

# EXPERIÊNCIA 4

## RESISTÊNCIAS NÃO-LINEARES POR EFEITO DE TEMPERATURA

### I - OBJETIVO:

Mostrar o efeito da temperatura sobre um resistor metálico (lâmpada incandescente) e em um semicondutor termistor (NTC).

Levantar a curva característica da lâmpada e do termistor.

Interpretar a não-linearidade das características.

### II - PARTE TEÓRICA:

As noções sobre corrente elétrica se encontram no roteiro da experiência MEDIDAS DE RESISTÊNCIAS. Discutiremos aqui somente os processos da condução elétrica nos metais e semicondutores e a influência da temperatura sobre os mesmos.

#### CONDUÇÃO ELÉTRICA NOS METAIS:

Nos átomos de um metal os elétrons da última camada estão fracamente ligados aos seus núcleos. Por isso, estes elétrons podem se deslocar quase que livremente de um átomo a outro. A condução elétrica nos metais é devida a estes elétrons livres. O número de elétrons livres é aproximadamente constante e pode se verificar que quase não depende da temperatura. A uma dada temperatura, a nuvem eletrônica (elétrons livres) está submetida a um movimento térmico aleatório (movimento Browniano, velocidade média dos elétrons igual a zero). Quando se aplica uma diferença de potencial em um condutor aparece, além da agitação térmica aleatória, um movimento de deriva global dos elétrons livres, ou seja, uma corrente percorre o condutor. Essa corrente depende, essencialmente, do número de elétrons livres e da velocidade de deriva (a velocidade de deriva é definida como a velocidade média dos elétrons e, neste caso, é diferente de zero).

A agitação térmica dos elétrons aumenta com a temperatura. Isso traz uma consequência imediata. O crescimento do movimento aleatório cria dificuldade ao movimento de deriva global, o que implica numa velocidade de deriva menor. Assim, para uma ddp fixa, quando a temperatura cresce, a corrente elétrica diminui. Em outras palavras, podemos dizer que: **para um condutor metálico, a resistência elétrica é uma função crescente da temperatura.**

## CONDUÇÃO ELÉTRICA NOS SEMICONDUTORES:

Em um semicondutor puro os elétrons da última camada estão fortemente ligados aos seus núcleos. Assim, não existe, como nos condutores metálicos, uma nuvem eletrônica livre para participar do processo de condução elétrica. Para que um semicondutor passe a conduzir deve ser a ele cedida uma quantidade de energia suficiente para romper as ligações covalentes de alguns elétrons. Esta energia pode ser fornecida ao semicondutor através de calor: Assim, quando se aquece um semicondutor, elétrons antes fortemente ligados aos seus núcleos se liberam e podem participar da condução elétrica. O número de elétrons que são liberados por aquecimento é normalmente pequeno (1 em  $10^5$  elétrons) de maneira que não podemos falar em movimento aleatório dos mesmos.

Dessa maneira, quando se aplica uma diferença de potencial fixa a um semicondutor e se aquece o mesmo, elétrons são liberados para conduzir e assim ocorre um aumento na corrente elétrica. Dito de maneira diferente: **para um semicondutor a resistência elétrica é função decrescente da temperatura.**

## COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA:

Uma vez já vimos que a resistência  $R$  de um condutor qualquer varia com a temperatura  $T$ , podemos escrever:

$$R=f(T) \text{ ou } R=R(T) \quad (1)$$

Surge agora uma questão. Se o resistor sofre uma variação de temperatura, de quando ele muda a sua resistência? Ou melhor, qual o coeficiente de temperatura do resistor?

Vamos fazer esse estudo desenvolvendo  $R(T)$  em uma série de Taylor (Anexo) ao redor da temperatura arbitrária  $T_0$ , e limitando a expansão apenas ao primeiro termo, lembrando que essa aproximação só é válida para valores próximos de  $T_0$ .

$$R(T) = R(T_0) + \left[ \frac{dR}{dT} \right]_{T_0} (T - T_0) \quad (2)$$

ou,

$$R(T) = R(T_0) \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (3)$$

onde:

$$\alpha = \frac{1}{R(T_0)} \cdot \left[ \frac{dR}{dT} \right]_{T_0} \quad (4)$$

sendo  $\alpha$  chamado de coeficiente de temperatura do resistor.

