

Exp. 2

Curva característica corrente-tensão

FSC2143 - Laboratório de Física III
FSC5123 - Física experimental II

lemo.ufsc.br
Versão de 27 de março de 2024

1 Objetivos

Curva característica corrente-tensão é um gráfico $i \times V$ que representa a relação entre a tensão aplicada e a corrente que flui por um componente. Nesta experiência, o objetivo é obter as curvas características dos seguintes componentes:

- Resistor metálico de NiCr (liga de níquel e cromo);
- Resistor metálico de Tungstênio (lâmpada incandescente);
- Resistor cerâmico do tipo varistor (VDR);
- Resistor cerâmico do tipo termistor NTC;
- Diodo semiconductor.

2 Teoria Básica

O gráfico $i \times V$ de um componente elétrico, dispositivo, circuito ou material recebe o nome de *curva característica corrente-tensão*. Engenheiros eletrônicos podem usar esse gráfico para modelar os parâmetros básicos de um dispositivo e descrever seu comportamento num dado circuito.

2.1 Resistência elétrica e resistores

Quando se aplica uma diferença de potencial (tensão) V sobre um condutor, flui através dele uma corrente elétrica i . A **resistência elétrica** R do condutor é definida como a razão entre a tensão aplicada e corrente gerada:

$$R \equiv \frac{V}{i} \quad (1)$$

onde V é medida em volts (V), i é medida em ampères (A) e R , em ohms (Ω). A equação (1) é uma definição geral de resistência elétrica e pode ser utilizada para qualquer tipo de resistor, tenha ele uma resistência constante ou não.

Também é relativamente comum definir a **resistência elétrica diferencial** R_{dif} , que nada mais é do que a taxa de variação da tensão em relação à corrente:

$$R_{\text{dif}} = \frac{dV}{di}, \quad (2)$$

ou seja, é a inclinação da reta tangente ao gráfico $V \times i$ de um determinado componente eletrônico. Ou ainda, o inverso do valor da inclinação da tangente ao gráfico $i \times V$.

Para resistores ôhmicos, cuja definição você encontra na próxima seção, não há distinção prática entre resistência elétrica e resistência elétrica diferencial. Já para um resistor qualquer, esta afirmação não é necessariamente verdadeira.

2.1.1 Resistores Ôhmicos

Lei de Ohm. Para um condutor mantido a temperatura constante, a razão entre a tensão aplicada entre dois pontos do condutor e a corrente elétrica que flui entre estes dois pontos é constante.

A lei de Ohm acima enunciada¹ estabelece que condutores mantidos a temperatura constante têm **resistência elétrica constante**. Um resistor cuja resistência elétrica é constante é por isso chamado de *resistor ôhmico*. Para resistores ôhmicos, portanto, o valor numérico da resistência **não** depende da tensão aplicada. Se o valor numérico da resistência depender da tensão aplicada, ele é dito *não-ôhmico*. Os resistores ôhmicos têm uma curva característica linear, ou seja, o gráfico $i \times V$ é uma linha reta (Figura 1). Por isso, os resistores ôhmicos são também chamados de *resistores lineares*.

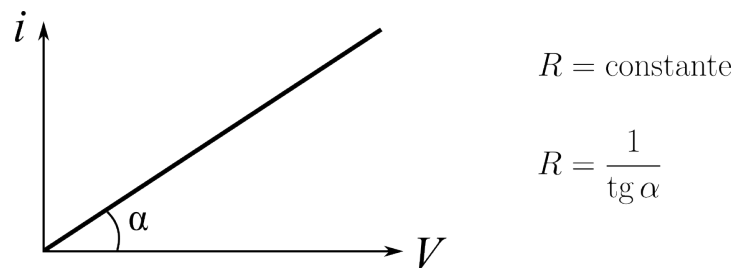


Figura 1 Curva característica de um resistor ôhmico.

2.1.2 Varistores

Um exemplo de resistor não-linear é o varistor ou VDR (*Voltage Dependent Resistor*). Sua resistência é altamente dependente da tensão aplicada, por causa da *resistência de contato* variável entre os cristais misturados que o compõem. Sua característica elétrica é determinada por complicadas redes em série e em paralelo de cristais de carbeto de silício pressionados entre si.

¹ A lei de Ohm recebe este nome em homenagem ao físico alemão Georg Simon Ohm (1789-1854), que a formulou.

O filamento de uma lâmpada incandescente apresenta também uma resistência não-linear. Para correntes pequenas, a resistência é menor do que para correntes elevadas. Entretanto, neste caso, o aumento da resistência é devido ao efeito Joule produzido pela própria alimentação da lâmpada. Por esse motivo, a lâmpada incandescente não costuma ser classificada como VDR.

