para a trilha horizontal de comprimento 100 mm percorrida pela corrente de 2 A, a força magnética com incerteza.
- Utilizando o resultado do item anterior e as incertezas das medidas de comprimento e corrente, calcule o campo magnético na região da trilha horizontal com incerteza e anote o resultado na 8.2.
- Para cada trilha horizontal, faça um gráfico com a leitura da balança representada no eixo vertical e a corrente no eixo horizontal. Ajuste uma curva a estes pontos experimentais e obtenha a sua equação. Esboce o resultado obtido na gráfico 8.1.
- Que tipo de relação você obteve?
- Agora vamos estudar de que forma o comprimento da trilha horizontal influi na força. Considere os resultados para a corrente de 4 A. Utilizando os resultados da tabela 8.1, referentes às trilhas de comprimento 12,5 mm, 25 mm, 50 mm e 100 mm, calcule a força magnética correspondente a cada leitura.
- O que você observa com a força magnética à medida que o comprimento da trilha aumenta?
- Para o caso em que a corrente era de 4 A, faça um gráfico da força magnética em função do comprimento dos fios. Neste caso teremos apenas quatro pontos para representar. Faça o esboço do resultado na gráfico 8.2.
- Ajuste uma curva a estes pontos experimentais e obtenha a sua equação.
- Que tipo de relação você obteve?

Tabela 8.2: DETERMINAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO. A determinação do campo magnético  $B$  pode ser feita diretamente a partir de uma série de medidas.

$B ( \quad )$	
1ª determinação	
2ª determinação	

### 8.7.3. Motor Elementar

- Descreva o que foi observado no funcionamento do motor elementar.
- Estabeleça o sentido da força magnética para cada trecho do enrolamento do motor.
- Por que ocorre rotação da bobina?

### 8.7.4. Gerador Elétrico

- Por que aparece uma força eletromotriz induzida?
- Por que a força eletromotriz induzida apresenta alternância de sinal?
- Observando a curva registrada, o que se observa com o período do sinal de tensão gerada? Como isto está relacionado com o movimento do eixo?

### 8.7.5. Correntes de Foucault

- Explique as diferenças observadas em função do tipo de placa de alumínio em questão, utilizando os seguintes conceitos:
  - geração de correntes elétricas induzidas pelo movimento relativo da peça através do campo magnético do ímã e
  - da força magnética total sobre um condutor de corrente.



## EXPERIMENTO 9

---

### Indução Magnética

---

#### 9.1. Objetivos

- Analisar o fenômeno da indução magnética.
- Medir a força eletromotriz (fem) induzida pelo movimento relativo entre um indutor e um ímã.
- Verificar o acoplamento magnético entre dois circuitos indutivos colocados próximos.
- Determinar o fluxo magnético.

#### 9.2. Material Utilizado

Computador e interface, sensor de tensão elétrica, fonte de corrente contínua, indutores (bobinas), ímãs, núcleo de ferro, gerador de sinais, cabos para conexão, interruptor de campainha, placas de alumínio, suporte, garras, galvanômetro.

#### 9.3. Bibliografia

Física, F. Sears, M. W. Zemansky e H. D. Young. Vol. 3, 2a Ed., (1985), Cap. 33.

“Física”, P. Tipler, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 2: 4a Ed. Cap.29 a 31; 5a e 6a Ed. Cap. 27 a 29.

“Fundamentos de Física”, D. Halliday e R. Resnick, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 3: 6a Ed. Cap.29 a 31; 7ª e 8a Ed. Cap.28 e 30.

#### 9.4. Roteiro de Estudo

1. Você observou experimentalmente em uma prática anterior que se pode construir o modelo de linhas de força para o

campo elétrico. Como são as linhas de força do campo magnético de um ímã?

2. Qual é a definição de fluxo do campo magnético? Qual sua unidade no S.I.?
3. O que diz a lei de Faraday da indução eletromagnética?
4. Com base na equação da lei de Faraday, deduza uma expressão que permita calcular o fluxo magnético  $\Phi$  em função da força eletromotriz  $\mathcal{E}$  registrada pela interface.
5. Justifique o sinal negativo que aparece na lei de Faraday.
6. O que diz a lei de Lenz?
7. Qual das leis de Newton é análoga à lei de Lenz?
8. O que são correntes de Foucault?
9. Dê exemplos de dispositivos em que a indução eletromagnética é um fenômeno importante.

### 9.5. Descrição do Experimento

Este experimento está dividido em 3 partes, todas mostrando que para ocorrer indução de força eletromotriz deve haver uma variação de fluxo magnético.

Inicialmente é analisado o que acontece com a diferença de potencial nos terminais de um indutor (bobina) quando um ímã se aproxima e se afasta dele. Para isso, monitora-se os terminais do indutor com um sensor de tensão elétrica. Observa-se então no computador um gráfico da diferença de potencial no indutor em função do tempo.

A próxima etapa é uma prática envolvendo dois circuitos (bobinas) independentes, cada um contendo um indutor. Um dos circuitos é conectado ao sensor de tensão e o outro a uma fonte de tensão (contínua ou alternada). Observa-se no computador a tensão induzida quando a corrente fornecida pela fonte varia.

A última parte envolve uma análise qualitativa sobre o movimento de 3 diferentes tipos de placas de alumínio em um campo magnético, envolvendo o conceito de correntes de Foucault.

### 9.6. Procedimento Experimental

Os canais de um osciloscópio têm a função de voltímetros, de forma que podem ser considerados como circuitos abertos (resistência infinita). Como o osciloscópio não está diretamente conectado ao computador teremos que transferir os dados utilizando um memória removível padrão USB.

## 9.6.1. Ímã Caindo

- Prenda o indutor ao suporte, deixando o furo central na vertical e numa altura conforme indicado na figura 9.1. Este posicionamento permite obter resultados melhores.
- Ligue o osciloscópio. Observe a tensão de operação do aparelho!
- Deve-se conectar o indutor ao canal 1 do osciloscópio por meio de um cabo BNC-pino banana. Para ativar este canal apertando o botão 1. Quando o canal estiver ativado o correspondente botão ficará verde.
- Deve-se escolher a taxa de amostragem girando o botão mais a esquerda do **Horizontal**. O valor adequado para esta etapa do experimento é de 1 kSa/s, que é equivalente à 100 ms/div..
- Na parte de cima do osciloscópio temos um botão **run/stop**, este deverá estar em verde, indicando que o osciloscópio está coletando dados.
- Depois de soltar o ímã através do tubo, você deverá congelar a imagem apertando o botão **run/stop** para que ele interrompa a coleta de dados. Certifique-se que uma figura de interação deva estar presente na tela do osciloscópio. Caso você não tenha esta figura completa, refaça até conseguí-la.
- Para salvar estes dados você terá que colocar a memória removível padrão USB, uma pendrive, na parte de trás do osciloscópio. Aguarde algum tempo até que o aparelho reconheça esta memória.
  - Os dados coletados serão salvos na memória removível ativando-se o botão **save/recall**. Surgirá um menu no lado direito da tela do osciloscópio.
  - Usando os botões laterais da tela, você deverá escolher na opção **Storage** a saída USB.
  - Logo mais abaixo você deverá escolher a opção **File Type**, tipo de arquivo, com a saída em **.csv**.
  - Então você deverá apertar **salva**.
  - Você deverá escolher um nome de arquivo para salvar os dados, garanta que você terá seis nomes de arquivos seguindo a sugestão do osciloscópio que deverá ser algo parecido com **MarFile\_00.csv**. Escolha um nome de arquivo a seu gosto.
  - Troque os algarismos finais adequadamente sobrepondo um novo caractere usando o botão de girar, justo ao lado do botão **save/recall** que você usou, e a tecla **Enter**.

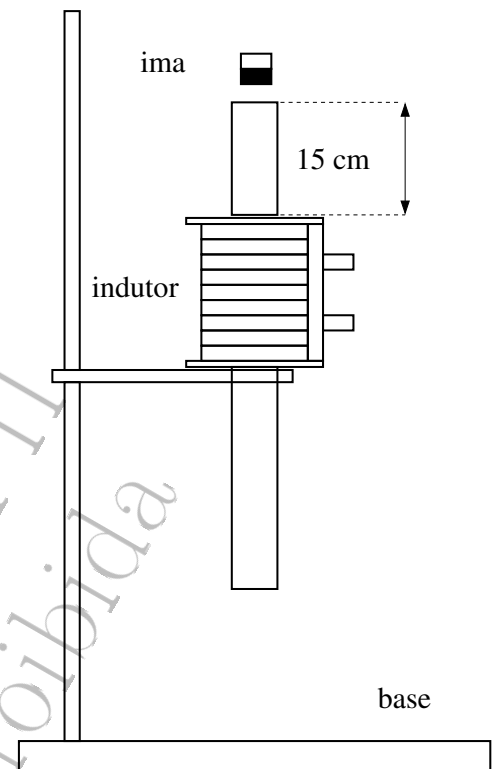


Figura 9.1: IMÃ. Montagem do sistema para o estudo da consequência da queda de um ímã.

- Finalmente você deverá pressionar **save**. Cada novo arquivo coletado você poderá ver os anteriores listados na tela quando for salvar o próximo arquivo.

- Repita o procedimento, invertendo a posição do ímã.
- Repita o procedimento, trocando o indutor por outro com um número de espiras diferente como indicado na tabela 9.1
- Para o tratamento de dados você deverá transferir os arquivos de dados para o computador. Após conectar a memória removível você deverá usar o comando

```
% mean.sh
```

Lembre-se de não digitar o símbolo “%”, este símbolo é o pronto do computador. Este comando irá transferir adequadamente os arquivos em formato **csv** que estão na memória removível para o computador.

Atenção! Nenhum arquivo da memória removível será modificado. Todos os arquivos **csv**, e somente estes, na raiz da memória removível serão processados, independente do nome escolhido. Uma vez processados estes serão copiados para o computador com o mesmo nome que você deu.

- Utilize o programa **scidavis** você deverá fazer o tratamento de dados. Os seus dados devem ser importados como **ASCII**
- O gráfico produzido é a curva correspondente à diferença de potencial (ou a força eletromotriz) induzida no indutor em função do tempo, durante a queda do ímã. Faça o esboço deste gráfico na gráfico 9.1.
- Com este gráfico é possível determinar a força eletromotriz máxima induzida no indutor. Anote estes resultados na tabela 9.1.
- Com este gráfico é possível também determinar o fluxo magnético  $\Phi(t)$  provocado pelo ímã. Primeiro determine o fluxo da entrada do ímã na bobina e depois o fluxo da saída.

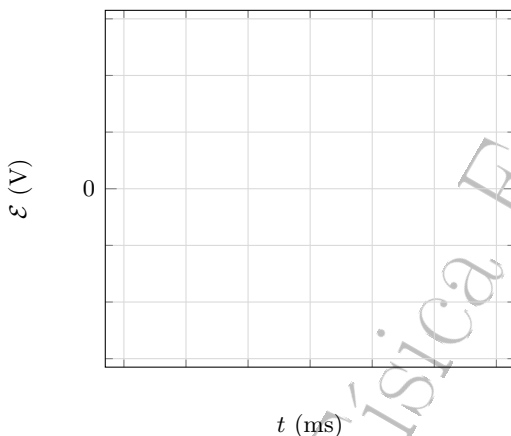


Gráfico 9.1: ÍMÃ CAINDO. Esboce a figura que você obteve na tela do computador durante a queda do ímã.

### 9.6.2. Transformador

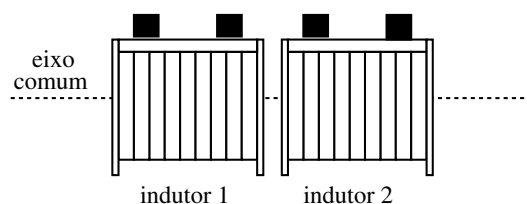


Figura 9.2: TRANSFORMADOR. Montagem experimental dos indutores para o estudo de transformadores.

- Monte um circuito com um indutor de 300 espiras conectado a uma fonte de corrente contínua. Insira em série neste circuito um interruptor de campainha. Este indutor 1 também é chamado de primário.
- Monte outro circuito com um indutor de 1200 espiras ligado a um galvanômetro. Este instrumento irá monitorar a força eletromotriz induzida no indutor 2 também chamado de secundário.

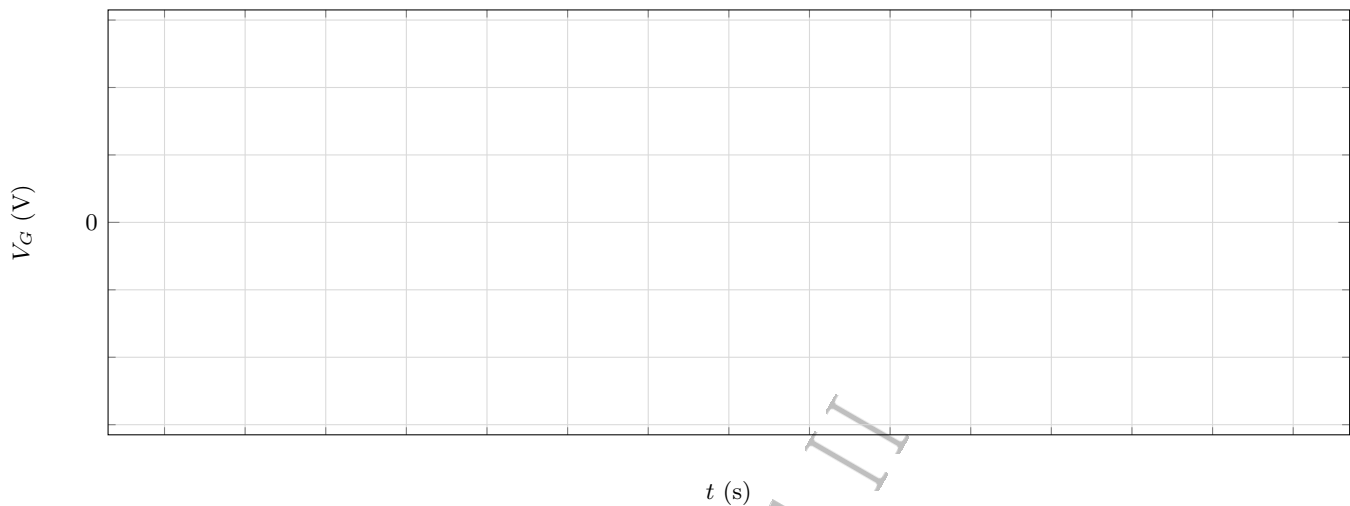


Gráfico 9.2: TRANSFORMADOR. Esboço do comportamento da tensão induzida no secundário utilizando o galvanômetro quando se liga e se desliga o interruptor.