Se o condutor é um metal,  $\alpha$  é positivo pois  $R$  aumenta com a temperatura. No caso dos semicondutores e do carbono,  $\alpha$  é negativo pois  $R$  diminui com a temperatura.

### III - TEORIA DA MEDIDA:

#### *Curva Característica de um Elemento Resistivo Ôhmico*

O comportamento elétrico de um elemento de circuito pode ser representado pela equação de estado que liga a ddp, à qual é submetido o elemento, à corrente  $I$  que o atravessa:  $V(I)$  ou  $I(V)$ . Este comportamento pode ser também representado pela curva  $V(I)$  ou pela curva  $I(V)$ , que se chama **curva característica do elemento**. Um elemento ôhmico, figura 1, apresenta uma relação linear simples entre  $V$  e  $I$ .

$$V = R \cdot I \quad (5)$$

onde  $R$  é uma constante (a resistência); em consequência, a característica é uma reta passando pela origem, contida nos quadrantes 1 e 3.

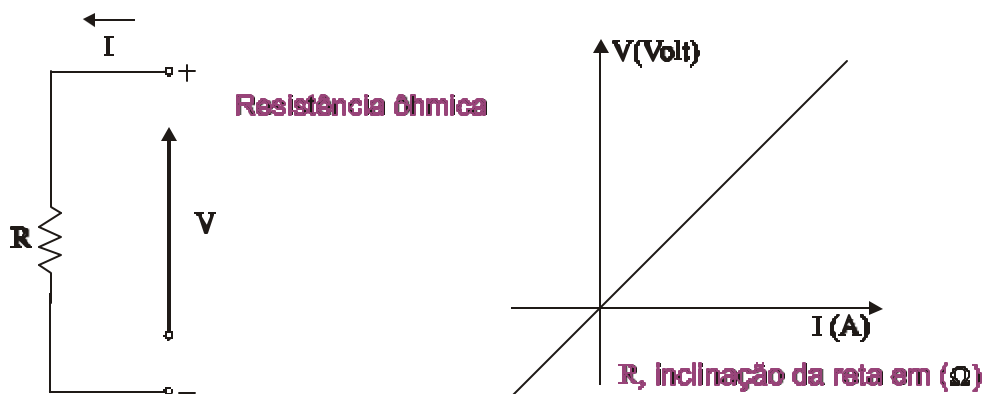


Fig. 1

#### **Dipolos**

Em geral, um elemento de circuito (resistor, baterias, etc.), que possua dois terminais é chamado dipolo. Na figura 2 representamos um dipolo como sendo uma **caixa preta** com dois terminais de ligação. Ele foi extraído, pela imaginação, do circuito elétrico ao qual pertencia, e por onde circulava uma corrente  $I$ .

Do mesmo modo que se convencionam valores de  $x$  positivo quando  $x$  está à direita da origem no eixo real, convencionam-se que a corrente  $I$ , que atravessa um dipolo, é positiva, do seguinte modo: Para uma dada diferença de

potencial nos extremos do dipolo orienta-se uma seta do lado negativo para o lado positivo, figura 2.

Se por exemplo,  $V_a > V_b$  temos:

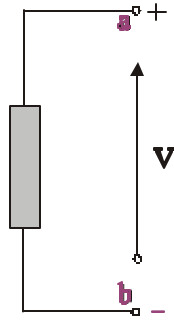


Fig. 2

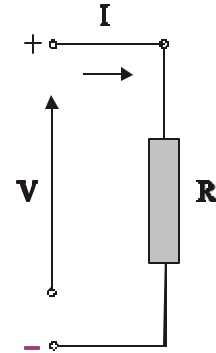


Fig. 3

$V = V_a - V_b$ , é assim considerado positivo e a corrente  $I$  é também considerada positiva (valor numérico positivo), quando está entrando pelo terminal positivo, figura 3.

