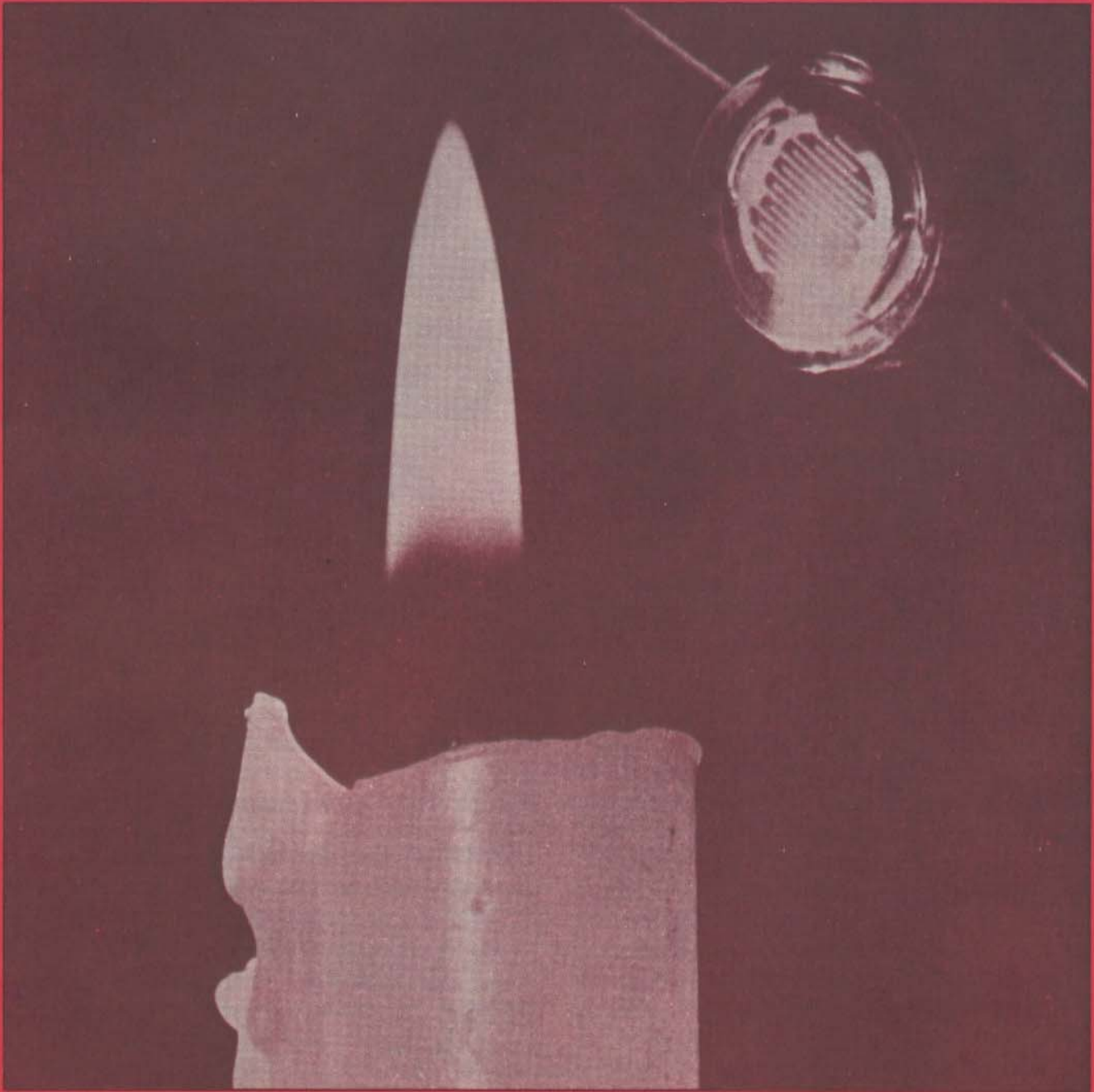


PROJETO
DE ENSINO
DE FÍSICA
IFUSP — Instituto de Física da Universidade de São Paulo
MEC/FENAME/PREMEN

eletricidade **7**

Condução nos sólidos



MEC/FENAME/PREMEN

PEF — PROJETO DE ENSINO DE FÍSICA, constituído de quatro conjuntos destinados ao Ensino de 2.º Grau, foi planejado e elaborado pela equipe técnica do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), mediante convênios com a FENAME e o PREMEN.

Coordenação

Ernst Wolfgang Hamburger
Giorgio Moscati

Mecânica

Antonia Rodrigues
Antonio Geraldo Violin
Diomar da Rocha Santos Bittencourt
Hideya Nakano
Luiz Muryllo Mantovani
Paulo Alves de Lima
Plínio Ugo Meneghini dos Santos

Eletricidade

Eliseu Gabriel de Pieri
José de Pinho Alves Filho
Judite Fernandes de Almeida

Eletromagnetismo

Jesuina Lopes de Almeida Pacca
João Evangelista Steiner

Programação Visual

Carlos Egidio Alonso
Ettore Michele di San Fili Bottini

Fotografias e Reproduções

José Augusto Machado Calil
Washington Mazzola Racy

Secretaria e Datilografia

Carlos Eduardo Franco de Siqueira
Janete Vieira Garcia Novo

Linguagem

Claudio Renato Weber Abramo
Maria Nair Moreira Rebello

Construção de Protótipos

José Ferreira
Voanerges do Espírito Santo Brites

Conjunto Experimental

Plínio Ugo Meneghini dos Santos

Colaboram o pessoal da Secretaria, Oficina Gráfica, Administração, Oficina Mecânica e Oficina Eletrônica do IFUSP.

IFUSP: Caixa Postal 20 516, São Paulo — SP.

CAPA

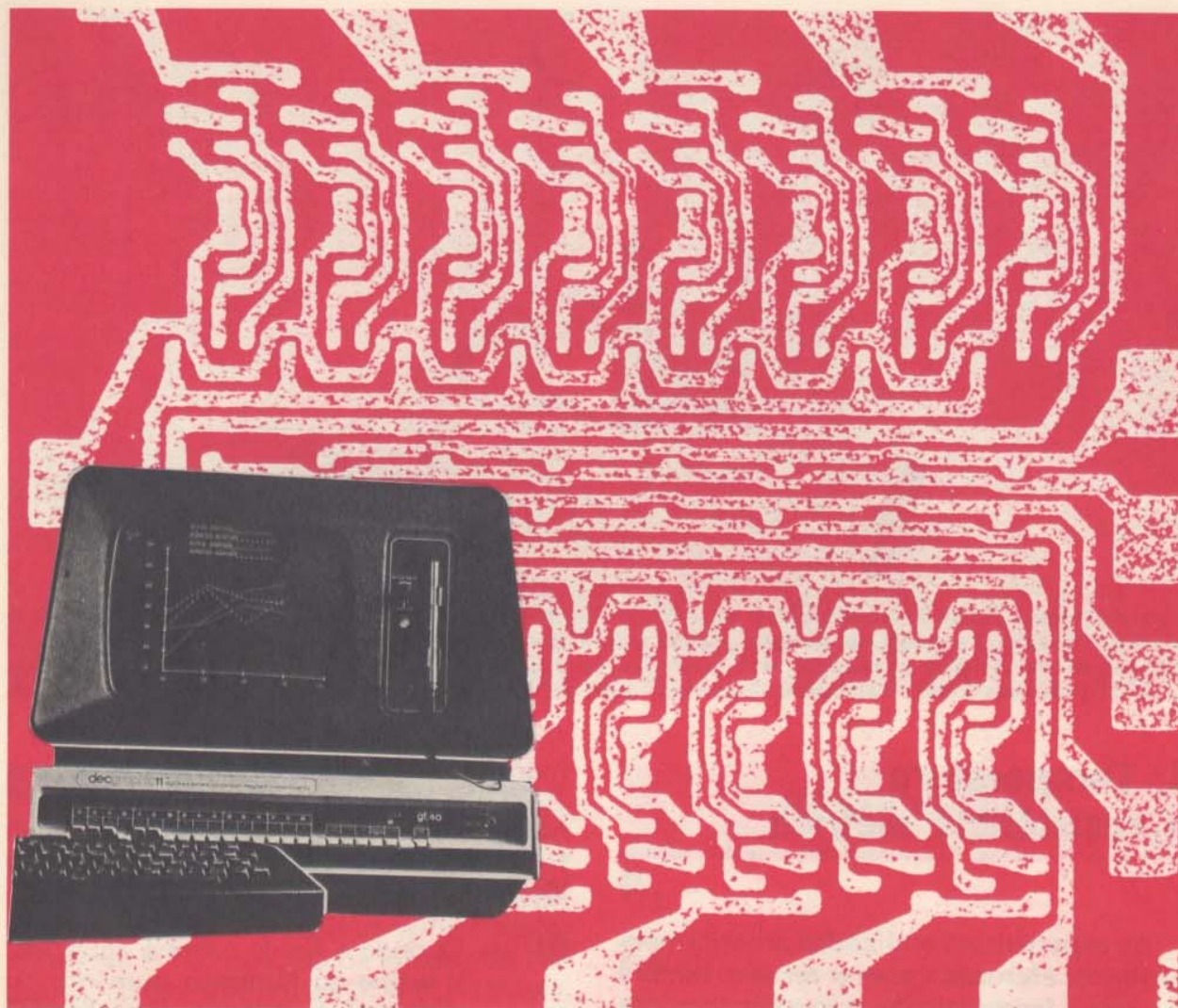
A resistência elétrica de um material não depende somente da tensão aplicada. Existem materiais cujas resistências

variam ou dependem das condições ambientais em que estão envolvidos; por exemplo, temperatura, luminosidade e sentido da corrente. Na capa temos um resistor cuja resistência depende da luz incidente. A maior ou menor quantidade de luz faz sua resistência elétrica diminuir ou aumentar. Tais resistores são denominados fotocondutores.