Para o VDR, a dependência numérica de V (em volts) para com a corrente i (em ampères) é dada pela *equação empírica*²

$$V = Ci^\beta, \quad (3)$$

onde β depende da composição do material utilizado e do processo de fabricação, tendo valores que variam de 0,05 a 0,40. A constante C depende da temperatura e de características geométricas do VDR, com valores entre 15 e 1000 Ω . A constante C representa a resistência do VDR para uma corrente hipotética de 1,0 A. Hipotética, pois esta é uma corrente geralmente não suportada por este tipo de elemento, o que é o caso do varistor utilizado neste experimento.

Uma curva característica típica de um VDR é representada na figura 2(a).

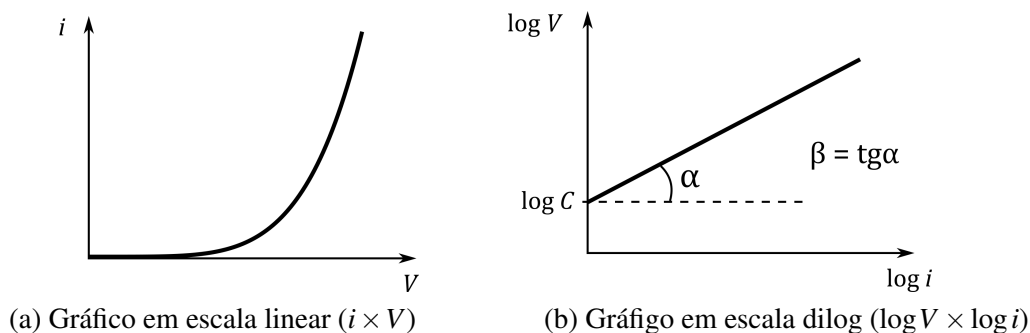


Figura 2 Curva característica do VDR

As constantes C e β podem ser determinadas diretamente a partir de um gráfico de $\log V$ em função de $\log i$, como na figura 2(b). De fato, ao aplicar o logaritmo aos dois membros da equação (3), obtém-se uma equação análoga à equação de uma reta:

$$\log V = \log C + \beta \log i, \quad (4)$$

$$y = a + b x. \quad (5)$$

A regressão linear pelo método dos mínimos quadrados funciona neste caso com $\log V$ e $\log i$ desempenhando os papéis de y e x , respectivamente. O coeficiente angular da reta fornece diretamente o valor de β e o seu coeficiente linear é igual a $\log C$. Ao calcular $\log V$ e $\log i$, V e i devem estar expressos em volts e ampères, respectivamente.

² Uma equação empírica é aquela obtida experimentalmente, sem ser necessariamente resultado de uma previsão ou modelo teórico. Ela simplesmente se verifica na prática, servindo como uma boa aproximação da realidade observável.

2.1.3 Termistores

Termistores são materiais cuja resistência varia com a temperatura. Há, basicamente, dois tipos de termistores:

- NTC (*Negative Temperature Coefficient*): resistor com coeficiente de temperatura negativo, ou seja, cuja resistência diminui com o aumento da temperatura;
- PTC (*Positive Temperature Coefficient*): resistor com coeficiente de temperatura positivo, ou seja, cuja resistência aumenta com o aumento da temperatura.

A maioria das cerâmicas apresenta coeficiente negativo de temperatura (NTC). Muitas destas são feitas de materiais semicondutores. A sua resistência se reduz acentuadamente com o aumento de temperatura e, por este motivo, são comumente utilizados como sensores de temperatura.

Os termistores são fabricados com várias misturas de óxidos, tais como: manganês, níquel, cobalto, ferro, zinco, titânio e magnésio. Podem ter a forma de contas, cilindros ou discos. Estes óxidos são misturados em proporções devidas, para apresentar a resistividade e o coeficiente de variação da resistência com a temperatura desejados.

As medidas de tensão e corrente dos termistores são interessantes quando a sua temperatura for maior que a do ambiente. Se a corrente é pequena, o calor produzido no resistor é desprezível, mantendo a temperatura e a resistência constantes. Com o posterior acréscimo de corrente, há um aumento na temperatura do termistor em relação à temperatura ambiente. A resistência diminui e a corrente continua aumentando, com risco de queimar o componente caso não haja dissipação eficiente de calor.

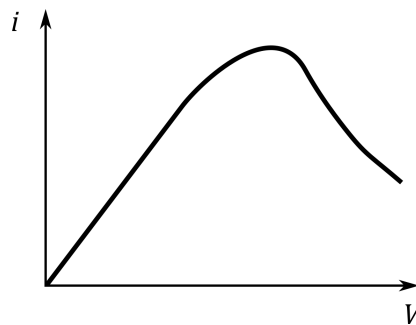


Figura 3 Curva característica de um termistor PTC.

Há resistores que apresentam elevado coeficiente positivo de variação da resistência com a temperatura (PTC). Tais resistores têm uma curva característica tal como a da figura 3. São conhecidos como condutores frios, pois sua condutividade é muito maior em baixas que em altas temperaturas. Os termistores PTC são geralmente feitos de BaTiO_3 ou soluções sólidas de BaTiO_3 e SrTiO_3 .