Se invertermos  $V$  inverteremos também  $I$ . Sempre  $V$  e  $I$  tem mesmo sinal.

Sendo o dipolo uma bateria, figura 4, que fornece energia, a um resistor, por exemplo, teremos a corrente saindo pelo terminal positivo. Portanto, pela nossa convenção, o valor de  $I$  será negativo.



Fig. 4

Conectando a bateria ao resistor teremos:

$$V = \varepsilon \quad I = I'$$

mas,

$$V = R \cdot I \quad \therefore I' = \frac{V}{R} \quad (6)$$

então:

$$I' = \frac{\varepsilon}{R} \quad \text{e} \quad I = -\frac{\varepsilon}{R} \quad (7)$$

Por exemplo:

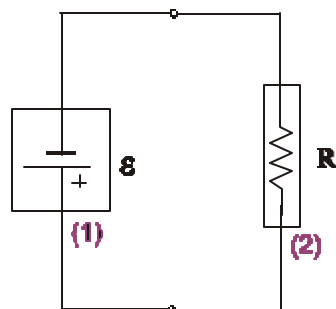
Se  $\varepsilon = 10 \text{ V}$  e  $R = 100 \Omega$ , teremos,

$$I' = \frac{10 \text{ V}}{100 \Omega} = 0,10 \text{ A} \quad \text{e} \quad I = -0,10 \text{ A}$$

Como assumimos  $I$  positivo entrando na bateria pelo lado positivo e encontramos  $I$  com um valor negativo, podemos concluir que a corrente  $I$  está saindo e não entrando. Este é o significado do sinal negativo.

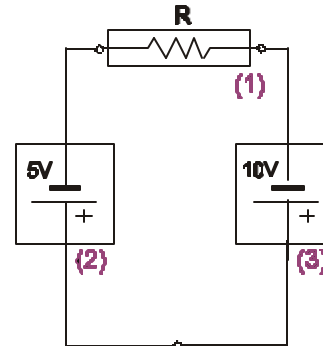
### ***Dipolos Ativos, Dipolos Passivos***

Nos circuitos elétricos de corrente contínua, um dipolo é ativo se ele fornece energia ao resto do circuito onde está inserido. Um dipolo é chamado passivo quando recebe energia do resto do circuito. Exemplo nas figuras 5 e 6.



- (1) dipolo ativo  
(2) dipolo passivo

Fig. 5



- (1) dipolo passivo  
(2) dipolo passivo (por que?)  
(3) dipolo ativo

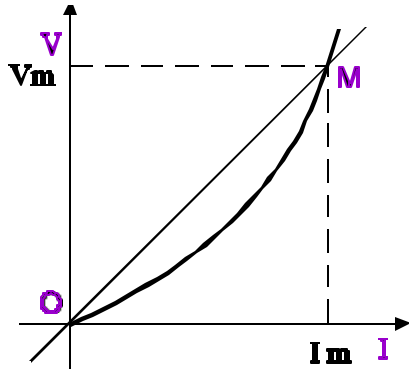
Fig. 6

### ***Dipolos não-Lineares***

A curva característica de um elemento resistivo não-linear não é mais obviamente uma reta. Podemos definir para cada ponto  $M$  da característica, uma **resistência estática** e uma **resistência diferencial** (ou resistência dinâmica), como se observa nas figuras 7 e 8.

**NOTE BEM:**

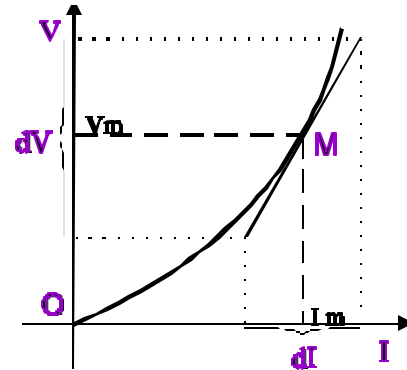
Em geral, a curva característica se repete idêntica, por simetria em relação ao ponto 0, no 3º quadrante. Porém, existem em circuitos, dipolos chamados não-recíprocos, que não apresentam esta propriedade: um bom exemplo é o diodo, figuras 9 e 10, cuja resistência estática no 1º quadrante é muito inferior à resistência no 3º quadrante (cuidado com a mudança de escala entre  $(V, I) > 0$  e  $(V, I) < 0$ , figura 10).