SUMÁRIO

CAPITULO 7 — Condução nos sólidos

1. Temperatura e resistência elétrica	7—2
2. Resistor NTC	7—3
3. Resistência e temperatura: análise microscópica	7—4
4. Resistência em função da temperatura	7—6
5. Coeficiente de temperatura	7—10
6. Resistência e polaridade	7—12
7. Resistência e iluminação	7—14
8. Exercícios de aplicação	7—16
Leitura Suplementar	
Resistores NTC	7—21



Condução nos sólidos

Até aqui, não levamos em conta, ainda, alguns fatores que podem influir no valor da resistência elétrica.

Será que a resistência elétrica de um objeto feito de um certo material varia com a temperatura? E com a iluminação? Será que a resistência elétrica permanece a mesma se a corrente muda de sentido?

Você estudará isso neste capítulo. Daremos atenção especial aos resistores feitos com materiais semicondutores. Os semicondutores são hoje muito importantes na indústria. Os transistores e díodos utiliza-

dos em rádios, televisores, amplificadores, circuitos de controle de máquinas industriais, etc. são fabricados de materiais semicondutores, tais como silício (Si; $Z = 14$) e germânio (Ge; $Z = 32$). Em computadores eletrônicos utilizam-se circuitos integrados, minúsculas peças de material semicondutor, que substituem sozinho todo um complexo circuito de vários componentes. Circuitos integrados são utilizados, também, nos pequenos computadores de bolso, em circuitos de radar e controle para aviões, navios e espaçonaves.

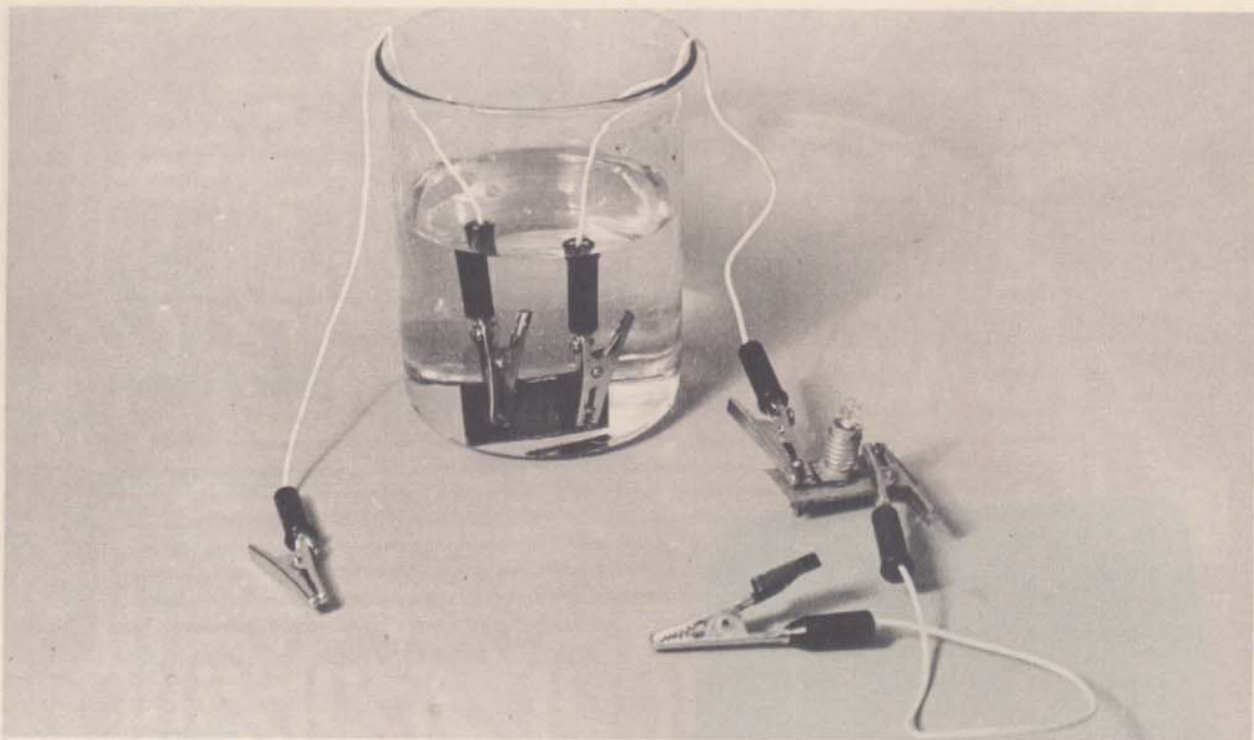


figura 1

1. Temperatura e resistência elétrica

As experiências realizadas anteriormente foram efetuadas com o resistor sempre a uma temperatura aproximadamente constante (temperatura do ambiente em que foram feitas as medidas).

Agora você vai fazer experiências, inicialmente qualitativas, para estudar a variação de resistores ôhmicos e não-ôhmicos em função da temperatura.

O resistor ôhmico será de fio de cobre com cerca de 25Ω ; você pode utilizar 15 metros de fio de cobre n.º 37, esmaltado. Além do fio de cobre, precisará de uma lâmpada de $6\text{ V} - 50\text{ mA}$, quatro pilhas de $1,5\text{ V}$, um recipiente com água para mergulhar o rolo de fio e um dispositivo para aquecer o resistor (pode ser outro recipiente, com água quente ou uma vela acesa colocada uns 15 cm abaixo do fio).

Ligue o resistor de fio de cobre em série com a lâmpada e as quatro pilhas (figura 1) e observe o brilho da lâmpada. A seguir,

7-2

mantendo a ligação, aqueça (até uns 100°C) e observe o brilho da lâmpada. Finalmente, mergulhe o resistor na água fria, de preferência gelada, e observe a lâmpada.

- Q1** — Quando o fio de cobre é aquecido, o brilho da lâmpada aumenta ou diminui? E quando é resfriado? Note que a lâmpada está sendo utilizada como indicador de intensidade de corrente elétrica, como se fosse um amperímetro.
- Q2** — Quando o fio de cobre é mergulhado na água fria, a corrente elétrica que atravessa o filamento da lâmpada aumenta ou diminui?
- Q3** — O que você conclui desta experiência sobre a variação da resistência do fio de cobre com a temperatura?

Será que, para todos os materiais, o valor da resistência elétrica diminui, quando diminuirmos a sua temperatura, como ocorre com o cobre? Você poderá responder a esta questão, estudando o comportamento do termistor NTC.

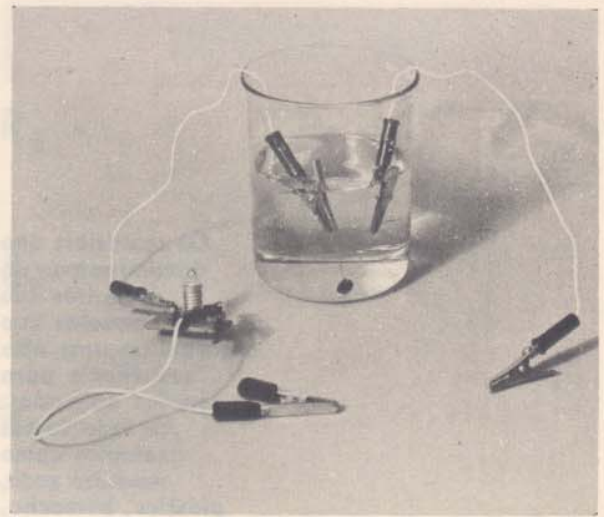
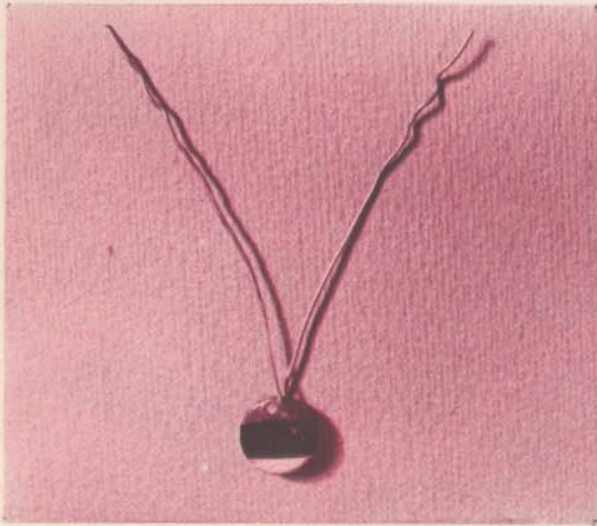


figura 2

O resistor NTC tem resistência que varia muito em função da temperatura. Quando aumentamos a temperatura, sua resistência diminui. Apresenta várias aplicações práticas, desde o termômetro clínico que substituiu o termômetro clínico tradicional de mercúrio, com grandes vantagens, até instalações de alarmas de segurança. No fim do capítulo há uma "Leitura Suplementar" sobre resistores NTC.

2. Resistor NTC

Como exemplo de resistor não-ôhmico, você utilizará um dispositivo semicondutor chamado NTC, que são as iniciais de Negative Temperature Coefficient. Trata-se, como veremos, de um resistor com coeficiente de temperatura negativa.

Monte um circuito semelhante ao que você montou na seção anterior, colocando, em vez do fio de cobre, um termistor NTC (figura 2).

Aqueça o NTC, observando o brilho da lâmpada e, em seguida, mergulhe-o na água fria.

Q4 — O comportamento do NTC, nesta experiência, é o mesmo do fio de cobre? Que modificação você observou no brilho da lâmpada, quando esfriou o NTC?

Q5 — O valor da resistência do NTC aumenta ou diminui com o esfriamento?