- Aproxime os dois indutores no sentido axial, conforme a figura 9.2. Ligue e desligue a corrente usando o interruptor de campainha. Observe em que situação o galvanômetro indica a passagem de corrente e o seu sentido.
- Faça um esboço na gráfico 9.2 sobre o comportamento da tensão no galvanômetro quando você aperta o interruptor e quando você solta o interruptor.
- Daqui em diante mantenha o núcleo em forma de barra no indutor.
- Repita o procedimento anterior, trocando a fonte de corrente contínua e o interruptor de campainha por um gerador de sinais.
- Utilize o indutor 1 com 1200 espiras. Ligue um resistor de  $200\,\Omega$  em série com este indutor, com o objetivo de limitar

Tabela 9.1: FORÇA ELETROMOTRIZ E FLUXO MAGNÉTICO. Nesta tabela  $V_1$  representa o valor máximo da força eletromotriz medida, do primeiro pico, e  $V_2$  o valor máximo do segundo pico. O símbolo  $\Delta\Phi_1$  refere-se à variação do fluxo magnético calculado considerando-se apenas o intervalo de tempo até que o ímã chegue na parte mediana da bobina (aproximação do ímã) e  $\Delta\Phi_2$  à variação do fluxo considerando-se o trecho seguinte (afastamento do ímã).

Nº Espiras	$V_1$ ( )	$V_2$ ( )	$\Delta\Phi_1$ ( )	$\Delta\Phi_2$ ( )	$\Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2$ ( )
300					
600					
1200					

Nº Espiras	$V_1$ ( )	$V_2$ ( )	$\Delta\Phi_1$ ( )	$\Delta\Phi_2$ ( )	$\Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2$ ( )
300					
600					
1200					

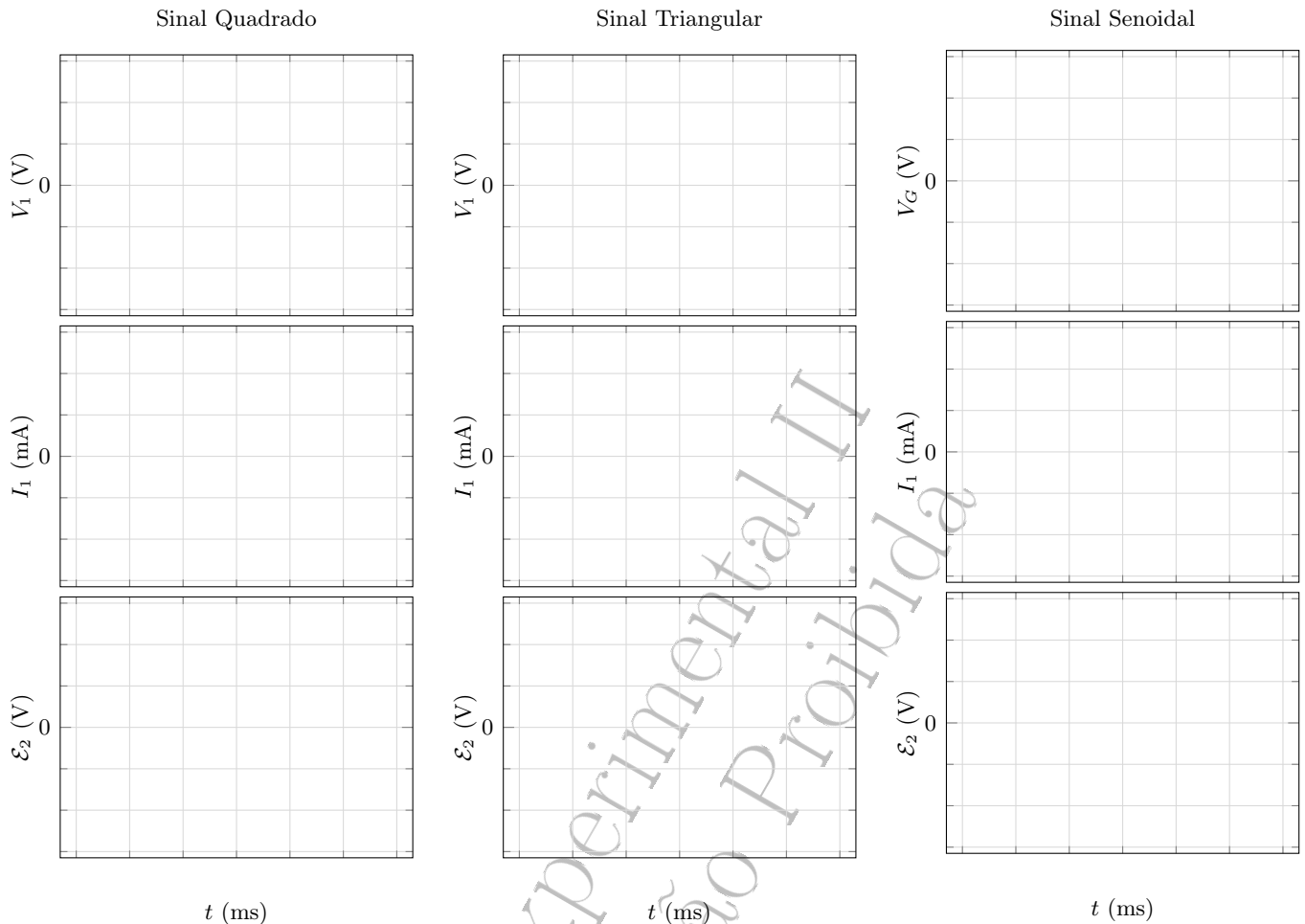


Gráfico 9.3: TRANSFORMADOR. Trace o esboço das figuras obtidas quando o transformador está conectado com o gerador de sinais como função do tempo. Fique atento que no gráfico superior deve ser esboçado o sinal que o gerador de função aplica sobre o indutor 1 enquanto que o gráfico inferior tem o sinal medido no indutor 2. O gráfico intermediário é da corrente que circula no indutor 1. Não esqueça de sincronizar os gráficos superiores com os inferiores.

a corrente fornecida pela fonte. Mantenha o indutor 2 com 1200 espiras.

- Prepare o gerador para produzir um sinal retangular com frequência de 50 Hz.
- Conecte o par de terminais do canal “1” em paralelo com a saída do gerador. Neste canal será monitorada a tensão aplicada pelo gerador ao indutor 1.
- Retire o galvanômetro e conecte o par de terminais do canal “2” em paralelo com os terminais do indutor 2. Neste canal será monitorada a força eletromotriz induzida no indutor 2.
- Modifique a forma do sinal produzida pelo gerador de sinais, para a forma triangular. Nesta situação, utilize o indutor 1 com 300 espiras e um resistor de  $33\ \Omega$  ligado em série com ele.
- Faça o esboço, tanto da tensão sobre o gerador quanto no secundário, do que você obteve na gráfico 9.3, tomando o cuidado de manter uma sincronia temporal.

- Complete o esboço no quadro referente a corrente elétrica na gráfico 9.3. Tenha o cuidado de verificar se a forma da função no canal “2” não modificou, caso tenha modificado verifique sua montagem.
- Recoloque o canal “1” em paralelo com a saída do gerador.
- Proceda agora com a forma quadrada, registrando os resultados e fazendo os esboços na gráfico 9.3.
- Repita o item anterior mantendo os mesmos indutores, porém, com o gerador de sinais produzindo uma forma senoidal. Nesta etapa você deverá trocar o resistor por um de  $10\ \Omega$ .
- Faça os esboços na gráfico 9.3.
- Meça os valores máximos das tensões registradas no indutor 1 e no indutor 2.
- Após terminar estas medidas não desconecte o conector DIN da interface.
- Responda as questões da Análise de Dados.

## 9.7. Análise de Resultados

### 9.7.1. Ímã Caindo

- Por que surgem dois picos para cada queda livre do ímã através do indutor?
- Por que os picos que surgem são desiguais?
- Qual dos picos é o maior? Tente descobrir por quê.
- O que muda no gráfico quando o ímã é invertido?
- O que muda no gráfico quando o número de espiras é aumentado?
- Para uma das curvas, selecione os dados da tensão medida e transfira-os para um programa de planilha e análise de dados. Programe esta planilha de forma que seja calculado, por integração numérica, o fluxo magnético  $\Phi(t)$  em todos os instantes. Faça o gráfico do fluxo calculado em função do tempo e esboce-o na gráfico 9.4.

Para obter os valores da força eletromotriz medida pelo programa “Data Studio” utilize neste programa o menu Display e a opção NewTable. Aparecerá na tela uma nova janela. O conjunto de dados desejados pode ser assinalado e, em seguida, utilizado o menu “Edit” e a opção “Copy”. Agora estes dados podem ser “colados” diretamente na planilha escolhida.

- Análise o gráfico do fluxo magnético em função do tempo. Ele é simétrico em relação ao ponto de máximo? Explique o seu comportamento.

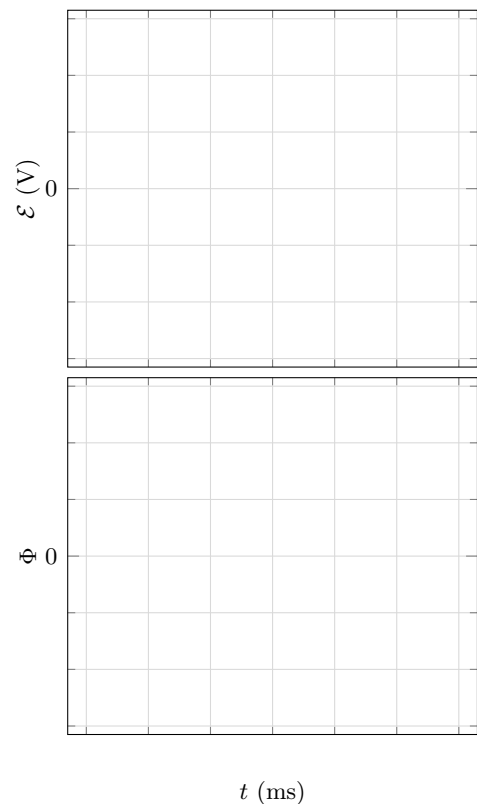


Gráfico 9.4: FLUXO DO ÍMÃ CAINDO. Esboce o sinal obtido durante a queda do ímã através do tubo no espaço acima. No espaço inferior esboce o fluxo que você calculou. Não esqueça de manter a sincronia do tempo entre os dois gráficos.

- Programe a planilha para calcular a posição do ímã em cada instante. Faça um gráfico do fluxo magnético em função da posição. Esboce o resultado na gráfico 9.4. Ele é simétrico?
- Analise o gráfico do fluxo em função da posição. Explique este comportamento.
- Esboce para cada caso analisado, as linhas de campo magnético, a polaridade da força eletromotriz induzida e a direção do movimento do ímã.
- Avalie cada situação em termos da lei de Faraday.

#### 9.7.2. Transformador

- Explique, para as situações analisadas, o que provocou o registro de picos de tensão induzida.
- Por que há uma alternância de picos positivos e negativos?
- Por que cada pico é assimétrico? A descida é mais lenta do que a subida.
- Qual foi a forma do sinal da tensão induzida no indutor 2 quando foi aplicada uma forma triangular no indutor 1? Observando os gráficos registrados, que relação matemática associa estas duas funções?
- Qual foi a forma do sinal da tensão induzida no indutor 2 quando foi aplicada uma forma senoidal no indutor 1?
- Qual a forma do sinal da corrente elétrica no primário? Qual a relação da forma desta corrente com a tensão aplicada pela fonte?
- No caso do sinal senoidal, existe diferença de fase entre a tensão aplicada pela fonte e a corrente circulando no primário? Explique.



## EXPERIMENTO 10

---

### Circuitos RC e RLC no Regime Transitório

---

#### 10.1. Objetivos

- Estudar o comportamento dos circuitos RC e RLC em série, quando submetidos a uma diferença de potencial em forma de sinal quadrado.
- Estudar as oscilações amortecidas em circuitos RLC.
- Determinar a frequência natural de oscilação de um circuito RLC em série.

#### 10.2. Material Utilizado

Osciloscópio; Gerador de Sinal; capacitores, indutores e resistores; placa de conexão; cabos para conexão.