$$R_e = \frac{V_m}{I_m}, \text{ em Ohm}$$

$R_e = \text{inclinação da corda OM}$

Fig. 7



$$R_d = \frac{dV}{dI}, \text{ em Ohm}$$

$R_d = \text{inclinação da tangente}$

Fig. 8

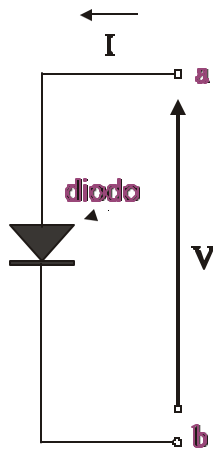


Fig. 9

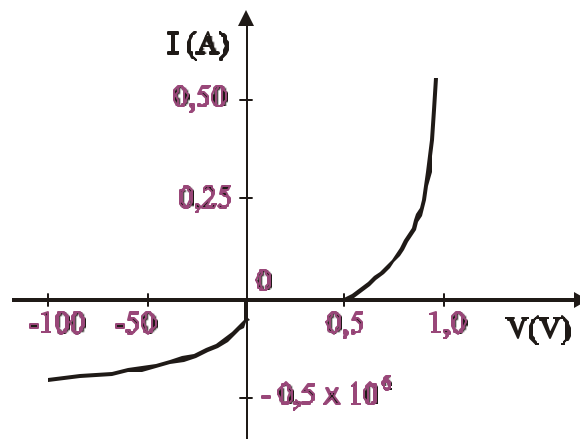


Fig. 10

**Levantamento de uma Curva Característica**

Para levantarmos a curva característica de um elemento temos que inseri-lo dentro de um circuito onde possamos fazer variar a corrente  $I$  que o atravessa e medir a ddp para cada valor de  $I$ , figura 11.

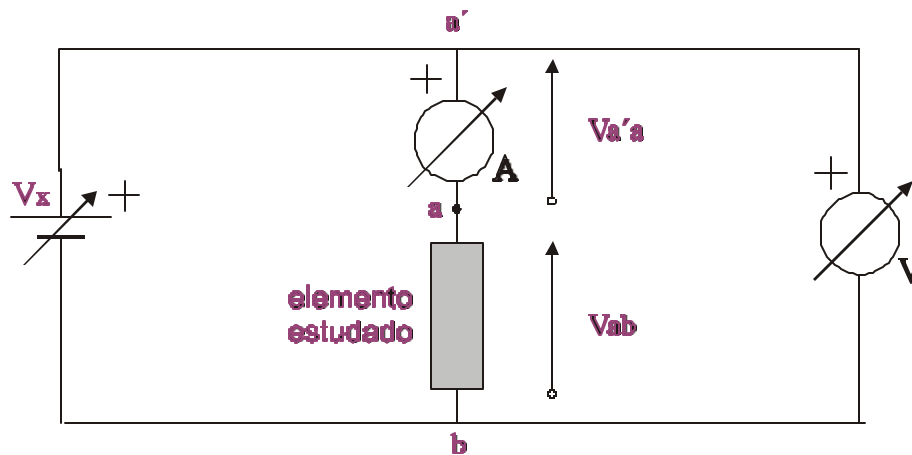


Fig. 11

Observe que nesta montagem, a ddp medida pelo voltímetro é:

$$V_{a'b} = V_{a'} - V_b \quad (8)$$

e não a ddp  $V = V_{ab}$  que aparece entre os terminais do elemento a ser estudado. Temos a relação:

$$V_{a'b} = R_a \cdot I + V_{ab} \quad (9)$$

onde  $R_a$  é a resistência interna do amperímetro. Uma vez conhecida a resistência interna do amperímetro, podemos calcular a correção sobre o valor medido  $V_{a'b}$ , para conseguir o valor  $V_{ab}$  no elemento:

$$V_{ab} = V_{a'b} - R_a \cdot I$$

Nesse experimento você terá que levantar a curva característica de uma lâmpada incandescente e de um termistor. Esses dois elementos são dipolos recíprocos, passivos, não-lineares.