A variação da resistência ou da resistividade com a temperatura é uma caracte-

RESPOSTAS

R_1 -

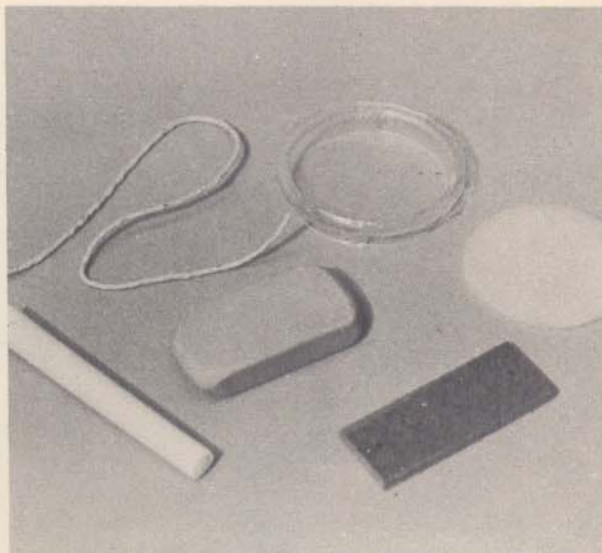
R_2 -

R_3 -

R_4 -

R_5 -

Os materiais que denominamos de isolantes são aqueles que apresentam uma alta resistência para tensões aplicadas. Ao lado temos exemplos como madeira seca, plástico, borracha, barbante seco, giz, etc.



rística de cada material, assim como a resistividade. Os metais em geral têm **baixa resistividade** e **essa resistividade** aumenta com a temperatura.

Os **não-metais** são, em geral, isolantes. É o caso da parafina, do vidro, da madeira, etc.

Q6 — Dê exemplos de outros não-metais isolantes.

Há ainda os **semimetais**, como o silício e o germânio, que, nas reações químicas, apresentam propriedades intermediárias entre os metais e os não-metais. A resistividade dos semimetais é intermediária entre a dos condutores e a dos isolantes. Por isso são chamados também de **semicondutores**. O resistor NTC é fabricado de material semicondutor. A **resistividade** de muitos semicondutores aumenta quando a temperatura diminui (embora existam semicondutores cuja resistência aumenta em altas temperaturas).

Q7 — O cobre se comporta como um condutor ou um semicondutor? E o termistor NTC?

Por que a diminuição de temperatura tem efeitos diferentes num condutor e num semicondutor? Na seção seguinte vamos procurar compreender isso, a partir da estrutura atômica dos materiais.

3. Resistência e temperatura: análise microscópica

Os átomos são formados de prótons, nêutrons e elétrons. Nos metais existem elétrons livres, isto é, elétrons provenientes da última camada que não pertencem a nenhum átomo em particular, movem-se livremente dentro do metal e podem passar de um átomo a outro. Quando é criado um campo elétrico no metal, são os elétrons livres que se deslocam e dão origem à corrente elétrica.

Os elétrons livres se movem entre os átomos do metal e se chocam com eles. Esses átomos não estão em repouso, mas possuem certo movimento de vibração em torno de uma posição de equilíbrio. Quando a temperatura aumenta, o movimento de vibração aumenta. A vibração é muito rápida, mais rápida do que o movimento dos elétrons sujeitos ao campo elétrico aplicado. Então, a probabilidade de um elétron colidir com um átomo do metal aumenta para vibrações maiores: é como se o átomo ocupasse um volume maior do que o seu volume em repouso (figura 3).

Vamos supor que, à temperatura ambiente, os elétrons sofrem certo número de choques com os átomos, num tempo t .

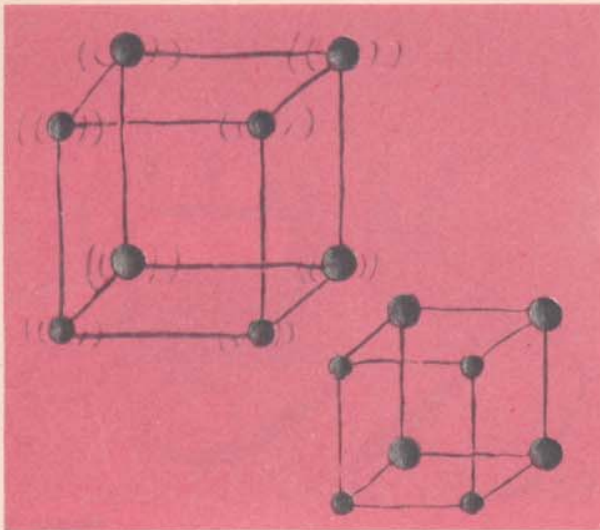


figura 3

Quando aquecemos o metal (no nosso caso, o fio de cobre), o número de choques nesse tempo t será maior. É por esse motivo que, ao aquecermos o fio de cobre, o valor de sua resistência aumenta e, em consequência, o brilho da lâmpada diminui (a corrente elétrica diminui).

Nos metais, em condições normais, o número de elétrons livres praticamente não varia com a temperatura. O cobre, por exemplo, tem um elétron livre para cada átomo do metal, em qualquer temperatura entre 100°C e 600°C .

Q8 — Uma vez que o número de elétrons livres praticamente não varia, qual a causa principal, responsável pelo aumento da resistência elétrica do metal, quando a temperatura aumenta?

A discussão acima não vale para semicondutores. Os semicondutores têm muito poucos elétrons livres. Por exemplo, o germânio puro, à temperatura ambiente, tem cerca de um elétron livre para cerca de 10^9 átomos. Com tão poucos elétrons livres, a resistividade deve ser alta; de fato é de $10^2 \Omega \cdot \text{m}$, cerca de 10^{10} vezes maior que a de um metal (o cobre, por exemplo).

Quando a temperatura de um semicondutor aumenta, ocorrem duas coisas: os poucos elétrons livres presentes colidem com mais frequência com os átomos do

RESPOSTAS

R₆ -

R₇ -

R₈ -

R₉ -

R₁₀ -

material, tendendo a fazer a resistividade aumentar. Por outro lado, o número de elétrons livres aumenta muito, porque as vibrações dos átomos semicondutores, sendo mais intensas, liberam os elétrons fracamente ligados ao átomo. Com esse aumento do número de elétrons livres, a resistividade diminui bastante. Essa diminuição é muito mais significativa do que o pequeno aumento causado pelo maior número de choques dos elétrons com os átomos. Observa-se, então, uma diminuição da resistividade, quando a temperatura do material semicondutor aumenta.

Q9 — Explique por que a resistividade de um NTC diminui quando a temperatura aumenta.

Q10 — Nesta seção, você realizou uma experiência qualitativa. Explique o que significa aqui a palavra "qualitativa".

- R1 — Diminui. Aumenta.
- R2 — Aumenta.
- R3 — A resistência do fio de cobre aumenta quando a temperatura aumenta, e diminui quando a temperatura diminui.
- R4 — Não. Acontece o contrário em relação ao fio de cobre. Quando o NTC é esfriado, a lâmpada ligada em série com ele brilha menos.
- R5 — Aumenta.
- R6 — Plástico, borracha, ebonite, papel seco, etc.
- R7 — O cobre se comporta como um condutor. O NTC se comporta como um semicondutor.
- R8 — O aumento do número de colisões dos elétrons livres com os átomos do metal.
- R9 — Veja, no texto, o parágrafo anterior a esta questão.
- R10 — Significa que não foram realizadas medidas, não foram obtidos valores numéricos. Foram feitas observações do brilho maior ou menor da lâmpada.

4. Resistência em função da temperatura

Você realizou experiências **qualitativas**, que mostram que a resistência elétrica varia com a temperatura. Agora você vai obter informações **quantitativas** sobre esta variação.

Para realizar as medidas, precisará de um recipiente com água que possa ser aquecida até ferver. Além disso, precisará de um termômetro que meça de 0°C a 100°C , de um ohmímetro e dos resistores de cobre e NTC. Consulte o seu professor; se não houver condições para realizar a experiência, siga, como último recurso, o texto, como se estivesse realizando a experiência e obtenha os dados necessários nas tabelas-respostas da página 7-8.

Meça, com o ohmímetro, a resistência do fio de cobre à temperatura ambiente.

Q11 — Que valor você encontrou? Qual é a temperatura ambiente? Escreva os dados na tabela 1.

7-6

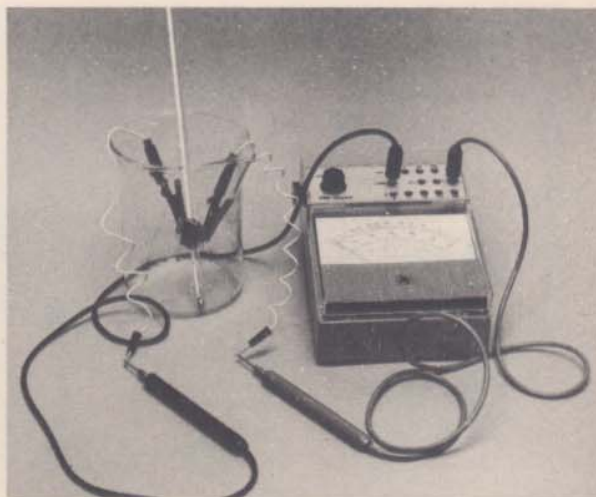


figura 4



figura 5

Coloque água fria (de preferência, gelada) em um recipiente e, dentro deste, coloque também o termômetro (figura 4). Mergulhe na água o fio de cobre e espere alguns minutos para o cobre esfriar até atingir temperatura igual à da água; agite um pouco a água. Meça os valores da temperatura da água e da resistência do cobre e escreva-os na tabela 1.

Agora você vai aquecer a água e medir a resistência para vários valores diferentes de temperatura, por exemplo, cinco valores diferentes.

Para aquecer a água, pode utilizar um ebulidor elétrico (figura 5) ou uma outra fonte de calor: chama de gás, espiriteira, etc. Aqueça um pouco a água até a temperatura atingir uns 30°C . Desligue o ebulidor (ou afaste a chama) e espere o cobre atingir a temperatura da água. Depois meça a temperatura e a resistência e escreva o resultado na tabela 1.

Repita esse procedimento para outras quatro temperaturas.