#### 10.3. Bibliografia

<http://fisica.ufpr.br/cf064/solucoes-RLC.pdf>

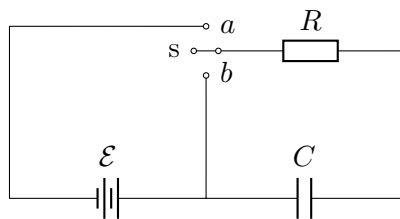
“Física”, F. Sears, M. W. Zemansky e H. D. Young. Vol. 3, 2ª Edição (1985), Cap. 27 a 29, e Cap.36.

“Física”, P. Tipler, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 2: 4ª Ed. Cap.31; 5ª e 6ª Ed. Cap. 29.

“Fundamentos de Física”, D. Halliday e R. Resnick, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 3: 6ª Ed. Cap.33; 7ª e 8ª Ed. Cap.31.

#### 10.4. Roteiro de Estudo

1. Qual grandeza física que caracteriza um resistor? Qual sua unidade no S.I.?



Circuito 10.1: CIRCUITO RC. Esquema elétrico para o estudo do Circuito RC. Quando a chave **S** está conectada ao ponto **a** a bateria  $\mathcal{E}$  efetua a carga do capacitor enquanto que se a chave **S** está conectada ao ponto **b** ocorre a descarga do capacitor.

2. Qual grandeza física que caracteriza um capacitor? Qual sua unidade no S.I.?
3. Para o circuito RC da circuito 10.1, escreva a equação diferencial que descreve a variação da carga  $q$  com o tempo  $t$  durante o carregamento do circuito, identificando cada elemento da equação.
4. Faça o mesmo para o descarregamento do circuito.
5. Quais são as expressões que representam as soluções das equações diferenciais anteriores? Faça um esboço do comportamento destas soluções em função do tempo.
6. De que forma varia a corrente na carga e na descarga do circuito RC série? Faça um esboço do comportamento destas soluções em função do tempo.
7. Como é definida a constante de tempo de um circuito RC? Qual o seu significado?
8. Escreva as expressões para  $V_R(t)$  e  $V_C(t)$  na carga e na descarga. Faça um esboço destas soluções em função do tempo.
9. Suponha que você dispõe um resistor de  $100\text{ k}\Omega$  e um capacitor com capacitância da ordem de  $\text{nF}$ , e que você deseja estudar o comportamento do circuito RC usando o gerador de sinais com forma quadrada. Qual deve ser o período mínimo do sinal usado para alimentar o circuito RC? Seria adequado usar o sinal da fonte com frequência  $100\text{ kHz}$ ? Justifique a resposta.
10. Compare a equação diferencial do oscilador massa-mola com a do circuito RLC em série. Faça uma analogia entre cada elemento.
11. Qual é a expressão para a energia armazenada num indutor? Em que situação ela é máxima?
12. Qual é a expressão para a energia armazenada num capacitor? Quando ela é máxima?
13. Escreva a solução para a corrente  $I(t)$  num circuito RLC sem fontes (oscilação amortecida). Qual é o fator correspondente à envoltória?
14. No caso da questão anterior, o que acontece com a energia inicial fornecida ao sistema?
15. A partir da observação da oscilação amortecida, explique como você poderia determinar a frequência natural de oscilação do circuito.
16. Qual é a expressão para a frequência natural do circuito ( $f_o$ ) em função dos parâmetros do mesmo?

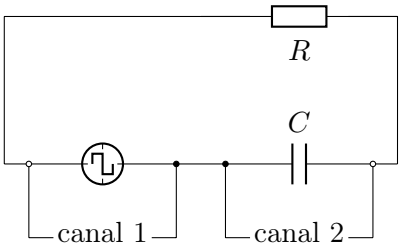
10.5. Procedimento Experimental

10.5.1. Circuito RC

- Observe o circuito da circuito 10.2. Monte-o sobre a placa de conexão. Utilize, por exemplo,  $R = 10\text{ k}\Omega$ ,  $C = 0,1\text{ }\mu\text{F}$ . Meça antes o valor efetivo da resistência  $R$ , com o multímetro, e anote-o na tabela 10.1.
- Ligue o osciloscópio e ligue também o gerador de sinal. Observe a tensão de operação de cada aparelho!
- A conexão do gerador de sinal e do osciloscópio com a placa deve ser feita utilizando cabos BNC-pino banana. Observe as polaridades.
- Certifique-se que os pinos banana pretos dos dois canais do osciloscópio estejam na mesma linha do pino banana preto do gerador de sinal.
- Acione o botão “autoscale” do osciloscópio.
- Irão surgir dois sinais na tela do osciloscópio. O sinal de cima é a tensão do gerador de sinal (canal 1) e o de baixo é a tensão sobre o capacitor (canal 2).

Coleta de Dados

- No gerador de função ajuste a forma do sinal com a tecla “wave” para uma forma quadrada e ajuste o botão de frequência para 100 Hz. Ajuste a amplitude de tensão para 9 V.
- Na tela do osciloscópio irão aparecer dois gráficos, que correspondem à variação da diferença de potencial em função do tempo fornecida pelo gerador de sinal em cima e a tensão sobre o capacitor em baixo. Faça o esboço daquilo que você observa na gráfico 10.1 tomando o cuidado se sincronizar os dois gráficos.
- Você deve observar nos gráficos uma sequência de sinais semelhantes aqueles obtidos na experiência sobre osciloscópios. Com estes gráficos é possível determinar a constante de tempo capacitiva.
- Utilize os cursores do osciloscópio e determine experimentalmente esta constante  $\tau_1$ , anotando o seu valor na tabela 10.2.
- Repita este procedimento para um outro capacitor, por exemplo, com 680 nF. Neste caso verifique e ajuste a frequência do gerador de sinal. Anote o valor de  $\tau_2$  na tabela 10.2.
- A partir dos valores de  $R$ ,  $\tau_1$  e  $\tau_2$  medidos, calcule as capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$  e anote-os na tabela 10.2.



Circuito 10.2: CIRCUITO RC. Circuito RC Série utilizado para estudar o comportamento de carga e descarga sendo que os pontos pretos representam os pinos banana pretos, tanto para os canais do osciloscópio quanto para o gerador de sinal. Observe que estes pinos deverão estar ligado sempre na mesma linha. Que medidas são feitas a partir das medidas experimentais das tensões sobre o capacitor e sobre o resistor?

Tabela 10.1: CIRCUITO RC. Determine o valor efetivo da resistência elétrica do resistor por meio do multímetro.

$R$
-----

Tabela 10.2: CIRCUITO RC. Anote o valor de  $\tau$  e deterimne o valor de  $C$ .

$i$	$\tau_i$ (ms)	$C_i$ ( $\mu\text{F}$ )
1	_____	_____
2	_____	_____

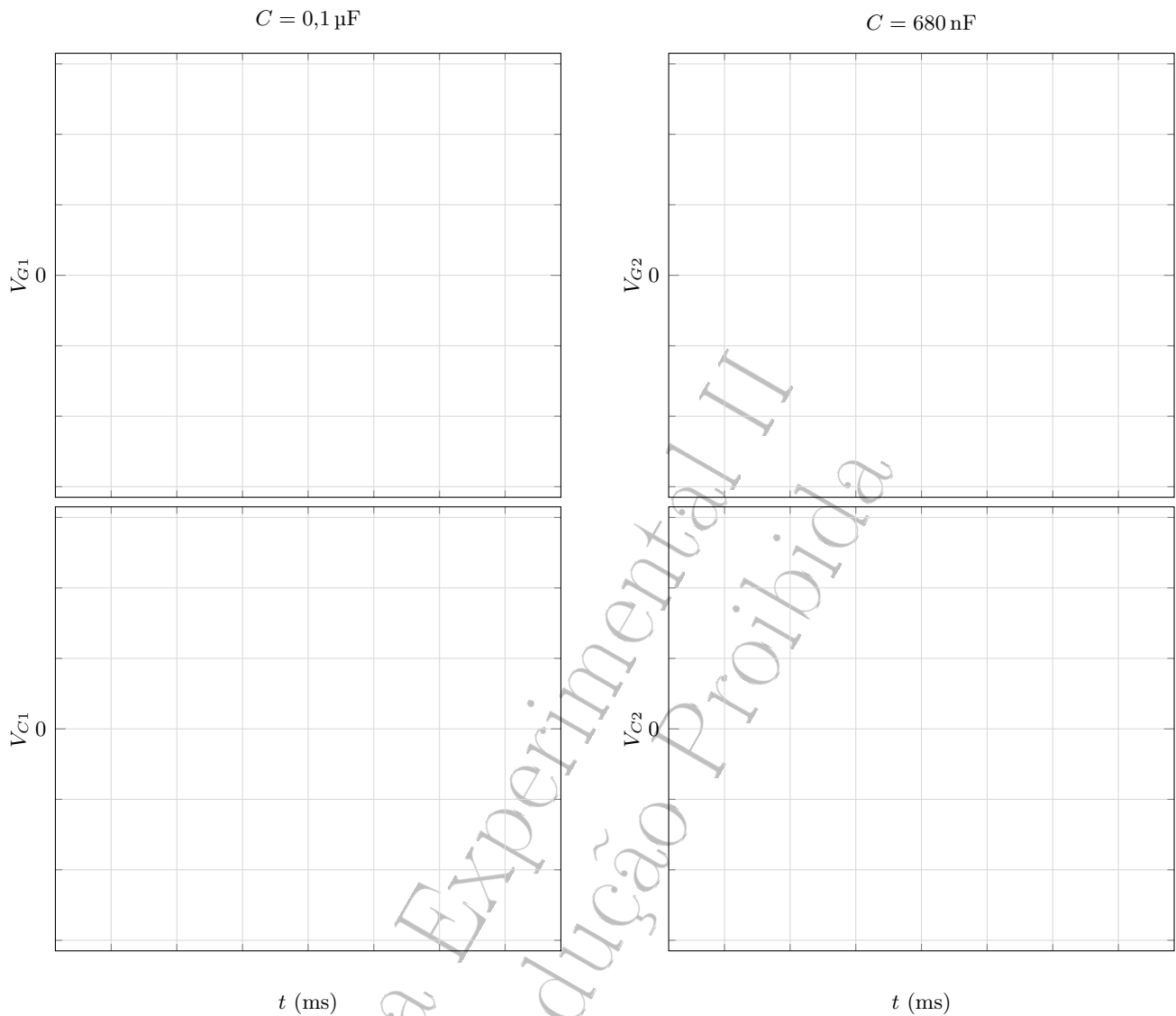
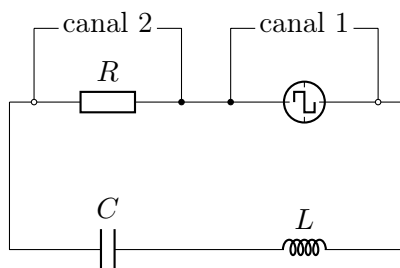


Gráfico 10.1: RLC TRANSIENTE. Trace o esboço do gráfico que você observa no computador. Lembre-se de sincronizar as duas figuras. Os dois gráficos a esquerda são para  $C = 0,1 \mu\text{F}$  e os da direita são para  $C = 680 \text{ nF}$ .



Circuito 10.3: CIRCUITO RLC. Com a introdução do indutor o carregamento do capacitor fica alterado e aqui pode ser medido pela corrente que atravessa o resistor.

- Você pode também fazer medidas da constante de tempo medindo o canal 2 sobre o resistor invertendo a posição dos dois componentes no circuito.
- Responda as questões da Análise de Resultados.

#### 10.5.2. Circuito RLC

- Utilize, por exemplo,  $R = 22 \Omega$ ,  $C = 680 \text{ nF}$  e uma bobina com 1200 espiras.
- Antes de ligar o indutor ao circuito meça a sua resistência ôhmica  $R_L$  com o ohmímetro. Meça também a resistência efetiva do resistor  $R_R$  e anote-os na tabela 10.3.

- Monte o circuito conforme a circuito 10.3.
- Utilizando dois cabos do tipo pino banana faça a conexão do osciloscópio com a placa.
- Conecte os terminais tipo pino banana do canal 1 do osciloscópio em paralelo com o gerador de sinal. Faça o mesmo com o canal 2 e o resistor. Veja a circuito 10.3. Observe a polaridade!

Coleta de Dados

- No gerador de sinal ajuste para que a saída do gerador seja de uma forma quadrada com frequência de 20 Hz e amplitude igual a 9,0 V.
- No osciloscópio aperte a tecla “autoscale”.
- Irão surgir dois gráficos, que correspondem à variação da diferença de potencial em função do tempo sobre o gerador de sinal e sobre o resistor, respectivamente. Trace o esboço observado na gráfico 10.2.
- Você deve observar no canal 2 do osciloscópio uma sequência de sinais oscilatórios cuja amplitude,  $a$ , decresce com o tempo. Com estes gráficos é possível determinar o coeficiente de amortecimento e a frequência natural de oscilação desse circuito  $f_o$ . A solução geral que descreve o comportamento das tensões tem a forma

$$V(t) = V_{max} e^{-\frac{R}{2L}t} \cos(\omega t + \phi)$$

(10.1)

onde  $V_{max}$  ,  $\omega$  e  $\phi$  são constantes.  $V_{max}$  é a amplitude máxima,  $\omega$  é a frequência angular natural e  $\phi$  é a fase.

- Utilize os cursores e determine o período  $T_o$  dessa oscilação. Calcule então a frequência natural  $f_o$  com que o sistema oscila e anote-o na tabela 10.4.

Tabela 10.3: CIRCUITO RC. Determine o valor efetivo da resistência elétrica da bobina e do resistor por meio do multímetro.