#### IV - PARTE EXPERIMENTAL:

##### LISTA DE MATERIAL:

- fonte de tensão
- medidor multi-escala usado como voltímetro
- medidor multi-escala usado como amperímetro
- reostato

- termistor - (NTC)
- lâmpada comum - (piloto)
- placa de ligação
- chave liga - desliga
- fios

### **LÂMPADA:**

O efeito do acréscimo da resistência de um fio metálico com a temperatura é aproveitado em numerosos dispositivos, como termômetro de fio de platina ou lâmpada incandescente comum.

O termômetro de fio de platina é constituído por um finíssimo fio de platina situado dentro de tubo de quartzo selado. A medida da resistência do fio determina a temperatura. É um dispositivo de alta precisão e altíssima estabilidade, isento de histerese, mas sendo o coeficiente térmico da resistividade do metal pequeno, a sensibilidade é baixa. Além disso, o custo desse equipamento é elevado. Ele serve sobretudo em dispositivos de estabilização de temperatura.

A lâmpada que estudaremos é constituída por um filamento de uma liga de tungstênio, em forma de mola, para obter a rigidez, estabilidade mecânica e comprimento suficiente. O filamento é colocado numa ampola de vidro contendo um gás inerte à baixa pressão (Argônio ou Kriptônio).

### **TERMISTOR:**

Um termistor NTC (Negative Temperature Coeficiente - coeficiente de temperatura negativo) é constituído por um disco de semicondutor. Um contato elétrico em cada face do disco permite ligar um fio de conexão (terminal). Já sabemos que um aumento da temperatura do semicondutor tem como consequência uma diminuição da resistência. Esta variação de temperatura pode ser devida ao meio ambiente ou ao auto-aquecimento do termistor por efeito Joule.

Os termistores apresentam grande sensibilidade em função da temperatura e por isso servem como elementos termosensíveis em:

- termômetros clínicos ou industriais (água e óleo de motor de carro, etc.);
- indicadores de nível em tanques industriais (por variação de dissipação Joule em contato com o líquido contido no tanque);
- anemômetros que medem a velocidade do vento por variação da dissipação Joule;
- medidores de vácuo baseado no mesmo princípio;
- medidores de potência de uma onda eletromagnética na faixa de micro ondas e infravermelho; os termistores usados para este fim têm a dimensão da cabeça de um alfinete;
- alarmes de incêndio ou de superaquecimento.



### *i) Vantagens*

De baixo custo, alta sensibilidade, volume reduzido e boa rigidez mecânica, eles permitem medir várias grandezas físicas, fornecendo a informação na forma de grandeza elétrica, fácil para teleprocessar.

### *ii) Inconvenientes*

Devido ao fato de serem sensíveis à variação ambiente, é preciso, em alguns casos, uma compensação na temperatura. Apesar de sua alta sensibilidade, eles possuem instabilidade, deriva no envelhecimento e histerese.

### MEDIDAS:

### AVISOS GERAIS.

- Os aparelhos de medida são frágeis. Quando armar o circuito de medida, ligue por último a chave  $k$ , depois de ter encostado o cursor do reostato no ponto  $c$  (mínimo), veja figura 12.

- Cuidado com a polaridade das ligações dos aparelhos de medida. Em caso de dúvida, chame o professor.

### *IV.1 - Resistência Interna $R_a$ do Miliamperímetro*

☞ Arme o circuito como mostrado na figura 12.