Faça com o NTC uma experiência semelhante, obtendo os valores da resistência

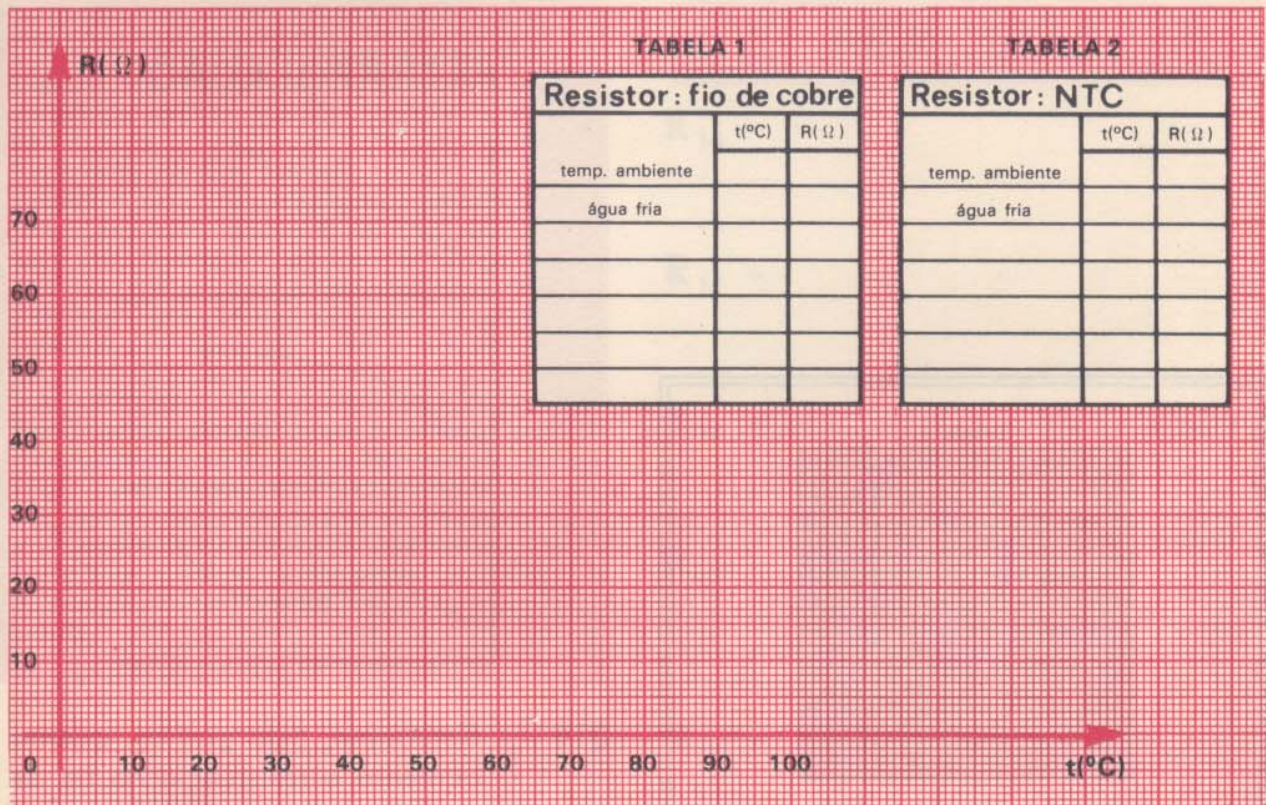


figura 6

tabela 1 tabela 2

para diferentes temperaturas. Coloque os resultados na tabela 2.

Q12 — Os resultados registrados nas tabelas 1 e 2 concordam com as conclusões que você obteve no começo do capítulo, observando o brilho da lâmpada? Por quê?

Com os dados obtidos para o resistor de fio de cobre e para o NTC (tabelas 1 e 2), faça os dois gráficos de $R \times T$ (resistência versus temperatura para cada resistor) na figura 6.

Q13 — Que tipos de gráfico você obteve para o cobre e para o NTC?

Pelos gráficos, você pode observar que a variação da resistência R com a temperatura T é **linear** para o fio de cobre e **não-linear** para o NTC. Além disso, a resistência do cobre aumenta com o aumento de temperatura, enquanto a resistência do NTC diminui quando a temperatura aumenta.

RESPOSTAS

R_{12} -

R_{13} -

EXTRAPOLAÇÃO

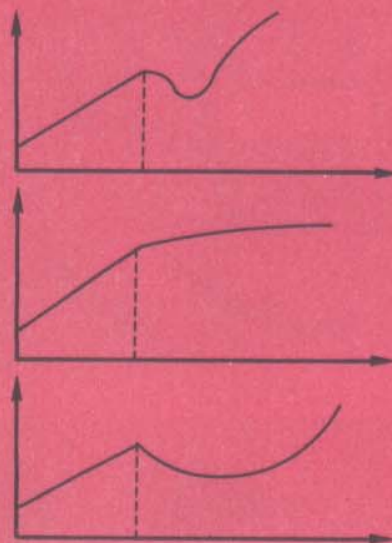


Tabela 1

RESISTOR: fio de cobre		
	t(°C)	R(Ω)
temp. ambiente	23	21
água fria	20	21
	32	22
	50	23
	65	25
	77	26
	82	28

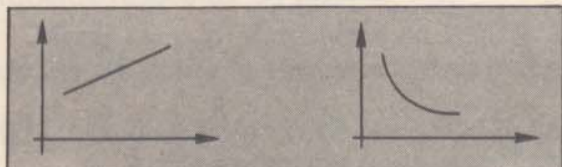
Tabela 2

RESISTOR: NTC		
	t(°C)	R(Ω)
temp. ambiente	23	54
água fria	20	60
	30	40
	40	30
	54	18
	67	12
	78	8

R11 — $R \cong 25\Omega$. Temperatura ambiente $\cong 23^\circ\text{C}$. O valor da resistência medida por você, entretanto, poderá diferir do nosso, devido ao material utilizado.

R12 — Sim. Ficou comprovado, pelas medidas (tabelas 1 e 2), que a resistência do fio de cobre aumenta com a temperatura, e a do NTC, diminui.

R13 — Para o fio de cobre, **linear**. Para o NTC, **não-linear**.



Q14 — Determine, pelo gráfico, quanto aumenta a resistência do fio de cobre para a variação de temperatura de 30°C a 40°C .

Q15 — Quanto diminui a resistência do NTC para a mesma variação de temperatura da questão anterior (30°C a 40°C)?

Q16 — Neste intervalo de temperatura (30°C a 40°C), em que porcentagem variou a resistência do fio de cobre? Qual a porcentagem de variação do NTC?

A representação gráfica nos dá boas informações a respeito da variação da resistência com a temperatura. Por exemplo, a partir do gráfico podemos obter outras informações além dos resultados obtidos experimentalmente. A partir da curva é fácil fazer interpolações, supondo que o comportamento do gráfico não varia dentro do intervalo de temperatura estudado.

Q17 — Determine, a partir do gráfico, a resistência elétrica do resistor de

Fora do intervalo de valores estudados é possível fazer extrapolações. Entretanto os resultados obtidos com este procedimento devem ser tratados com cuidado, pois novos fenômenos poderão ocorrer.

Para fazer uma extrapolação gráfica, é muito útil saber qual é a lei que rege o fenômeno estudado. No caso do cobre, o gráfico ($R \times T$) obtido por você deve ter sido uma reta para o intervalo de suas medidas, que foi de 20 a 90°C, aproximadamente. Por isso, somos levados a crer que, neste intervalo, é uma **função linear**. Experiências comprovam que a variação da resistência do cobre com a temperatura é linear no intervalo de 0°C a 500°C. Fora dos limites deste intervalo de temperatura, a dependência de R com T é **não-linear**.

Os três gráficos ao lado são possíveis formas de curvas fora dos limites da linearidade.

... fio de cobre estudado, à temperatura de 45°C e à temperatura de 75°C.

Q18 — Para obter a resistência do fio de cobre a uma temperatura determinada, dentro do intervalo estudado, é mais conveniente fazer a medida diretamente, ou obter resultado por interpolação no gráfico? Por quê?

Para temperaturas acima de 100°C ou abaixo de 0°C, você pode obter o valor da resistência, por extrapolação (linear?) do gráfico. Veja o quadro acima.

Q19 — Determine, a partir do gráfico da figura 6, a resistência do NTC à temperatura de 110°C.

Q20 — Determine o valor da resistência elétrica do resistor de fio de cobre a uma temperatura 30° acima da temperatura máxima que você mediu.

Q21 — Qual a resistência desse fio de cobre à temperatura de -272°C e a 9 000°C?

RESPOSTAS

R₁₄ -

R₁₅ -

R₁₆ -

R₁₇ -

R₁₈ -

R₁₉ -

R₂₀ -

R₂₁ -

R14 — Para o fio de cobre, a resistência **aumenta** cerca de 1Ω , quando a temperatura passa de 30°C para 40°C .

R15 — Para o NTC, a resistência **diminui** cerca de 10Ω , quando a temperatura passa de 30°C para 40°C .

R16 — A resistência do fio de cobre variou aproximadamente 4%. A do NTC, 20%.

R17 — Fio de cobre estudado:
a $45^\circ\text{C} \rightarrow R = 23\Omega$
a $75^\circ\text{C} \rightarrow R = 26\Omega$

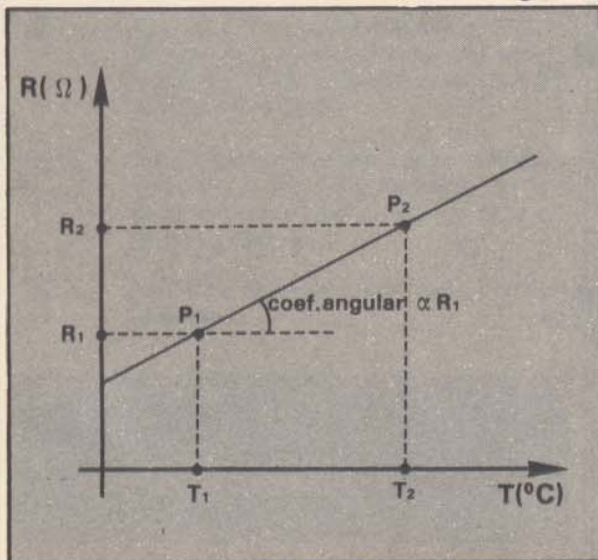
R18 — Por interpolação no gráfico, desde que o gráfico tenha sido construído a partir de muitas medidas. Uma medida isolada estará sempre sujeita a variações muito maiores do que a média de várias medidas. Uma reta que passa por muitos pontos medidos é como a média de muitas medidas: é mais precisa do que cada medida individual.