$R_L$
$R_R$

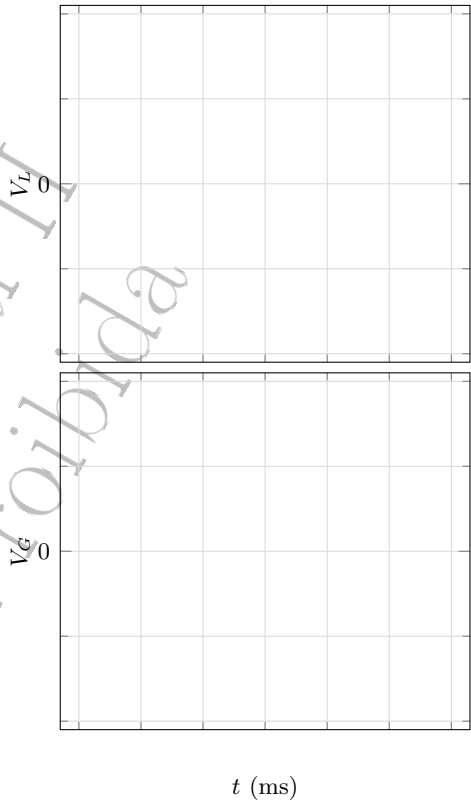


Gráfico 10.2: RLC TRANSIENTE. Trace o esboço dos gráficos que você observa no computador. Lembre-se de sincronizar as duas figuras.

Tabela 10.4: CIRCUITO RLC. Determine o frequência de oscilação do circuito.

$f_o$
-------

Tabela 10.5: CIRCUITO RLC. Medida dos valores máximos de  $a$  em cada ciclo.

$n$	$R = 22 \Omega$ s/ núcleo		$R = 22 \Omega$ c/ núcleo		$R = 75 \Omega$ s/ núcleo	
	$t_i$ ( )	$a$ ( )	$t_i$ ( )	$a$ ( )	$t_i$ ( )	$a$ ( )
1						
2						
3						
4						
5						

Tabela 10.6: CIRCUITO RCL. A partir da tabela 10.5 podemos ajustar uma equação matemática a estes pontos medidos. Anote os valores dos coeficientes determinados neste ajuste de função.

Fator	
Expoente	

- Procure determinar a envoltória destes gráficos. Esta é uma curva exponencial que descreve a dissipação de energia no circuito. Com os cursores meça os valores máximos  $a$  de cada ciclo, organizando os dados na tabela 10.5. O intervalo de tempo entre um máximo e o seguinte é igual a  $T_0$ .
- Com os valores da tabela 10.5 faça sobre o papel milimetrado disponível no final da apostila um gráfico adequado para determinar uma equação matemática ajustada.
- Com um programa para traçado de gráficos, ajuste uma equação a estes pontos e anote o resultado na tabela 10.6. Dê uma interpretação física para seus coeficientes.
- Coloque um núcleo em forma de barra no interior do indutor.
- Utilizando o resistor de  $22\ \Omega$ , repita o procedimento de medida com a interface seguido nos itens anteriores.
- Monte o indutor com um núcleo fechado e repita o passo anterior.
- Substitua o resistor por outro, com resistências de  $75\ \Omega$  ou de valor próximo a este, e repita os passos anteriores. Faça uma tabela das amplitudes para cada caso.
- O que você observa com relação ao decaimento exponencial da oscilação? Faça também um ajuste da curva e compare os valores dos seus parâmetros com o caso anterior.
- Troque a posição do resistor pelo do capacitor e indutor. Verifique o comportamento do sinal obtido no canal 2.

## 10.6. Análise de Resultados

### 10.6.1. Circuito RC

- Que tipo de curva de  $V_R$  e  $V_C$  em função do tempo você obtém na carga e na descarga do capacitor?
- Qual é a constante de tempo obtida em cada curva? Elas deveriam ser iguais? Justifique.
- Analise a diferença obtida entre o valor medido de  $C$  e o valor nominal. Qual foi o desvio obtido? Quais foram as possíveis causas?
- Se você quisesse determinar a carga máxima no capacitor, como você procederia?

### 10.6.2. Circuito RLC

- Faça uma comparação do circuito RLC com o oscilador massa-mola. Analise com detalhes todas as semelhanças.
- Que mudança você observa nos gráficos ao utilizar diferentes resistores?

- Observando os gráficos no osciloscópio compare as fases das tensões sobre o indutor e o capacitor. O que você observa? Explique.
- A teoria prediz que num circuito RLC a frequência de ressonância é igual a

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (10.2)$$

Com base nesta afirmação, determine a indutância da bobina utilizada.

- Considere os dados obtidos com o resistor de  $2\Omega$ . Com base na equação da envoltória da oscilação amortecida

$$A(t) = A_m e^{-\frac{R}{2L}t}, \quad (10.3)$$

faça um gráfico de  $A$  em função de  $t$  e o ajustamento necessário para obter o valor da resistência total do circuito. Coloque o esboço na gráfico 10.3.

- Com os dados utilizados no item anterior, faça um gráfico de  $\ln(A)$  em função de  $t$ . Coloque o esboço na gráfico 10.3. Faça o ajustamento e compare o resultado com aquele obtido no gráfico anterior.
- Calcule a indutância da bobina nas situações sem núcleo e com o núcleo em forma de barra, utilizando os períodos de oscilação medidos.

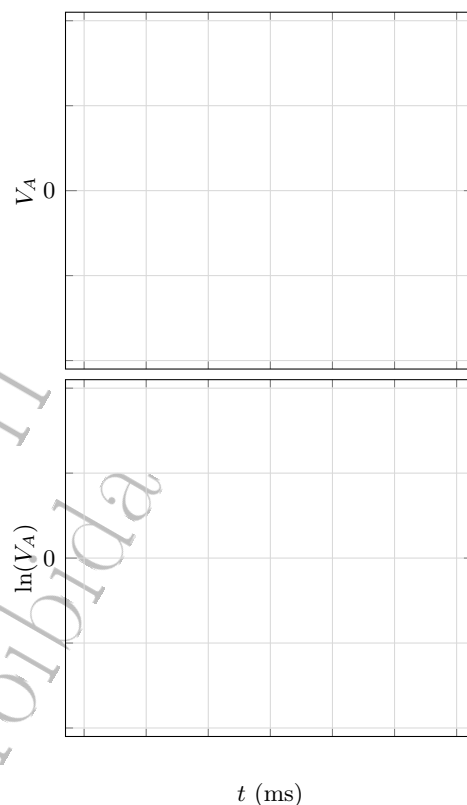


Gráfico 10.3: RLC TRANSIENTE. Faça o esboço do gráfico de  $A$  e de  $\log(A)$  em função do tempo.

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*



## EXPERIMENTO 11

---

### Circuitos RC e RLC no Regime Senoidal Permanente

---

#### 11.1. Objetivos

- Estudar o comportamento de um circuito RC em Série, quando submetido a uma diferença de potencial senoidal: diferença de fase entre tensão e corrente; amplitude de tensão sobre o resistor em função da frequência; determinação experimental da capacitância.
- Examinar a resposta da corrente no circuito RLC e da diferença de fase entre a corrente e a tensão aplicada, quando é aplicada uma ddp externa sob a forma do sinal senoidal. Estudar a ressonância em um circuito RLC.

#### 11.2. Material Utilizado

Gerador de função; osciloscópio digital; capacitores, indutores e resistores; placa de conexão; cabos para conexão.

#### 11.3. Bibliografia

<http://fisica.ufpr.br/cf064/solucoes-RLC.pdf>

“Física”, F. Sears, M. W. Zemansky e H. D. Young. Vol. 3, 2o Edição (1985), Cap. 27 a 29, e Cap.36.

“Física”, P. Tipler, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 2: 4a Ed. Cap.31; 5a e 6a Ed. Cap. 29.

“Fundamentos de Física”, D. Halliday e R. Resnick, Edit. LTC Ltda, Rio de Janeiro, Vol. 3: 6a Ed. Cap.33; 7ª e 8a Ed. Cap.31.

11.4. Roteiro de Estudo

1. Considere dois sinais elétricos oscilando com a mesma frequência de 35 Hz. Enquanto um dos sinais atinge seu valor máximo no instante  $t_1 = 0,089\text{ s}$  o outro sinal só alcança seu valor máximo no instante  $t_2 = 0,093\text{ s}$ . Determine para este exemplo: a) a frequência angular do sinal e b) a diferença de fase entre os sinais.
2. Como se pode determinar o ângulo de fase entre a intensidade de corrente e a diferença de potencial sobre os elementos de um circuito RLC?
3. Qual a expressão que descreve a curva do pico de corrente em função da frequência, no fenômeno da ressonância?
4. Cite três situações do cotidiano onde os fenômenos estudados estão envolvidos e são relevantes.

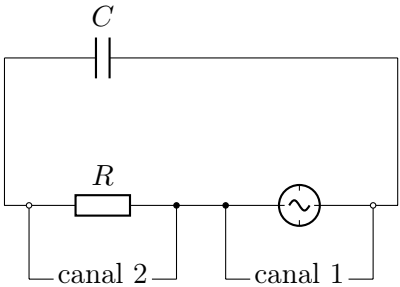
Embora o objetivo principal deste experimento seja estudar o comportamento dos circuitos em regime permanente senoidal, será necessário fazer algumas medidas iniciais em regime transitório, a fim de se obter dados importantes. Neste caso o gerador de funções alimentará o circuito com tensão em forma do sinal quadrado. Isto será feito tanto no circuito RC quanto no RLC. As etapas e seus objetivos podem ser resumidos no seguinte esquema:

Circuito	Regime	Determinação de
RC	Senoidal	Capacitância
RLC	Quadrada	$f_o$
RLC	Senoidal	comportamento

11.5. Procedimento Experimental

11.5.1. Circuito RC: Regime Permanente Senoidal

Sinal Senoidal - Determinação da Capacitância



Circuito 11.1: CIRCUITO RC. Montagem experimental para a determinação da capacitância do capacitor utilizado. Que medidas são feitas a partir das medidas experimentais das tensões sobre o capacitor e sobre o resistor?

- Observe a circuito 11.1 e monte um circuito RC sobre a placa de conexão utilizando um capacitor de 680 nF e um resistor com resistência entre 500  $\Omega$  e 600  $\Omega$ .
- Conecte com um cabo BNC-banana o gerador de função à placa do circuito, identificando antes a polaridade dos cabos.
- Alimente o circuito com o gerador de funções programado para gerar sinais senoidais.

$f$ (Hz)	$V_F$ (V)	$V_R$ (V)	$\Delta\varphi$ ( )
100			
150			
200			
400			
600			
800			
1 000			
1 500			

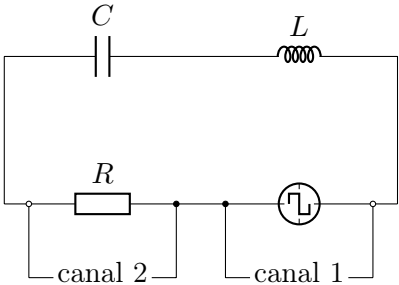
Tabela 11.1: CIRCUITO RC. Meça as amplitudes das tensões da fonte e sobre o resistor para determinar o valor da diferença de fase entre as duas funções.

- O canal 1 do osciloscópio deve ser ligado de forma a medir a tensão da fonte. O canal 2 deve medir a tensão sobre o resistor. Observe que os terminais de terra (terminais pretos) tanto do gerador quanto do osciloscópio devem estar ligados no mesmo ponto.
- Ajuste o gerador para produzir uma tensão com frequência aproximada de 50 Hz.
- Utilize a representação dos dois canais do osciloscópio no modo V-t para visualizar as oscilações da tensão aplicada pela fonte e da tensão sobre o resistor.
- Para medir as tensões de pico  $V_F$  e  $V_R$  utilize os recursos das medidas de  $V_{pp}$ , ativadas para os canais 1 e 2, de modo que ambas sejam visualizadas simultaneamente. Anotes os valores na tabela 11.1
- Mude a frequência da fonte conforme a tabela 11.1 e repita as medidas do passo anterior. Observe que as leituras no osciloscópio são atualizadas automaticamente. Basta anotar os novos resultados na tabela.

11.5.2. Circuito RLC: Regime Transitório

Sinal Quadrada - Determinação da Frequência Natural de Oscilação.

- Meça a resistência ôhmica do indutor antes de conectá-lo ao circuito.
- Monte o circuito com o resistor, o capacitor e o indutor fornecidos pelo professor. Por exemplo, utilize  $R = 22 \Omega$ ,  $C = 680 \text{ nF}$  e uma bobina com 1200 espiras (veja a circuito 11.2).
- Conecte o gerador de sinais e o osciloscópio à fonte de alimentação. Observe a tensão de operação de cada aparelho!