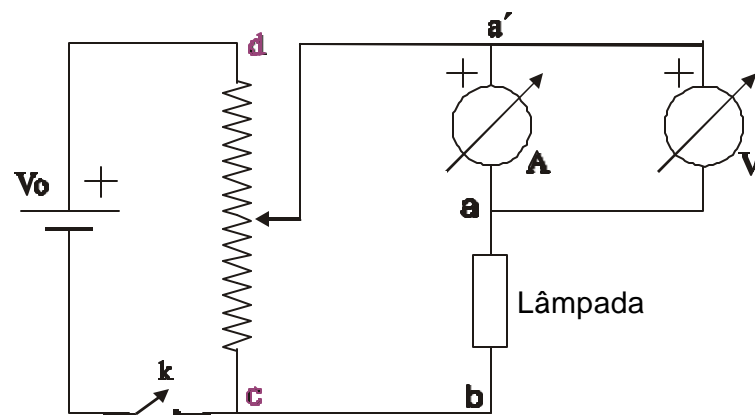



Fig. 12

### OBSERVAÇÃO:

O reostato e a fonte de alimentação são montados em potenciômetro. Esta montagem permite ajustar o valor da ddp sobre o circuito

(isto é, permite variar a corrente no elemento em estudo). No circuito da figura 12 é fácil ver que, quando o cursor do reostato está na posição c (mínima), a diferença de potencial  $V_{a'c}$  é igual a zero e, quando o cursor do reostato está na posição d (máxima) a diferença de potencial  $V_{a'c}$  é a própria tensão  $V_0$  fornecida pela fonte.


 Anote os desvios avaliados dos medidores para as escalas utilizadas.

 Meça no voltímetro a ddp para:

$I = 2,5 \text{ mA}$ , no calibre “2,5 mA” do multiteste


$I = 25 \text{ mA}$ , no calibre “25 mA”

$I = 250 \text{ mA}$ , no calibre “250 mA”

 Calcule o valor de  $R_a$  em cada calibre. Com efeito, você terá que mudar a escala do miliamperímetro no decorrer do experimento (veja a experiência “MEDIDA DE CORRENTE E DIFERENÇA DE POTENCIAL”).

#### IV.2 - Característica $V(I)$ da Lâmpada

Vamos agora, levantar a curva característica de uma lâmpada de filamento.

 Monte o circuito da figura 13. Observe que este circuito pode ser obtido daquele mostrado na figura 12, simplesmente mudando-se a ligação do voltímetro do ponto a para o ponto c.

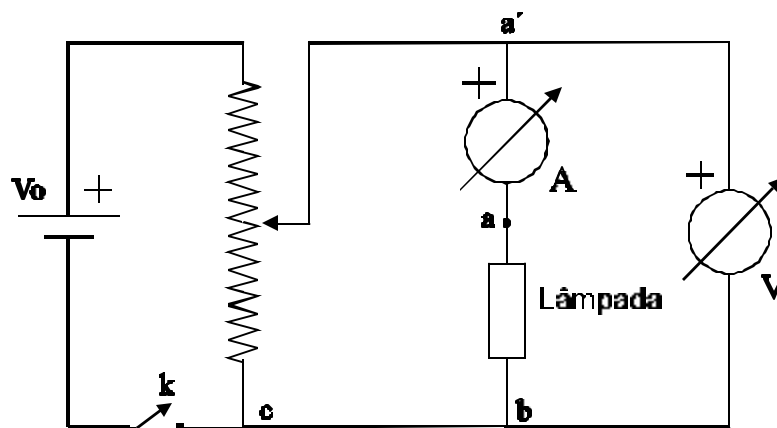




Fig. 13


 A seguir, usando o amperímetro apenas no calibre de 250 mA e o voltímetro na escala de maior sensibilidade (menor escala do medidor),


compatível com a medida. Construa uma tabela de  $V$  versus  $I$  para diversos valores de corrente até o máximo de 250 mA. Procure escolher os intervalos entre medidas de maneira inteligente.

 Anote com cuidado o valor da corrente onde aparece o começo do brilho da lâmpada.

#### ***IV.3 - Característica $V(I)$ do Termistor***


 No circuito da figura 13, substitua a lâmpada pelo termistor.