R19 — Fazendo a extrapolação (figura 6), obtemos, aproximadamente, para $T = 110^\circ\text{C}$, $R \cong 4\Omega$.

R20 — Se, por exemplo, o máximo valor estudado de temperatura 96°C , vamos determinar a resistência do resistor de fio de cobre à temperatura de 126°C . Fazendo a extrapolação, figura 6, obtivemos para $T = 126^\circ\text{C} \rightarrow R \cong 32\Omega$.

R21 — Não temos elementos para determinar. A -272°C , próximo do zero absoluto, a resistência tenderá a zero, se o material for supercondutor; caso contrário, apresentará um valor muito pequeno. A $9\,000^\circ\text{C}$, o cobre já fundiu (a temperatura de fusão do cobre é $1\,084^\circ\text{C}$).

figura 8



7-10

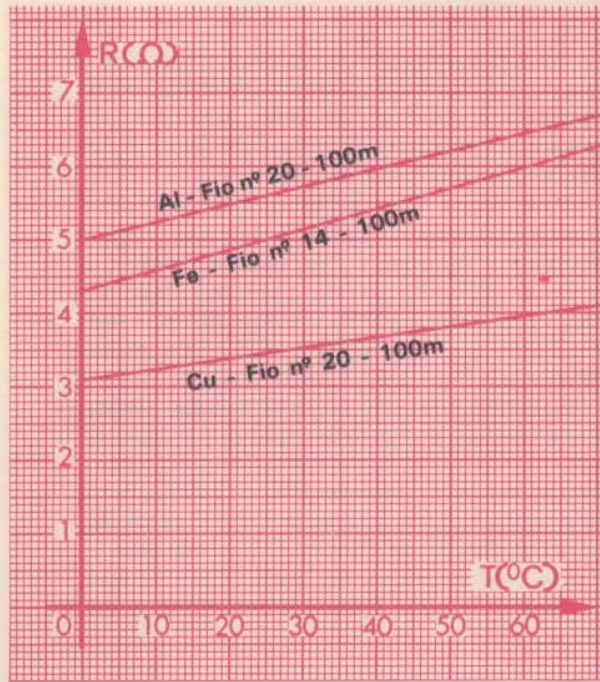


figura 7

5. Coeficiente de temperatura

Para os metais, o gráfico $R \times T$ é, em geral, linear em temperaturas até perto do ponto de fusão do metal. A figura 7 mostra gráficos para fios de cobre, alumínio e ferro.

Q22 — As retas $R \times T$ da figura 7 têm a mesma inclinação para o Cu, o Al e o Fe?

A inclinação da reta é característica de cada material e costuma-se definir o coeficiente α (figura 8) como coeficiente angular dividido pela resistência numa temperatura de referência:

$$\alpha = \frac{1}{R_1} \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1}$$

Aqui, R_2 é a resistência de um fio à temperatura T_2 e R_1 é a resistência do mesmo fio à temperatura de referência T_1 (20°C na fig. 7). Quando o gráfico $R \times T$ é uma linha reta, a razão α é sempre a mesma, qualquer que seja o ponto $P_2 = (T_2, R_2)$ que tomarmos sobre a reta; α é o coeficiente angular da reta dividido por R_1 .

Lâmpada incandescente

Você fez uma experiência, no capítulo 5, em que verificou que a resistência de uma lâmpada de 6V — 50mA **não é constante**, isto é, que o gráfico $V \times i$ **não é linear**.

O filamento da lâmpada é um fio metálico que se aquece pela corrente elétrica até ficar luminoso. Geralmente o metal é tungstênio de número atômico $Z = 74$. Se você tivesse um fio de tungstênio fora da lâmpada, no ar, e fizesse medidas de $V \times i$ no fio, verificaria que ele se comporta como o cobre, o níquel-cromo e todos os outros metais, ou seja, o tungstênio obedece à lei de Ohm; o gráfico $V \times i$, portanto, é linear. Por que, então, a resistência do tungstênio da lâmpada varia? A diferença importante entre as duas situações é que, na lâmpada, o fio se aquece muito, até temperaturas altas, ao passo que, fora da lâmpada, é resfriado pelo ar ambiente e quase não se aquece.

Você sabe explicar, com base na discussão acima, por que o tungstênio na lâmpada não obedece à lei de Ohm e, ao ar, obedece a esta lei? Pense.

Ao ar, o fio de tungstênio tem temperatura praticamente constante, independente da corrente elétrica. Neste caso, sua resistência também é constante. Na lâmpada, por outro lado, o fio de tungstênio está **termicamente isolado**, isto é, não perde



calor para o ambiente, pois dentro do bulbo da lâmpada há vácuo (mais precisamente, gás a pressão muito baixa). Então, uma corrente elétrica grande causa um aquecimento apreciável do fio, sua temperatura sobe bastante e, em consequência, a resistência varia.

Concluimos que um fio de um material qualquer pode obedecer ou não à lei de Ohm, dependendo das condições. Se a temperatura for constante, poderá obedecer à lei de Ohm. Se a temperatura variar com a corrente, a resistência também variará; com isso, o gráfico $V \times i$ não será linear.

A equação da reta pode ser escrita:

$$R = R_1 \left[1 + \alpha (T - T_1) \right]$$

onde indicamos o ponto genérico da reta por (T, R) , em vez de (T_2, R_2) ; (T_1, R_1) é um ponto de referência sobre a reta. O coeficiente α chama-se **coeficiente de temperatura da resistência elétrica**.

Q23 — Determine os coeficientes de temperatura do cobre, do alumínio e do ferro, a partir da figura 7.

Q24 — Um fio de cobre tem resistência 10Ω à temperatura ambiente (20°C). Qual sua resistência a 400°C ? E a -200°C ?

Para o resistor NTC, o gráfico de $R \times T$ não é uma linha reta. Pode-se ainda definir o coeficiente de temperatura neste caso, mas esse coeficiente não é constante, varia com a temperatura. Assim, para o NTC, cada valor de temperatura e de resistência corresponde a um valor do coeficiente de temperatura, α .

Q25 — O coeficiente de temperatura do resistor NTC é positivo, negativo ou nulo?

RESPOSTAS

R₂₂ -

R₂₃ -

R₂₄ -

R₂₅ -

A foto ao lado ilustra o diodo AA-119, ampliado de duas vezes o seu tamanho real. O uso de diodos miniaturizados é cada vez maior na eletrônica moderna.



figura 9

R22 — Não.
 R23 — Al $3,9 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$
 Cu $3,9 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$
 Fe $5,0 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$
 R24 — $R_{(400)} = 24,8\Omega$
 $R_{(-200)} = 1,5\Omega$
 R25 — Negativo.

6. Resistência e polaridade

As experiências que você realizou com o fio de cobre ou com o termistor NTC dariam os mesmos resultados, se as polaridades desses elementos fossem invertidas? Isto é, se a ponta que ligou ao terminal positivo do medidor fosse ligada ao terminal negativo e vice-versa, a medida da resistência daria o mesmo resultado?

Verifique isso, medindo a resistência desses elementos (fio de cobre e NTC) duas vezes, invertendo a polaridade na segunda medida.

Q26 — O valor da resistência mudou, quando a polaridade foi invertida?

Agora você vai realizar uma experiência para verificar que, em alguns dispositivos, a resistência se altera, quando neles se

7-12

inverte o sentido da corrente. Um desses dispositivos é o **díodo**. Vamos trabalhar com o diodo semiconductor tipo BY127 (figura 9).

Ligue em série, **somente por alguns segundos**, o diodo BY127, uma lâmpada de 6,0 V - 50 mA e quatro pilhas de 1,5 V; observe a lâmpada (figura 10).

Q27 — A lâmpada acende?

Inverta a polaridade (sentido da corrente) no diodo.

Q28 — E agora, a lâmpada acende?

Observação: Não mantenha a ligação por muito tempo, pois isso danificaria o diodo.

Q29 — O que você pode concluir, com relação à resistência elétrica do diodo, após obter esses resultados?

Meça diretamente, com o ohmímetro, a resistência do BY127 nas duas polaridades.

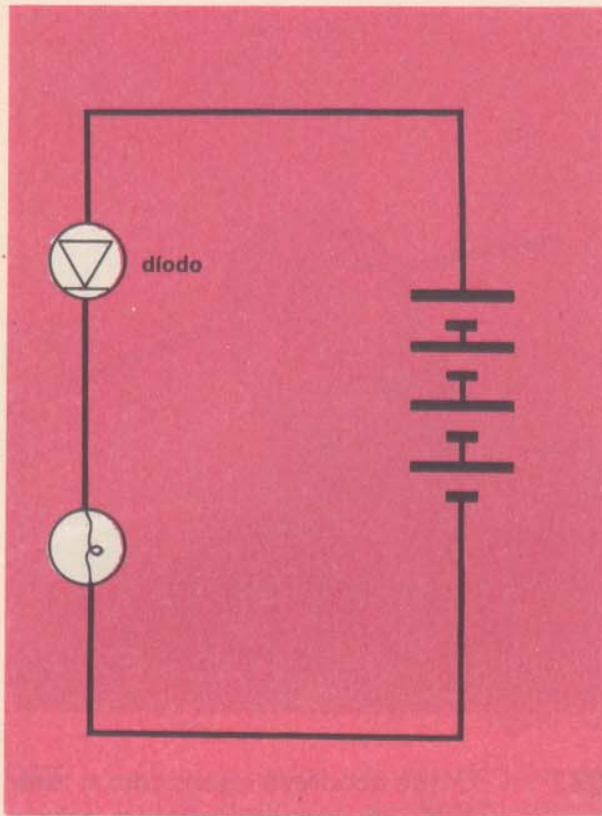


figura 10

Q30 — Qual a resistência mínima do BY127? Qual a resistência máxima?

Além dos diodos, muitos outros elementos de circuitos elétricos têm resistência que depende da polaridade da corrente, isto é, do sentido em que flui a corrente. É o caso dos vários tipos de retificadores, dos tríodos, dos transistores, etc.

Esses dispositivos conduzem bem a corrente em um sentido (resistência baixa), mas têm resistência alta para uma corrente de sentido oposto.