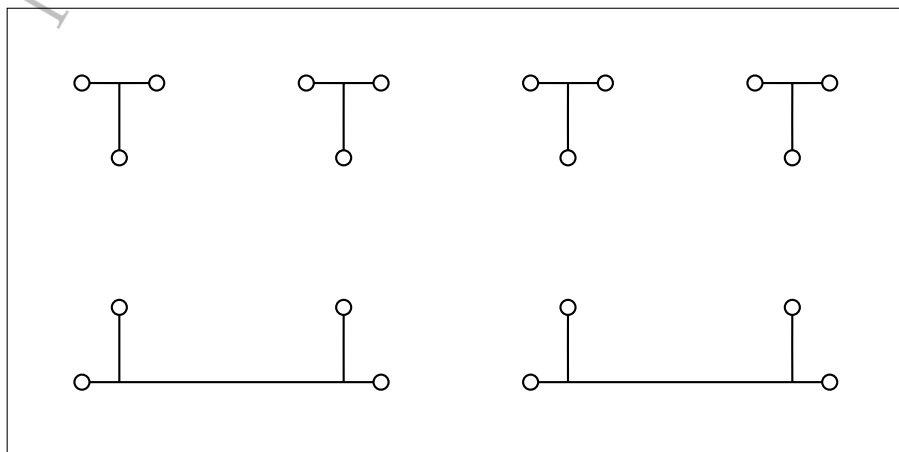
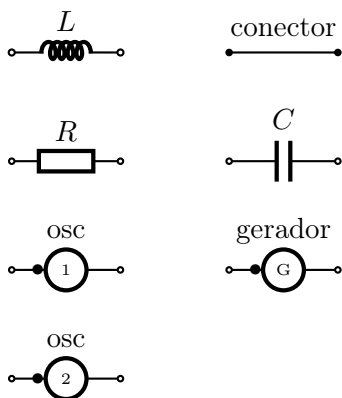
Circuito 11.2: CIRCUITO RLC. Montagem experimental para o estudo do circuito RLC. Explique por que quando coloca-se um sinal quadrado pode-se determinar a frequência natural deste sistema.

- Conecte a saída do gerador de sinais ao circuito RLC em série. Ligue um dos canais do osciloscópio para monitorar a tensão aplicada ao circuito. Ligue o outro canal do osciloscópio para monitorar a tensão sobre o resistor. Preste atenção para conectar todos os terminais de terra num mesmo ponto.
- Ajuste para que a saída do gerador seja de uma forma quadrada com frequência aproximada de 20 Hz.
- Irão surgir na tela dois gráficos, um deles corresponde à variação da diferença de potencial em função do tempo sobre resistor. O comportamento da corrente  $I$  no circuito é idêntico ao de  $V_R$ , visto que  $V_R = RI$ , e  $R$  é constante.
- Você deve observar no gráfico uma sequência de sinais oscilatórios cuja amplitude decresce com o tempo. A partir da medida do período de oscilação nestes gráficos é possível determinar a frequência natural de oscilação do circuito RLC,  $f_o$ .
- Utilize os cursores e determine experimentalmente o período dessa oscilação.

### 11.5.3. Circuito RLC: Regime Permanente Senoidal

- Ajuste o gerador para que seja aplicado ao circuito um sinal senoidal. A frequência do sinal aplicado deverá variar desde valores 200 Hz abaixo de  $f_o$  até 200 Hz acima de  $f_o$ . Use intervalos de 25 ou 50 Hz, veja tabela 11.2.
- Complete os valores da tabela 11.2 calculando as frequências a serem aplicadas a partir do valor de  $f_o$  determinado anteriormente.
- Para cada caso, meça a amplitude da tensão da fonte e sobre o resistor, e a diferença de fase entre o sinal da tensão aplicada ao circuito e o sinal da tensão sobre o resistor, tabela 11.2. Para isso use os recursos das medidas de  $V_{pp}$  e dos cursores do osciloscópio.

Circuito 11.3: CIRCUITO RLC. A partir do esquema da circuito 11.2 faça a montagem na placa de conexões no laboratório. Anote aqui como ficou sua montagem. Lembre-se que os pontos pretos estão representando os aterramentos dos respectivos componentes.



$R (\Omega)$	Frequência (Hz)		Amplitude de		$\Delta t ( \quad )$	$\varphi ( \quad )$	$I ( \quad )$
	Planejada	Utilizada	$V_R (V)$	$V_F (V)$			
$R_1 =$	$f_o - 200$						
	$f_o - 150$						
	$f_o - 100$						
	$f_o - 50$						
	$f_o - 25$						
	$f_o =$						
	$f_o + 25$						
	$f_o + 50$						
	$f_o + 100$						
	$f_o + 150$						
	$f_o + 200$						
	$f_o + 250$						
	$f_o + 300$						
$R_2 =$	$f_o - 200$						
	$f_o - 100$						
	$f_o - 25$						
	$f_o =$						
	$f_o + 25$						
	$f_o + 100$						
	$f_o + 200$						
	$f_o + 300$						

Tabela 11.2: CIRCUITO RLC. Resposta do circuito RLC, usando-se o resistor  $R_1$ . Observe no osciloscópio, para a frequência  $f_o$ , a diferença de fase entre a curva da tensão aplicada  $V_F$  e a curva da tensão  $V_R$ .

- Para determinar a diferença de fase, meça na tela, com a ajuda dos cursores, o intervalo de tempo  $\Delta t$  entre cristas adjacentes dos dois sinais. Depois disto calcula-se a diferença de fase lembrando que o tempo de um período  $T$  corresponde a  $360^\circ$  ou  $2\pi$  radianos (conforme a questão 1 do Roteiro de Estudo).
- Na tabela 11.2,  $\varphi$  representa a diferença de fase entre a corrente e a tensão, e  $I$  representa a amplitude da corrente que circula pelo circuito. Ambas as colunas são calculadas a partir dos dados medidos.

- Substitua o resistor por outro com valor diferente, fornecido pelo professor. Repita o procedimento anterior, completando a tabela 11.2.

### 11.6. Análise de Resultados

#### 11.6.1. Circuito RC

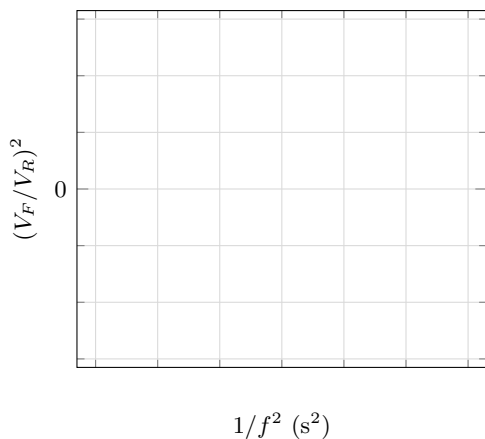


Gráfico 11.1: RC PERMANENTE. Trace o esboço do gráfico obtido para  $(V_F/V_R)^2$  em função de  $1/f^2$ .

- Faça um gráfico de  $(V_F/V_R)^2$  em função de  $1/f^2$ . Esboce o resultado na gráfico 11.1.
- Que forma de curva você espera obter para este gráfico?
- Ajuste uma equação para ele usando um programa de computador.
- Qual o significado físico dos coeficientes desta curva? Consulte a primeira referência bibliográfica desta experiência.
- Compare os resultados obtidos com os valores dos componentes do circuito.
- Calcule de  $\varphi$  em função de  $(V_F/V_R)^2$ . Preencha a tabela 11.1.

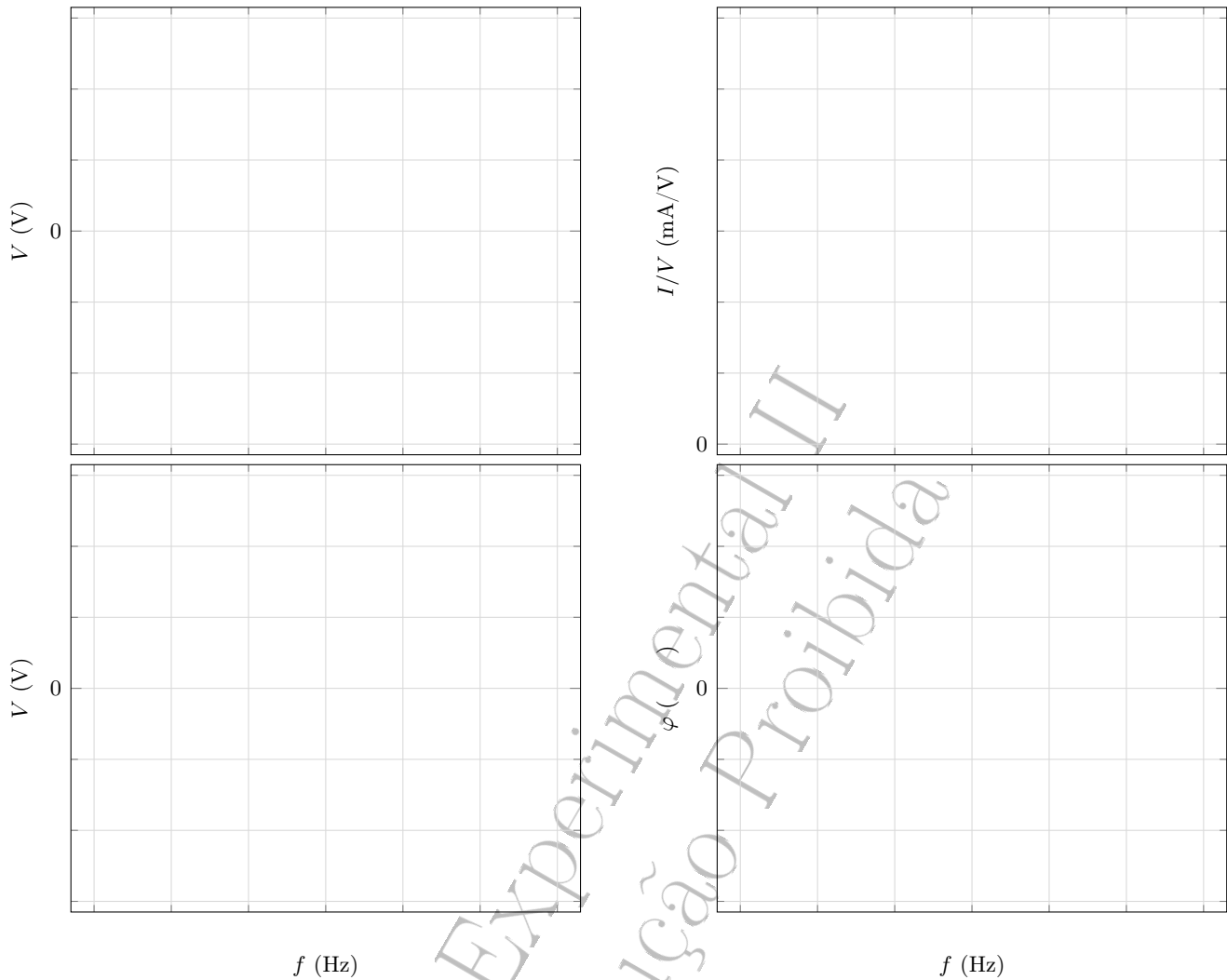
#### 11.6.2. Circuito RLC

- Calcule a corrente que circula pelo circuito, completando a tabela 11.2.
- A teoria afirma que num circuito RLC a frequência de ressonância é dada por

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (11.1)$$

Com base nesta expressão, determine a indutância da bobina utilizada.

- Construa um gráfico de  $I/V_F$  em função da frequência  $f$ . Represente as duas curvas, relativas a  $R_1$  e  $R_2$ , num mesmo gráfico. Esboce o resultado na gráfico 11.2.
- Qual a forma destas curvas? O que você observa com o valor máximo das curvas quando a resistência é modificada?
- Os resultados estão de acordo com a previsão teórica? Comprove isto sobrepondo as curvas teóricas no mesmo gráfico.
- Faça um gráfico da diferença de fase  $\varphi$  entre a corrente  $I$  e a tensão aplicada  $V_F$  em função da frequência  $f$ . Represente as duas curvas num mesmo gráfico. Esboce o resultado na gráfico 11.2.



- O que você observa com a diferença de fase entre a corrente e a tensão aplicada quando a frequência é aumentada? Que valor particular é apresentado pela diferença de fase quando o circuito entra em ressonância? Este comportamento foi o mesmo para os dois resistores utilizados?
- A partir dos seus gráficos, o que caracteriza a ressonância num circuito RLC em série?

Gráfico 11.2: RLC PERMANENTE. Nos dois gráficos da esquerda, esboce a tensão medida aplicada pela fonte  $V_F$  e a tensão medida no resistor  $V_R$  para cada uma das resistências utilizadas em separado. Já nos gráficos da direita esboce para as duas resistências, em um mesmo quadro, o gráfico de  $I/V_F$  e da diferença de fase  $\varphi$  que você obtiveram durante a análise.