 Coloque o amperímetro e o voltímetro nas escalas de maior sensibilidade (menor escala dos medidores).

 Levante a curva característica do termistor, utilizando sempre que possível, a escala de maior sensibilidade nos medidores. Para cada medida de tensão e corrente espere o termistor se estabilizar térmicamente.

**Nunca ultrapasse 70 mA pois pode danificar de maneira irrecuperável o termistor.**

#### ***IV.4 - Influência da Temperatura***

 Utilizando o amperímetro e o voltímetro nas escalas de maior sensibilidade, ajuste a posição do cursor do reostato de maneira a obter no amperímetro uma corrente de aproximadamente 1,5 mA. Aqueça o termistor usando uma fonte de calor (isto pode ser feito segurando-se com os dedos o termistor). Observe o que acontece com a corrente e a tensão indicadas no amperímetro e voltímetro. Nesta condição, você cedeu ou retirou energia térmica do sistema? Agora, variando novamente a posição do cursor do reostato, ajuste uma corrente de aproximadamente 50 mA no amperímetro. (Não esqueça de utilizar os medidores com o fundo de escala compatível com as medidas). Segure com os dedos o termistor. Observe o que acontece com a corrente e a tensão nesta situação. Você cedeu ou retirou energia térmica do sistema? Anote todos os resultados observados.

### **V - RELATÓRIO:**

**Apresentamos a seguir, alguns itens que deve obrigatoriamente constar do seu relatório. Lembramos mais uma vez que esta lista não é limitativa.**

#### **NOTA:**

**Sempre, ao traçar um gráfico deve-se procurar explorar ao máximo o papel utilizado. Escolha convenientemente as escalas.**

- Calcule o valor de  $R_a$  com o seu respectivo desvio, isto é ( $R_a \pm \Delta R_a$ ).

- Para cada calibre, mostre que a queda de tensão sobre ele deve permanecer a mesma.

- Corrija os dados encontrados no item IV.2, em função do método de medida. Reveja o experimento "MEDIDAS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA".

- Trace, em um papel milimetrado, a curva característica (V versus I) da lâmpada, levando em consideração a correção devida a  $R_a$ . Observe o comportamento da curva, especialmente após o início do brilho da lâmpada.

- Trace, a partir do gráfico (V versus I) da lâmpada, no mesmo papel milimetrado, o gráfico da resistência estática em função da corrente I ( $R_e$  versus I). **Use os pontos da característica traçada e não os valores medidos. Justifique este procedimento.**

- Corrija os dados encontrados no item IV.3, em função do método de medida.

- Trace em um papel milimetrado, a curva característica (V versus I) do termistor não esquecendo de utilizar os dados corrigidos da tensão.

- Trace, a partir do gráfico (V versus I) do termistor, no mesmo papel milimetrado, o gráfico da resistência estática em função da corrente I ( $R_e$  versus I). **Use novamente a característica traçada e não os valores medidos.**

- Quais são as resistências estáticas da lâmpada e do termistor para  $I = 0$  mA (Resistência própria do elemento)? Qual o seu significado físico?

- Determine, a partir da característica (V versus I) a resistência dinâmica do termistor para os pontos  $I = 10$  mA,  $I = 25$  mA e  $I = 50$  mA. Compare com a resistência estática para estes mesmos pontos. Como explicar esta diferença?

- Analise, a partir do gráfico (V versus I) como o aumento da temperatura no filamento da lâmpada afeta a sua resistência?

- Qual o comportamento da resistência estática, em função da temperatura, para o filamento da lâmpada e para o termistor.

- Explique, detalhadamente o que acontece quando você aquece e quando você resfria o termistor?

- Qual a máxima potência dissipada nos elementos durante o levantamento da curva característica da lâmpada e do termistor?

## VI - LEITURA RECOMENDADA:

**WESTPHAL**, Wilhelm H. Prácticas de Física, 2.ed. Barcelona: Editorial Labor, S.A, 1965. v.3, p. 187 - 194, 206 - 211.