Os retificadores são utilizados para converter corrente alternada em corrente contínua. Por exemplo, se você ligar um retificador ou diodo em série com um resistor e ligar o circuito a uma tomada de corrente alternada (figura 11) verificará que, no resistor, só flui corrente de B para C. Quando a tensão em C é maior do que em A, o que tenderia a fazer fluir corrente de C para B, a resistência do retificador é tão alta que praticamente não flui corrente no sentido oposto.

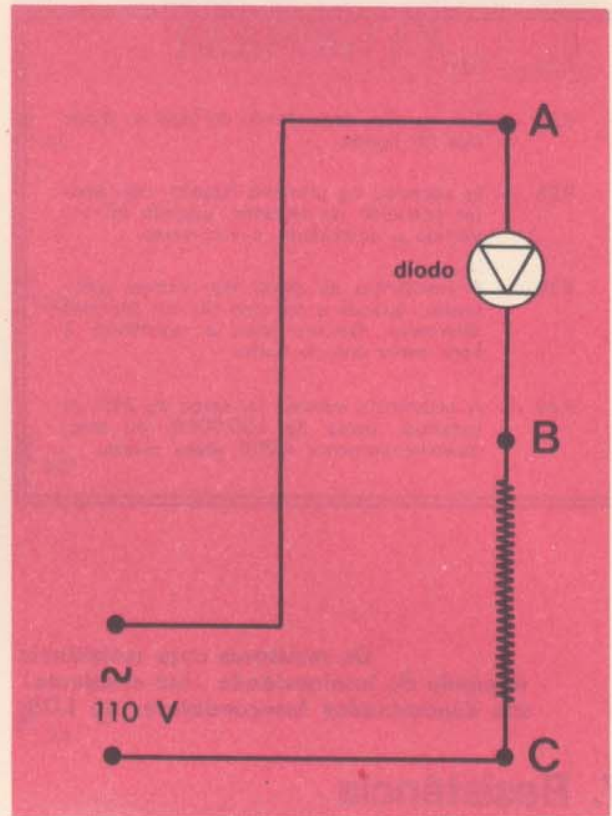


figura 11

RESPOSTAS

R₂₆ -

R₂₇ -

R₂₈ -

R₂₉ -

R₃₀ -

R26 — Não.

R27 — Sim ou não, dependendo do lado do diodo que foi ligado.

R28 — Se acendeu na primeira ligação, não deve ter acendido na segunda, quando foi invertida a polaridade, e vice-versa.

R29 — A resistência do diodo tem valores diferentes, quando a corrente flui em sentidos diferentes. De um lado, a resistência é bem maior que do outro.

R30 — A resistência mínima foi cerca de 25Ω . A máxima, cerca de $100\,000\Omega$, ou seja, aproximadamente 4.000 vezes maior.

Os resistores cuja resistência depende da luminosidade (luz ambiente) são denominados fotocondutores ou LDR.

7. Resistência e iluminação

Você deve ter percebido que a iluminação não afeta o valor da resistência do NTC, do cobre, ou do diodo. Caso tenha dúvida, verifique esta afirmação.

Significaria isso que a iluminação não influi na resistência, em nenhum tipo de resistor? Essa pergunta será respondida se você fizer a experiência que vem a seguir.

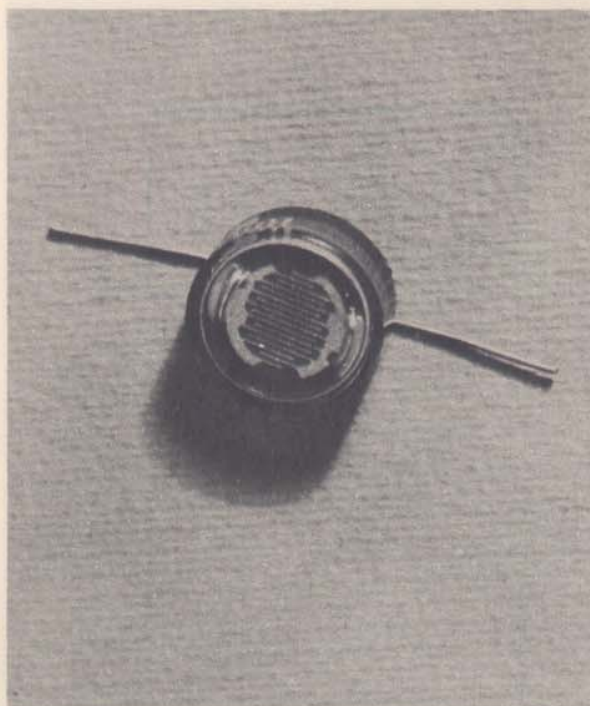
O dispositivo que será usado é conhecido por resistor LDR (Light Dependent Resistor), ou seja, resistor cuja resistência depende da iluminação. Caso não disponha do resistor LDR, acompanhe o texto como se você estivesse fazendo a experiência e, quando necessário, procure as respostas mais adiante.

Monte um circuito em série com o LDR: uma lâmpada de 6 V e 4 pilhas de 1,5 V.

Q31 — A lâmpada acende?

Para iluminar o LDR, monte outro circuito com uma lâmpada de 6 V e 4 pilhas de 1,5 V. Ilumine o LDR com essa lâmpada, aproximando-a bem do LDR (figura 12).

7-14



Q32 — O que acontece agora com a lâmpada do circuito em que está o LDR?

Q33 — Quando o LDR é iluminado, a corrente que passa no circuito aumenta ou diminui? O que significa isso em relação à resistência elétrica do LDR?

Q34 — O que você faria para aumentar o brilho da lâmpada que está ligada ao circuito do LDR (sem mexer nesse circuito)?

Retire o LDR do circuito e ligue os seus terminais diretamente aos do medidor de resistência.

Observação: Para fazer a leitura dos valores de resistência, selecione a escala adequada.

Q35 — Qual o valor da resistência do LDR, quando a iluminação é a do ambiente?

Ilumine o LDR da mesma maneira anterior, enquanto mede a resistência.

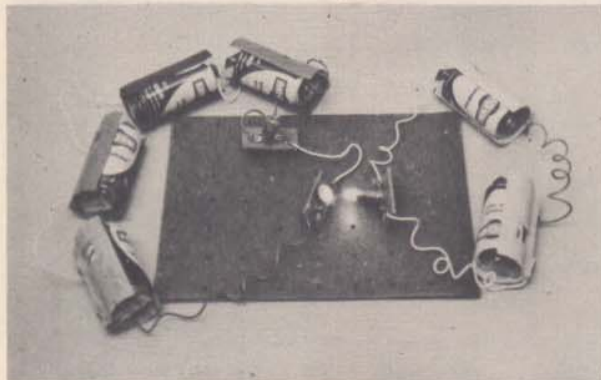


figura 12

Q36 — Qual o valor da resistência do LDR, quando é iluminado com a lâmpada do outro circuito?

Escureça o LDR com um pano escuro, de preferência, ou com a mão.

Q37 — Agora, que valor você encontrou para a resistência do LDR?

Q38 — Em que situação a corrente que passa no circuito será maior: com o LDR iluminado ou com o LDR no escuro?

Como você deve ter notado, a resistência do LDR varia enormemente quando iluminada ou no escuro. Esses resistores (LDR) têm muitas aplicações práticas. São usados na iluminação pública; um circuito é montado com o LDR e outros dispositivos e a incidência ou não de luz solar sobre o LDR faz com que as lâmpadas apaguem ou acendam automaticamente.

Os LDR são usados, também, nos circuitos de televisores, onde controlam o brilho da imagem; em alarmas (pega-ladrão); no funcionamento automático de portas; na contagem de objetos em linhas de montagem industrial, etc.

RESPOSTAS

R₃₁ -

R₃₂ -

R₃₃ -

R₃₄ -

R₃₅ -

R₃₆ -

R₃₇ -

R₃₈ -

- R31 — Não.
- R32 — Acende.
- R33 — A corrente aumenta. Isso significa que a resistência do LDR torna-se menor quanto mais intensa é a iluminação sobre ele.
- R34 — Aumentaria a iluminação sobre o LDR.
- R35 — Cerca de $6\,000\,\Omega$ para a iluminação ambiente e o LDR utilizado por ensaios do PEF (Phillips 4822 116 10001).
- R36 — Aproximadamente $25\,\Omega$.
- R37 — Um valor da ordem de $20\,000\,000\,\Omega$; $2 \times 10^7\,\Omega$.
- R38 — Iluminado.

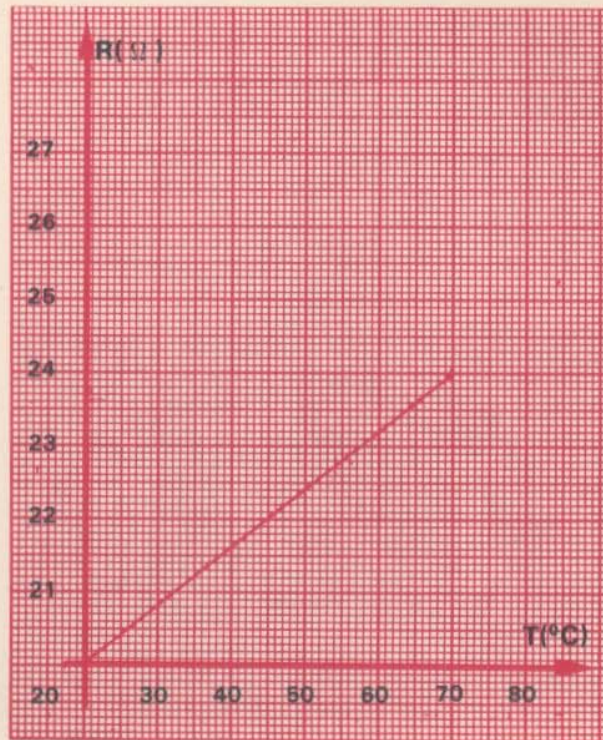


figura 13

8. Exercícios de aplicação

- E1 — Quando variamos a temperatura de um resistor, sua resistência — _____. Isso nos leva a concluir que a resistência elétrica depende da _____.
- E2 — A variação de temperatura, em um fio condutor, implica variação de sua resistência elétrica. A causa principal disso é que há variação das dimensões do fio ou variação da resistividade?
- E3 — Quando aumentamos a temperatura de um metal, sua resistência elétrica também aumenta? Explique por quê.
- E4 — Existem materiais que se comportam de maneira oposta à dos metais, ou seja, quando há aumento de temperatura, a resistência diminui. Explique por quê. Como são chamados esses materiais?