*Física Experimental II*  
*Reprodução Proibida*



---

---

## Apêndice

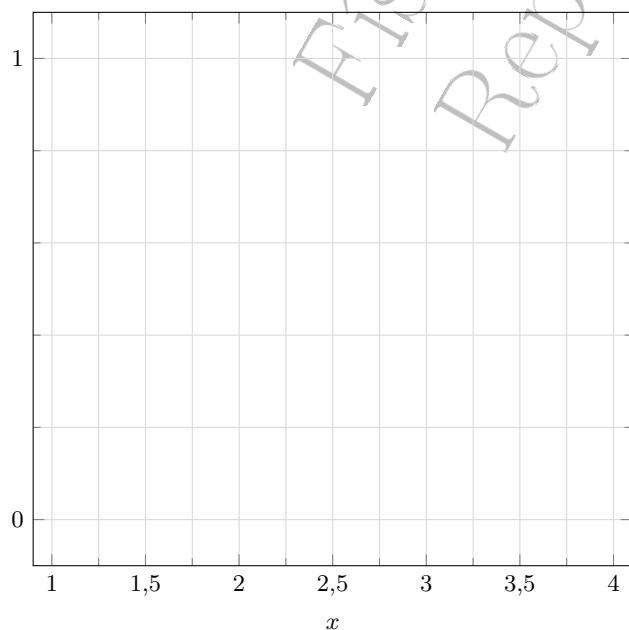
---

---

O objetivo de um esboço de um gráfico é dar uma idéia aproximada do comportamento de uma grandeza. Ele é feito quando não se tem um conjunto de medidas para fazer um gráfico preciso. Os seguintes critérios devem ser seguidos ao desenhar um esboço:

- Deve ter escalas nos eixos, como um gráfico
- Traçado com uma linha contínua e não com marcação de pontos experimentais como o gráfico
- a margem de erro no traçado é de no máximo 10% (em um gráfico é de 1%)
- Normalmente alguns pontos são conhecidos exatamente, e o traçado deve passar por eles com precisão

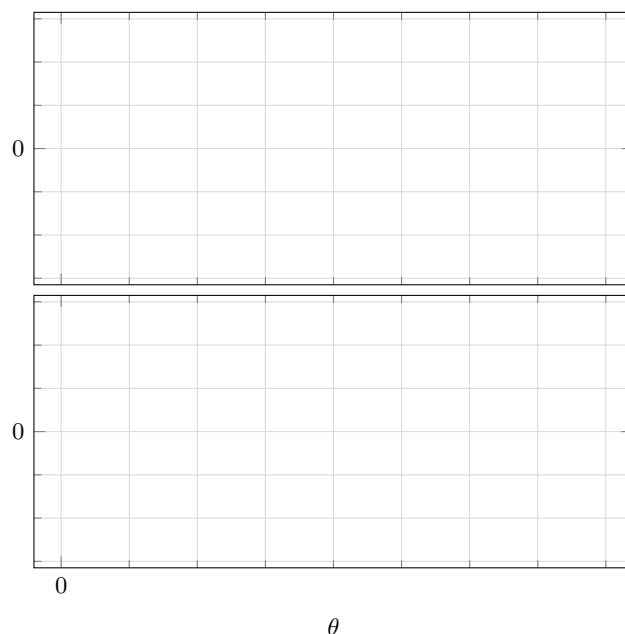
Trace uma função do tipo  $1/x$ . Desenhe no mesmo quadro, nas mesmas escalas, trace uma função  $1/x^2$ .



de 1% no esboço. Esses pontos são:

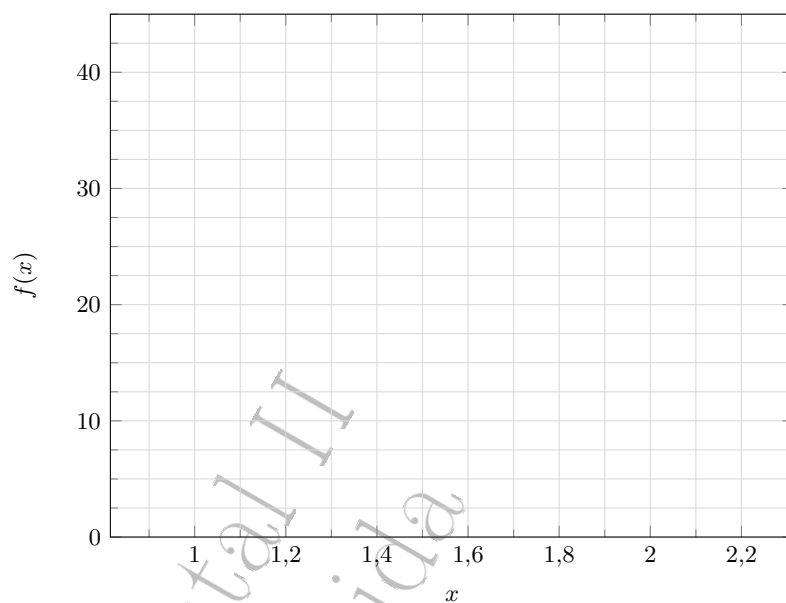
- Valores notáveis, como números racionais simples
- Zeros da primeira derivada (máximos e mínimos)
- Zeros de segunda derivada (mudança de concavidade)
- Além disso o sinal das 2 derivadas deve ser correto em todo traçado
- Sempre que houver simetrias o esboço também deverá obedecer estas simetrias no seu desenho.

Desenhe o esboço de uma função  $\sin \theta$  no primeiro quadro. No segundo quadro trace o esboço da derivada primeira da função traçada no primeiro quadro, mantendo a sincronia nos dois quadros..



A partir dos dados escritos na tabela faça um esboço da função associada à estes dados.

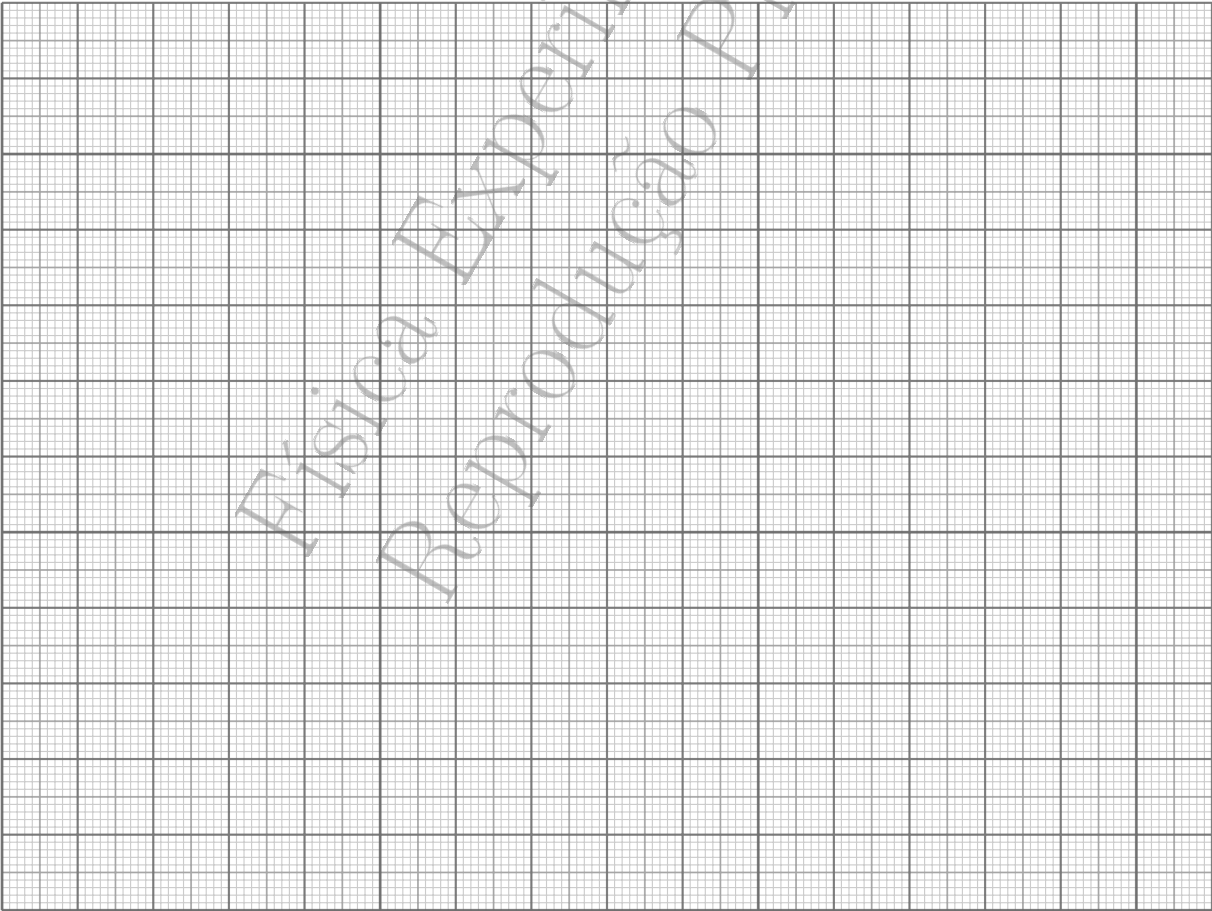
$x$	$f(x)$
1,1	22,0
1,3	13,0
1,5	9,7
1,8	6,8
2,1	5,2