- E5 — Para cada item abaixo, diga se é: condutor — semicondutor — isolante.
 - a) NTC: _____
 - b) LDR: _____
 - c) madeira: _____
 - d) diodo BY127: _____
 - e) vidro: _____
 - f) fio de cobre: _____
 - g) tijolo: _____
 - h) fio de níquel: _____
 - i) barra de ferro: _____
- E6 — Faça a correspondência entre os dois conjuntos de informações:
 - (1) Aumenta a temperatura, diminui a resistência.
 - (2) Maior iluminação, menor resistência.
 - (3) Aumenta a temperatura, aumenta a resistência.
 - (4) Trocando a polaridade, modificamos a resistência.
 - (5) Condutor ôhmico.
 - () Coeficiente negativo de temperatura.
 - () Diodo semicondutor.
 - () Coeficiente positivo de temperatura.
 - () Fio metálico.
 - () LDR.

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

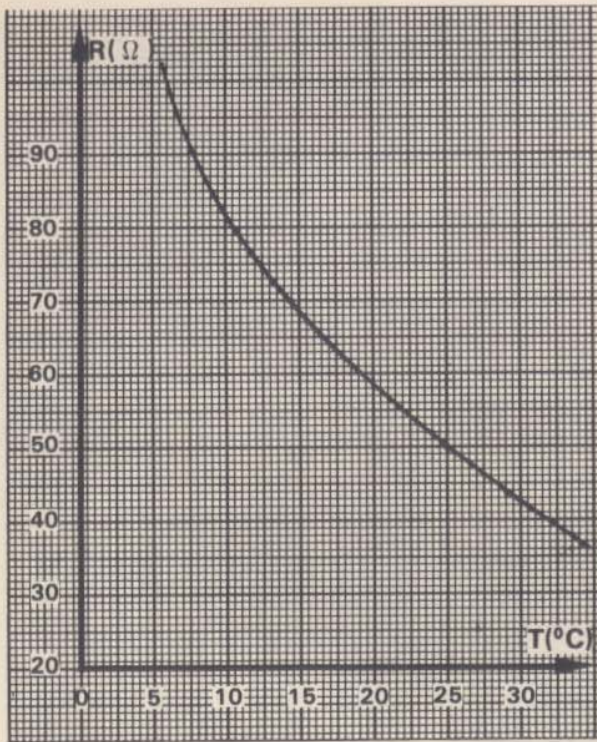


figura 14

- E7** — Tem-se um resistor de tungstênio cuja resistência, a 25°C , é de 40Ω . Sendo o coeficiente de temperatura do tungstênio $0,0048^{\circ}\text{C}^{-1}$, de quanto devemos aumentar a temperatura para que a resistência desse resistor passe a ser de 50Ω ?
- E8** — A figura 13 mostra o gráfico $R \times T$ para um fio de platina. A partir do gráfico, determine:
- a resistência a 40°C ;
 - o coeficiente de temperatura α ;
 - a que temperatura deve estar o fio, para que sua resistência seja de 25Ω . Use a fórmula e confira seu resultado com o gráfico.
- E9** — Um resistor NTC, cuja resistência varia conforme a figura 14, está ligado num circuito. Deseja-se que o valor de sua resistência permaneça igual a 44Ω .
- A que temperatura deve ser mantido o NTC?
 - Determine o valor de sua resistência à temperatura de 25°C .

R₂ -

R₃ -

R₄ -

R₇ -

R₈ -

R₉ -

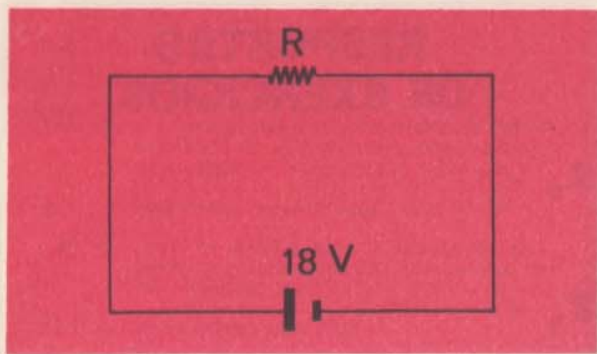


figura 15

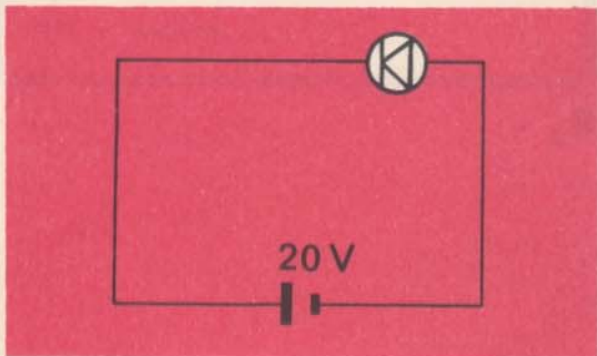


figura 16

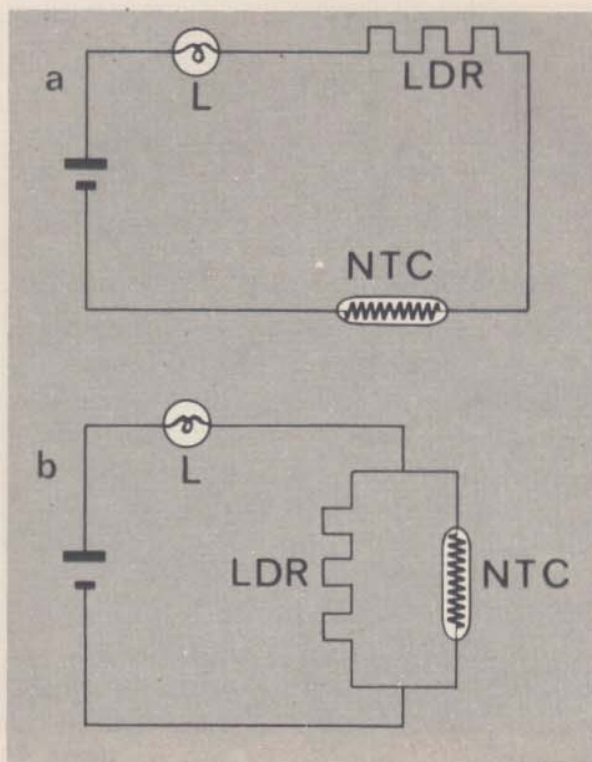


figura 17

E10 — No circuito da figura 15, a fonte de tensão é de 18 V e a corrente é de 3 A, para uma temperatura de 30°C. Com o passar do tempo o resistor se aquece. Determine o valor da resistência R do resistor, quando este estiver à temperatura de 80°C. O resistor é feito de Ni-Cr; $\alpha = 0,0002^\circ\text{C}^{-1}$.

E11 — O circuito da figura 16 é composto de um diodo e uma fonte de tensão de 20 V. Mediu-se a corrente e obteve-se 0,05 A. A seguir, inverteu-se a polaridade do diodo e a corrente foi de 0,001 A. Determine o valor da resistência do diodo nas duas situações.

E12 — As linhas de transmissão de energia elétrica são construídas com fios metálicos de resistências muito pequenas. No entanto, sofrem variação de temperatura durante as estações do ano (verão: temperatura média de 28°C; inverno: temperatura média de 10°). Determine as resistências, no inver-

no e no verão, de um condutor de cobre que tem as seguintes características, para a temperatura de 23°C:

diâmetro = 10 mm
 comprimento = 10⁴m
 $\alpha = 0,0039^\circ\text{C}^{-1}$
 $\rho = 1,7 \times 10^{-18}\Omega\cdot\text{m}$

E13 — O aparelhamento de um laboratório de Física necessita, para funcionar, de uma sala escura e fria. Deve-se, então, montar um sistema de alarma que acenderá uma lâmpada de aviso para o experimentador do aparelhamento, a fim de que este desligue a aparelhagem, quando as condições de iluminação e temperatura não forem ideais. Com base nestas informações, diga qual dos circuitos da figura 17 se adapta como sistema de alarma e explique por quê.

E14 — Você dispõe de duas fontes de tensão. Como você procederia para saber qual delas fornece a um circuito corrente contínua e

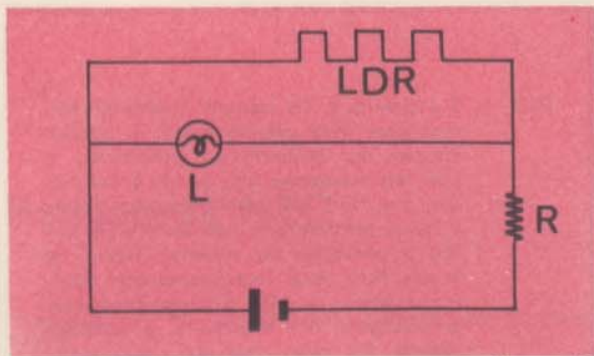


figura 18

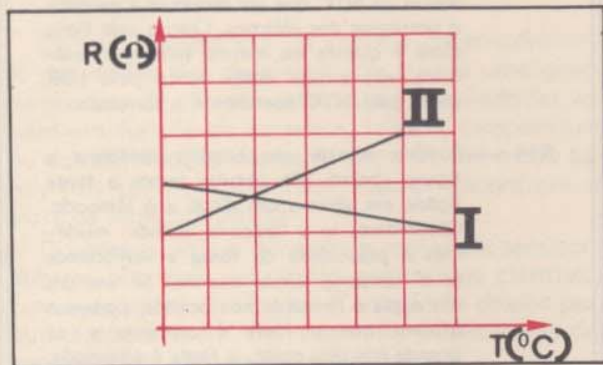


figura 19

qual fornece corrente alternada?
Sugestão: lembre-se do material experimental utilizado neste capítulo.

- E15** — Pode-se construir um circuito em que uma lâmpada acende automaticamente quando escuro, segundo o circuito da figura 18. Explique como funciona este mecanismo.
- E16** — Como poderia você utilizar uma NTC como termômetro clínico?
- E17** — Explique por que um NTC tem sua resistência diminuída, quando aumentamos sua temperatura.
- E18** — Você diria que os coeficientes de temperatura dos metais são todos positivos, todos negativos ou podem ser tanto positivos como negativos? E para os semicondutores?
- E19** — Na figura 19, qual curva pode representar um metal e qual um semicondutor?

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R₁₀ -

R₁₁ -

R₁₂ -

R₁₃ -

R₁₄ -

R₁₅ -

R₁₆ -

R₁₇ -

R₁₈ -

R₁₉ -

- R1 — Varia; temperatura.
 R2 — Variação da resistividade.
 R3 — Sim. Devido ao maior número de choques dos elétrons com os átomos do material.
 R4 — Os semicondutores têm esta propriedade. Nos semicondutores quase não há elétrons livres. Quando aumenta a temperatura, aumenta a vibração dos átomos do material e, com isto, mais elétrons escapam dos átomos, aumentando, assim, o número de elétrons livres e diminuindo a resistência.
 R5 — a) NTC — é semicondutor
 b) LDR — é semicondutor
 c) madeira — é isolante.
 d) diodo BY127 — é semicondutor
 e) vidro — é isolante
 f) fio de cobre — é condutor
 g) tijolo — é isolante
 h) fio de níquel — é condutor
 i) barra de ferro — é condutor

- R6 — (1) coeficiente negativo de temperatura
 (4) diodo semicondutor
 (3) coeficiente positivo
 (5) fio metálico
 (2) LDR

R7 — $R = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$
 $\Delta T = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = 52^\circ\text{C}$
 $\Delta T = T - T_0$
 $T = T_0 + \Delta T$
 $T = 25 + 52 = 77^\circ\text{C}$

R8 — a) $T = 40^\circ\text{C} \rightarrow R = 21,6^\circ\text{C}$
 b) $\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \Delta T} = 0,0039^\circ\text{C}^{-1}$
 c) $T = T_0 \frac{R - R_0}{\alpha R_0}$
 $T = 110^\circ\text{C}$

R9 — $R = 44\Omega \rightarrow T = 29^\circ\text{C}$
 $T = 25^\circ\text{C} \rightarrow R = 50\Omega$

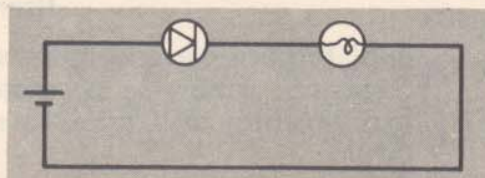
R10 — $R_0 = V/i = 6\Omega$
 $R = R_0 \{1 + \alpha (t - t_0)\}$
 $R = 6 \{1 + 2 \times 10^{-4} (80 - 30)\}$
 $R = 6,06\Omega$

R11 — $R_1 = \frac{V}{i_1} = 400\Omega$
 $R_2 = \frac{V}{i_2} = 20\,000\Omega$

R12 — $R_0 = \frac{\rho l}{A} = 2,17\Omega \text{ a } 23^\circ\text{C}$
 $R_{\text{verão}} = R_0 (1 + \alpha \Delta T) = 2,21\Omega$
 Variação para o verão é de $\Delta R = 0,04\Omega$
 $R_{\text{inverno}} = 2,06\Omega$
 Variação para o inverno é de $\Delta R = 0,11\Omega$

R13 — E o circuito b. Os elétrons (corrente) têm passagem livre pela lâmpada e, quando chegam no conjunto de resistências, a LDR tem resistência alta devido à falta de luz, e o NTC tem resistência alta devido à baixa temperatura, não permitindo então a passagem da corrente. Agora, se a sala ficar clara (mas permanecer fria), a resistência da LDR diminui, permitindo a passagem dos elétrons e a lâmpada acende. Por outro lado, se a sala continuar escura mas ficar quente é a resistência do NTC que vai diminuir e permitir a passagem dos elétrons. Caso a sala fique clara e quente ao mesmo tempo, os elétrons vão passar então tanto pela LDR como pelo NTC acendendo a lâmpada.

R14 — Poderia montar um circuito conforme a figura abaixo. No circuito temos a fonte ligada em série a um diodo e à lâmpada. Observamos se a lâmpada acende; mudamos a polaridade da fonte e verificamos se a lâmpada ainda acende. Se em um dos casos a lâmpada não acende, podemos afirmar que a fonte é contínua e, se acende nos dois casos, a fonte é alternada.



R15 — A resistência da LDR é menor que a resistência da lâmpada, devido à luz. Quando escuro, a resistência da LDR aumenta muito, tornando-se maior que a da lâmpada. Assim, a corrente elétrica, que procura o caminho mais fácil, passa pelo filamento da lâmpada, fazendo com que a mesma brilhe.

R16 — Conhecendo a curva característica $R \times T$ da NTC, poderíamos ligar um ohmímetro na NTC, enquanto a pessoa a segurasse. De acordo com a resistência que o ohmímetro indicasse, poderíamos ler a temperatura correspondente no gráfico.

R17 — Quando há o aumento de temperatura em um NTC, a energia térmica torna livres os elétrons que eram presos aos átomos. Quanto maior for a temperatura, maior será o número de elétrons livres e menor será a resistência.

R18 — Os metais são todos positivos e os semicondutores sempre negativos.

R19 — Metal curva II e semicondutor curva I.

Resistores NTC

(Adaptado da "Revista Eletrônica IBRAPE" n.º 9, março, 1960)

Como conseqüência do enorme desenvolvimento das aplicações da eletrônica, surgiu uma grande procura de componentes cujas propriedades variem em função da corrente, tensão, temperatura ou da combinação destes fatores. De um modo geral, tais componentes não-lineares encontram-se entre os semicondutores.

Durante a última década, os materiais semicondutores têm sido estudados por muitos cientistas com excelentes resultados. Como fruto dessas pesquisas apareceram, por exemplo, os resistores dependentes de tensão e os transistores.

Nos laboratórios, especial atenção é dedicada aos materiais cuja resistência elétrica específica depende da temperatura. Isto resultou no desenvolvimento de resistores com coeficiente negativo de temperatura (NTC).

Estes resistores com um elevado coeficiente negativo de temperatura do valor da resistência caracterizam-se pela sua alta estabilidade, ao passo que a produção em massa garante a fabricação de um produto uniforme e de preço baixo.

Os resistores NTC são usados nas mais diversas aplicações; por exemplo — micrometeorologia, aquecimento central, pesquisas médicas, rádio e televisão.

Os resistores NTC dependem altamente da temperatura e são feitos de óxidos semicondutores. A resistência destes óxidos diminui rapidamente quando a temperatura aumenta (-3 a 6% por °C na temperatura ambiente). Esta propriedade torna o resistor NTC um elemento valioso nos circuitos onde é necessário usar-se um resistor que mude seu valor conforme a variação da potência dissipada. Em aditamento, pequenas variações da temperatura ambiente podem ser determinadas por uma variação considerável do valor da resistência. Todas as aplicações dos resistores NTC baseiam-se num desses princípios.

Os óxidos semicondutores são conhecidos há muito tempo, mas somente nos últimos anos, depois de intensivas pesquisas sobre diversos materiais, o resistor NTC tornou-se um elemento seguro de circuitos. Encontrou inúmeras aplicações no rádio e televisão, assim como em muitos aparelhos industriais.

Composição

Classificando os diferentes materiais de acordo com a sua resistência específica, chegamos à seguinte divisão:

condutores (metais) 10^{-6} a 10^{-5} ohm. cm
semicondutores 10^{-3} a 10^0 ohm. cm
isoladores $> 10^9$ ohm. cm

Todos os semicondutores, com pouquíssimas exceções, têm um elevado coeficiente negativo de temperatura do valor específico da resistência. Eles são, todavia, de um modo geral, muito instáveis em suas propriedades; somente bem poucas composições podem ser usadas na fabricação dos resistores NTC.

Os resistores NTC são feitos de:

- a) soluções sólidas de Fe_3O_4 e Zn_2TiO_4 ou $MgCr_2O_4$ ou
- b) Fe_2O_3 com pequenas quantidades adicionais de TiO_2 , ou
- c) NiO ou CoO ou uma combinação destes óxidos com pequenas quantidades adicionais de Li_2O .

São acrescentados, às vezes, óxidos estabilizadores a fim de se obter melhor reprodutibilidade e estabilidade das características. A escolha da composição depende inteiramente das exigências relativas ao coeficiente de temperatura e resistência específica. Para fabricação de resistores baratos somente são usadas as duas primeiras composições.

PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O processo de fabricação foi organizado para satisfazer os seguintes requisitos:

- 1) Dentro de certas tolerâncias, os elementos similares devem ter características idênticas.
- 2) As características devem ser constantes mesmo depois de longo uso.
- 3) Os resistores devem ser mecanicamente fortes a fim de serem manejados facilmente.
- 4) A forma e as dimensões devem ser adequadas para montagem em circuitos. O primeiro requisito é muito importante quando os resistores NTC são usados em grandes séries de aparelhos onde o ajuste individual é dispendioso e também nos casos de substituição.

A fim de satisfazer estas exigências, somente são usados materiais cuidadosamente selecionados e a produção se processa com a maior precisão possível. A massa bem misturada e depois de adicionado um aglomerante plástico, ela recebe as formas apropriadas por extrusão (bastões) ou pressão hidráulica (discos). Os produtos são depois submetidos a uma temperatura bastante alta a fim de dissolver total ou parcialmente os óxidos. A fase final consiste em fazer os contatos elétricos.

Esta obra foi impressa pela
AGGS — Indústrias Gráficas S.A.
Rua Luis Câmara, 535 — Olaria — Rio de Janeiro — RJ
para a
FENAME — Fundação Nacional de Material Escolar
Rua Miguel Ângelo, 96 — Maria da Graça — Rio de Janeiro — RJ
República Federativa do Brasil