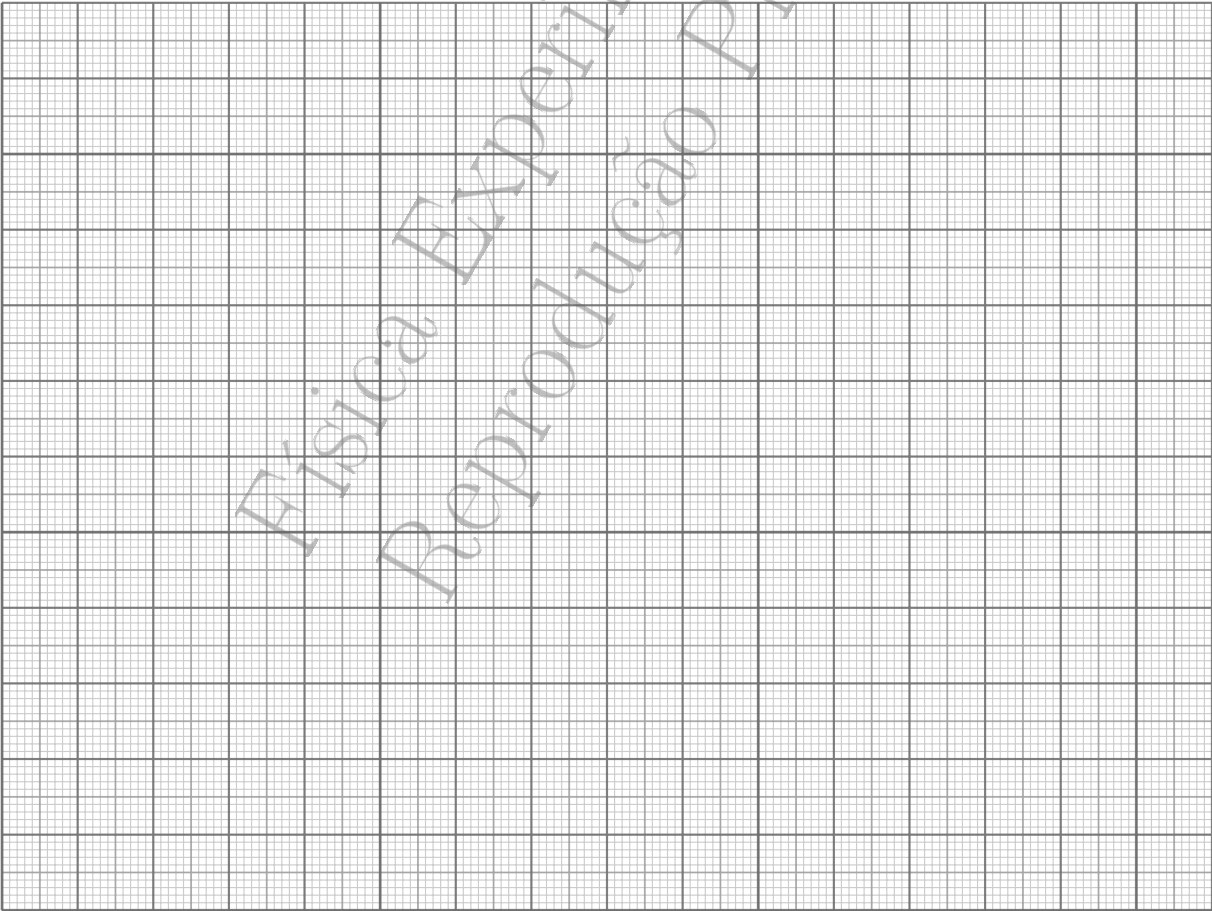
Experimento: \_\_\_\_\_

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____



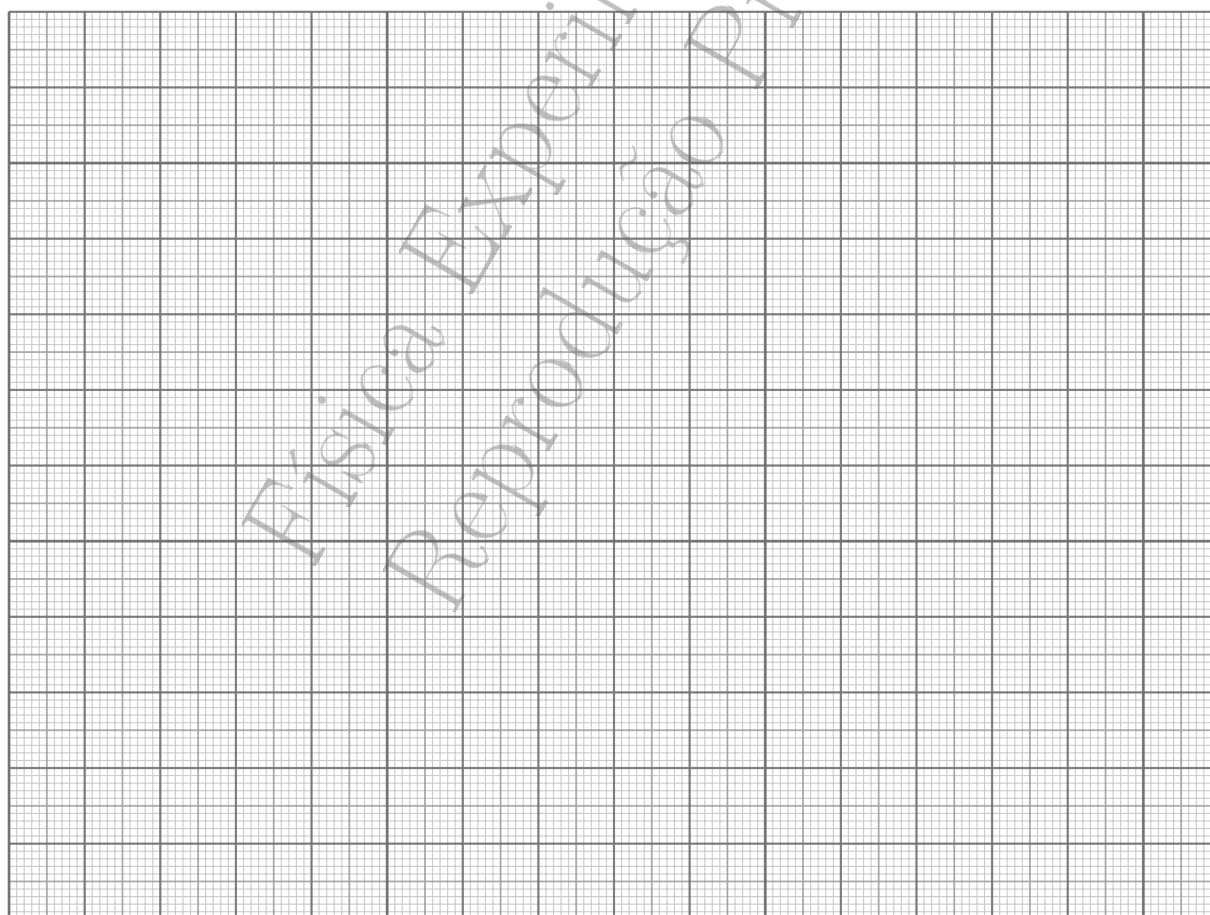
Experimento: \_\_\_\_\_

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____



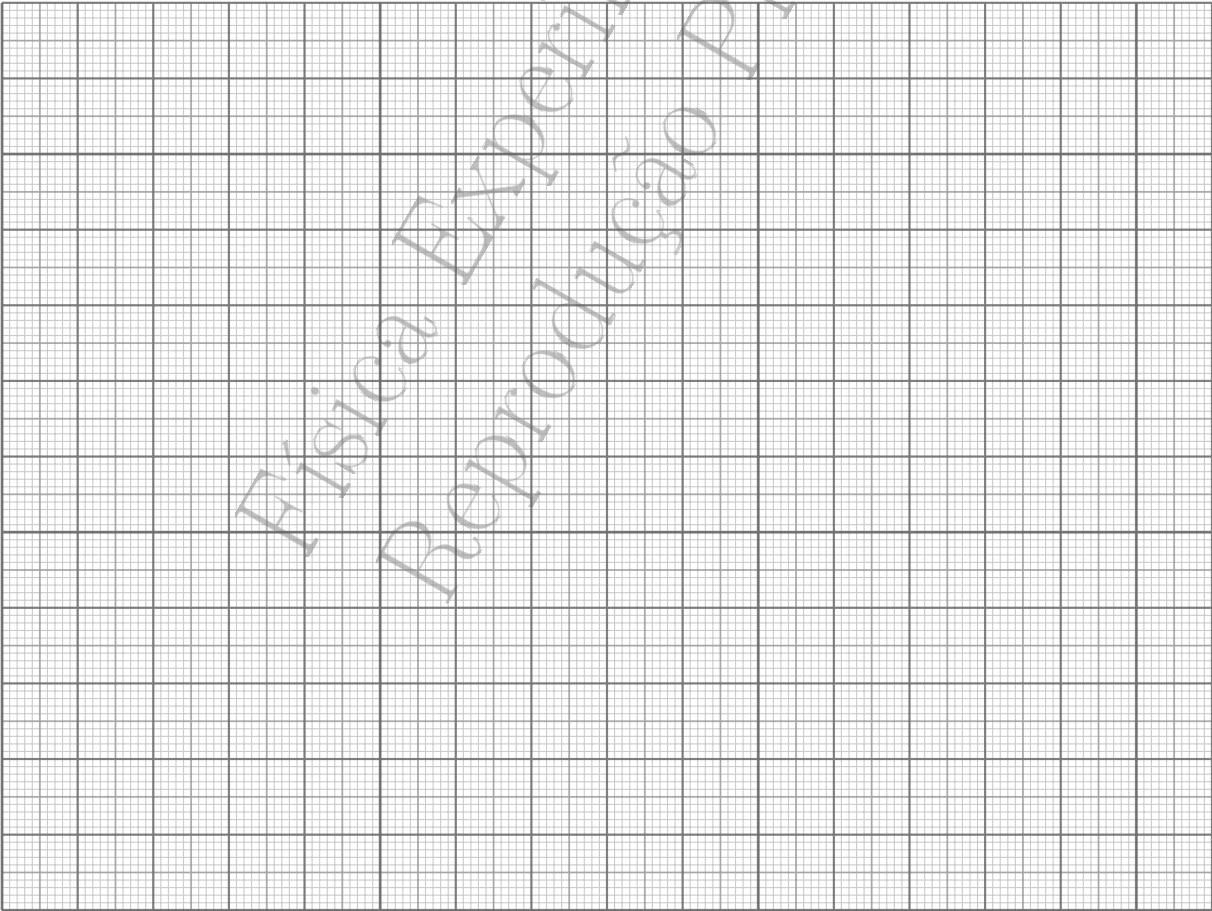
Experimento: \_\_\_\_\_

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____



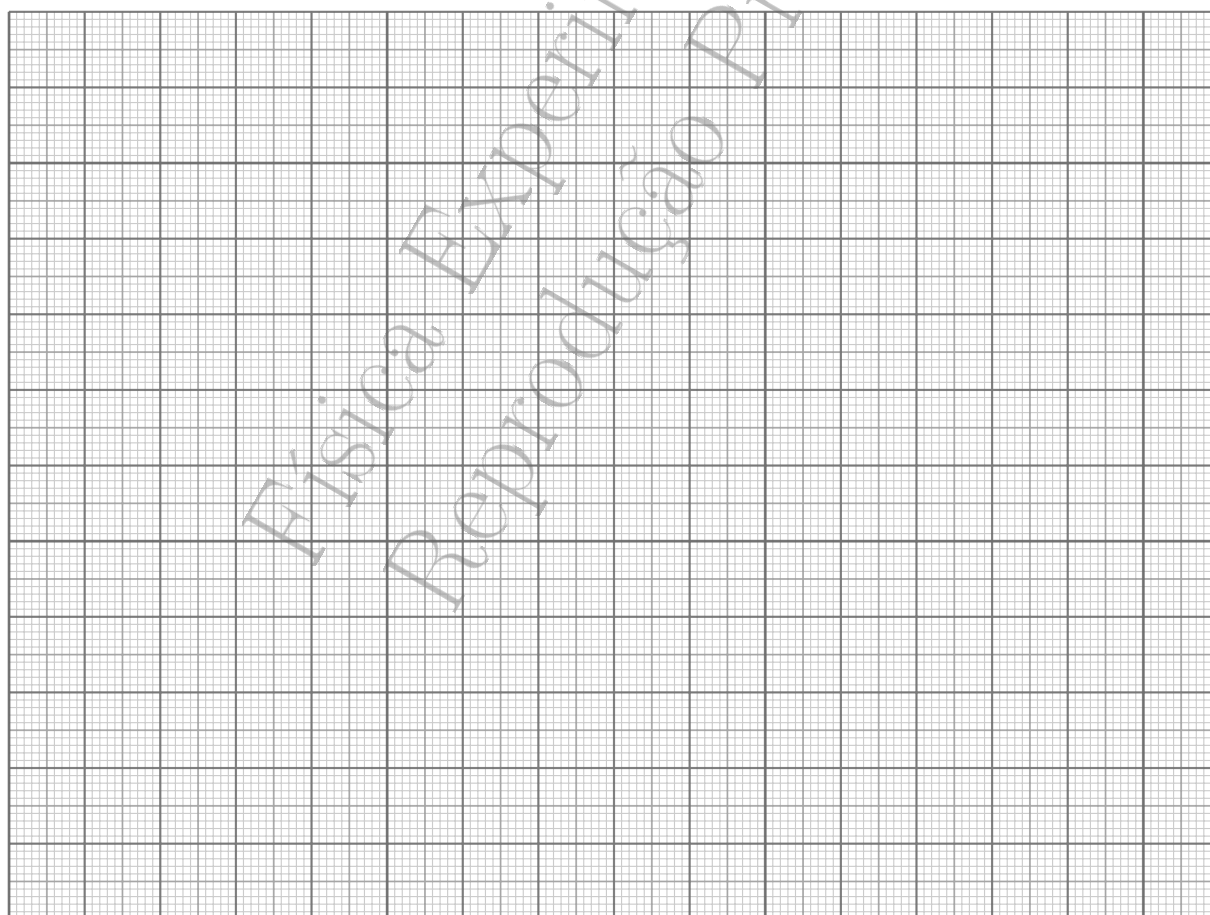
Experimento: \_\_\_\_\_

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____



Experimento: \_\_\_\_\_

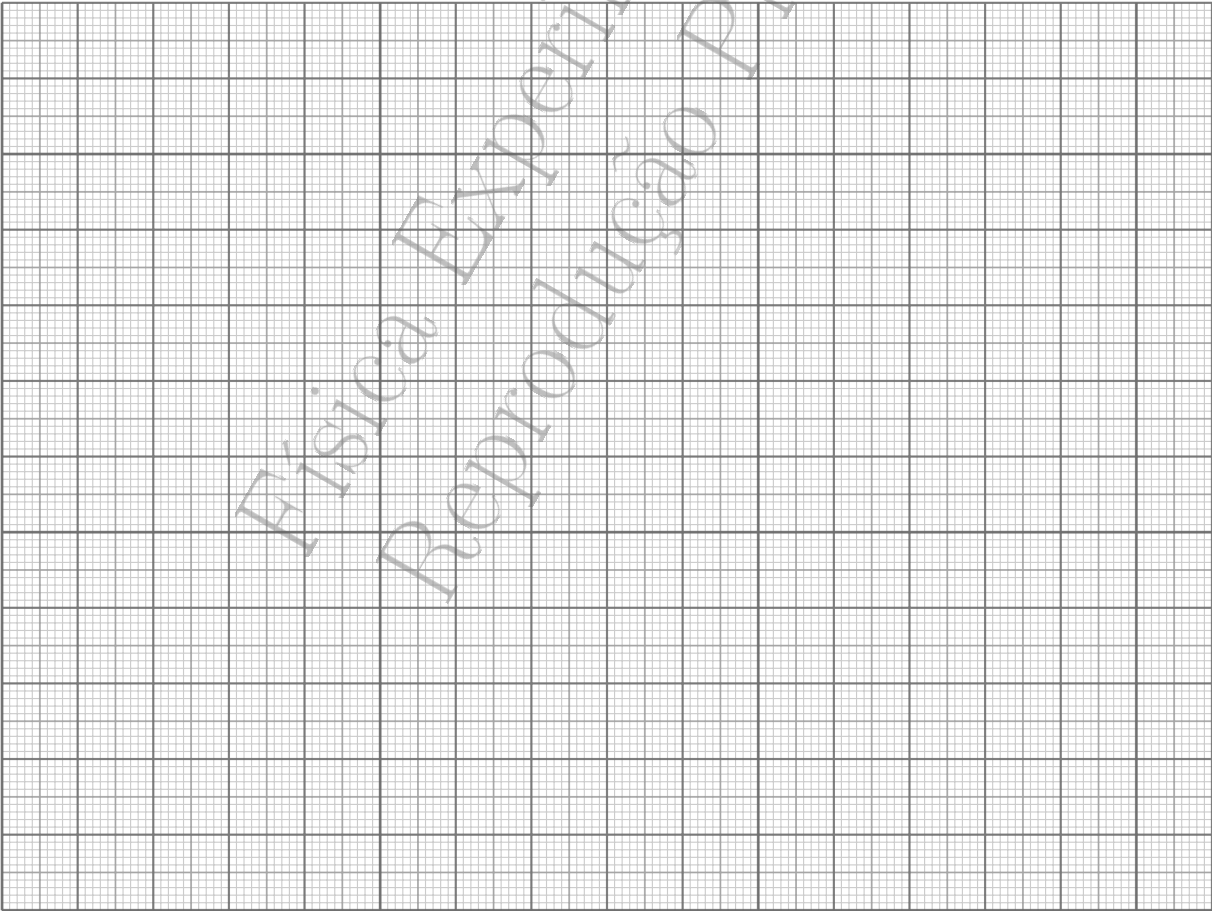
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____





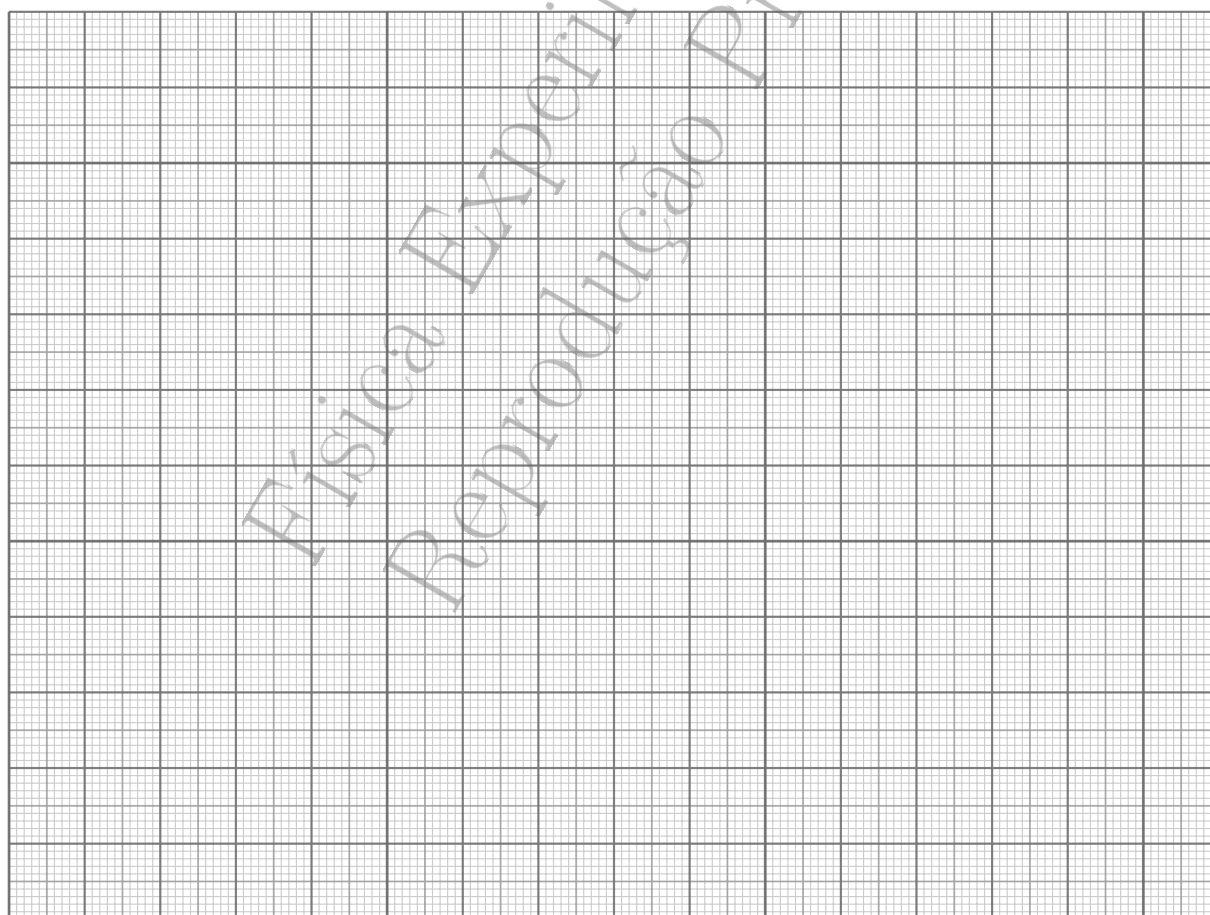
Experimento: \_\_\_\_\_

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____



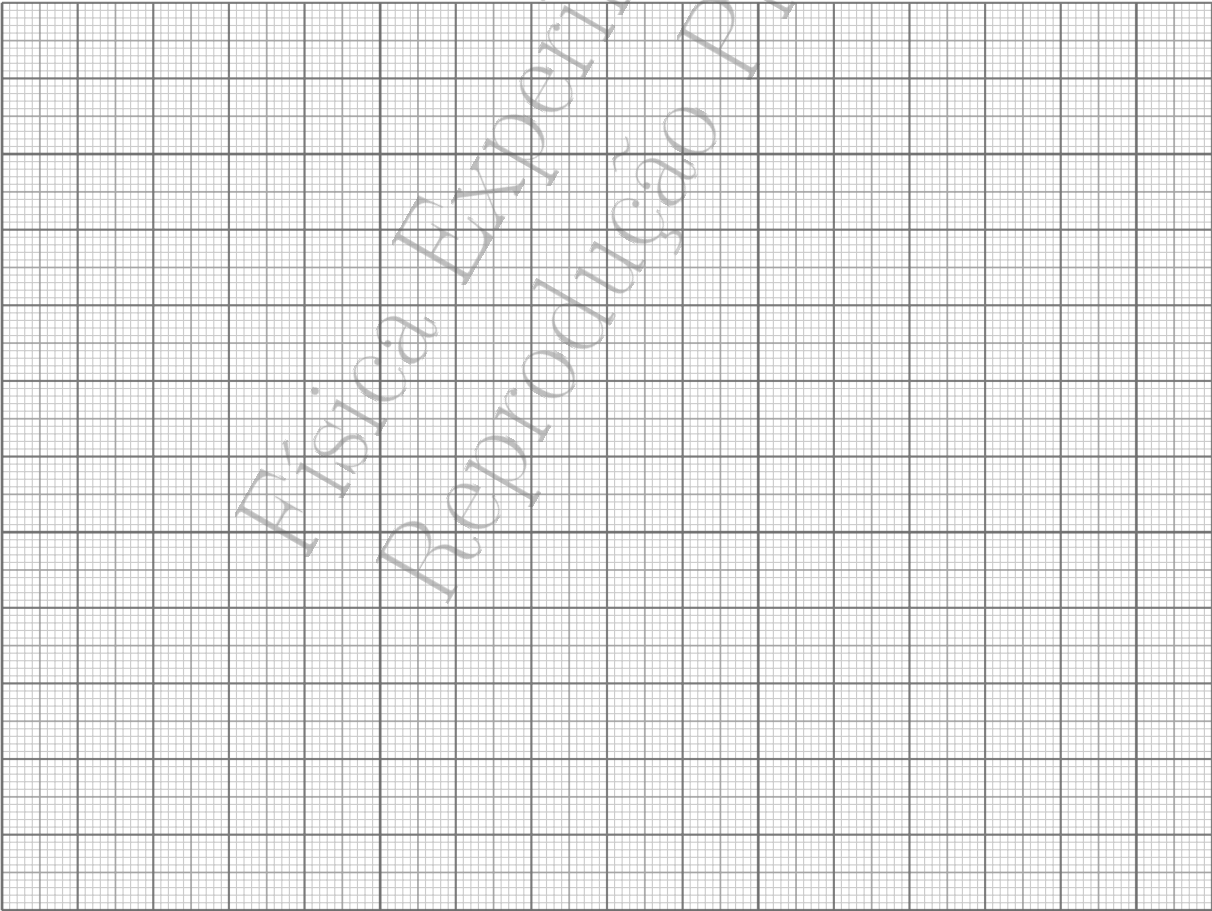
Experimento: \_\_\_\_\_

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____



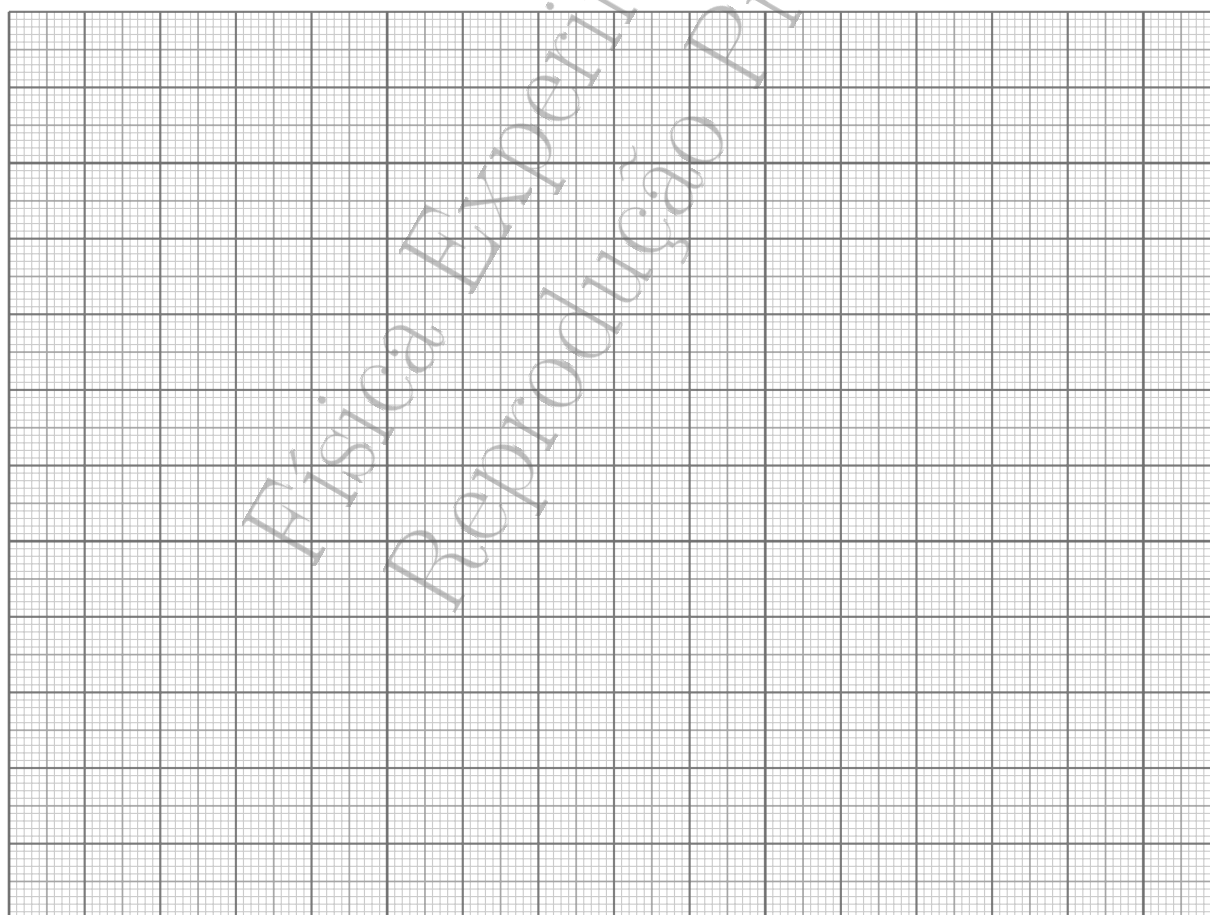
Experimento: \_\_\_\_\_

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____



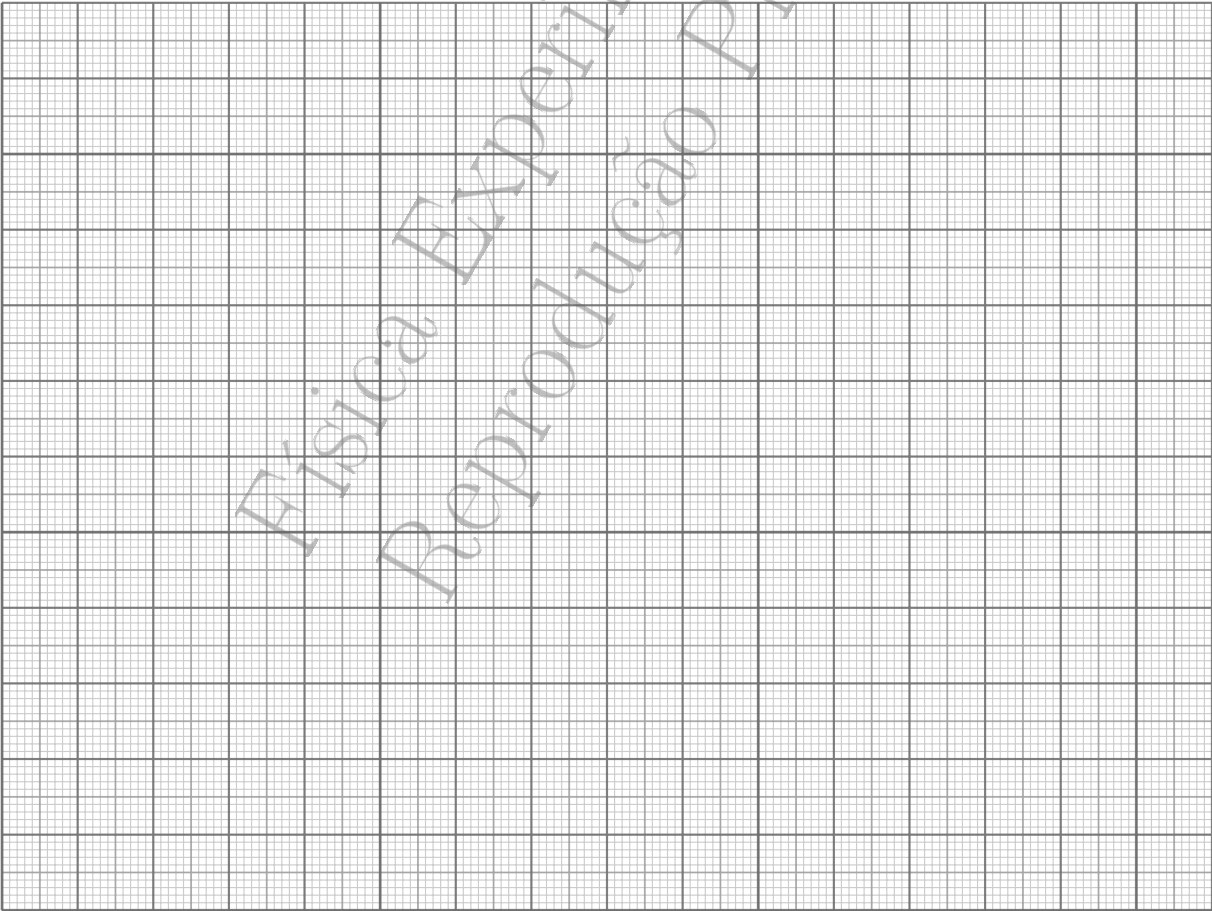
Experimento: \_\_\_\_\_

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____



Experimento: \_\_\_\_\_

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____



Experimento: \_\_\_\_\_

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____