O gráfico corrente \times tensão de um PTC mostra nitidamente sua propriedade limitadora de corrente, daí a sua utilidade em muitos circuitos de proteção. Ele obedece à Lei de Ohm para tensões suficientemente baixas, porém, com o aumento gradativo da tensão, a corrente decresce devido ao aumento da resistência causada pelo

aquecimento. É válido observar que a temperatura de um PTC é naturalmente influenciada pela temperatura ambiente e pela condutividade térmica do meio que o envolve.

2.2 Diodos semicondutores

Do ponto de vista funcional, um diodo é um dispositivo que bloqueia a passagem de corrente em um sentido e libera a passagem de corrente no outro. Por ter uma condutância assimétrica, é um componente elétrico com *polaridade*, ou seja, em que há uma distinção entre polo positivo e polo negativo. A título de comparação, o resistor não tem polaridade, por exemplo.

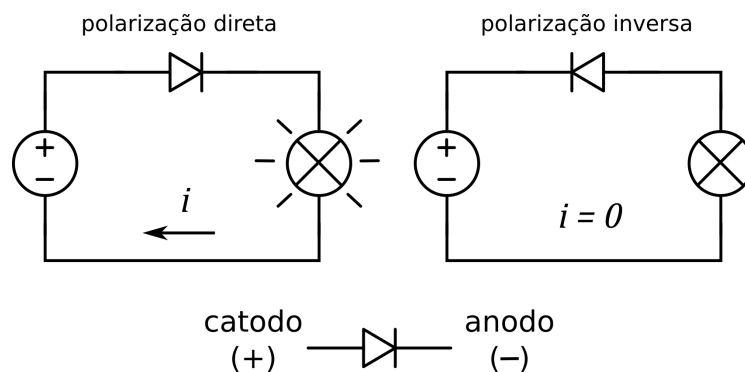


Figura 4 Diodo em polarização direta e em polarização inversa. O símbolo contendo uma cruz representa uma lâmpada, que acende com a passagem de corrente quando o diodo está em polarização direta.

Um diodo *ideal* tem resistência nula num sentido e resistência infinita no outro. Num circuito composto por uma bateria e uma lâmpada, como o da figura 4, a maneira como o diodo está conectado à malha determina se a lâmpada acenderá ou não. Quando o polo positivo do diodo está conectado ao polo positivo da bateria, a corrente flui, acendendo a lâmpada. Dizemos que o diodo está montado em *polarização direta*. No caso contrário (polos opostos conectados), a corrente não flui e o diodo está em *polarização inversa*.

O tipo de diodo mais comumente usado hoje é o diodo semicondutor, que consiste em uma junção p-n conectada a dois terminais elétricos. A maioria dos diodos semicondutores é feita de silício e possui uma queda de tensão de cerca de 0,7 V em polarização direta (conforme a figura 5). Outros diodos feitos de germânio, por exemplo, apresentam uma queda de tensão de 0,3 V.

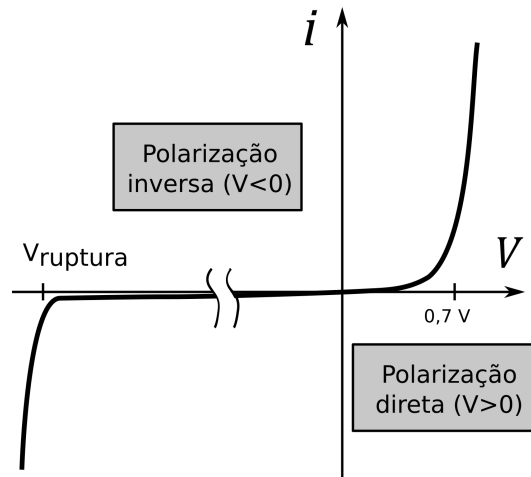


Figura 5 Curva característica de um diodo de silício, com queda de tensão de 0,7 V em polarização direta. Para uma dada tensão inversa muito alta, muito superior a 0,7 V, ocorre a ruptura da junção p-n.

3 Relação do material

- 01 fonte de tensão e corrente contínuas (0-30V/0-3A);
- 02 multímetros;
- 01 resistor metálico de resistência entre 100 e 300 Ω ;
- 01 lâmpada incandescente;
- 01 varistor (VDR) com suporte (em béquer com óleo);
- 01 aquecedor elétrico;
- 01 termistor NTC com suporte;
- 01 diodo semiconductor;
- 01 resistor de proteção de 150 Ω ;
- 01 resistor de proteção de 20 k Ω ;
- cabos para conexões elétricas.

4 Procedimento Experimental

PRIMEIRA PARTE - Resistores metálicos (NiCr e lâmpada incandescente)

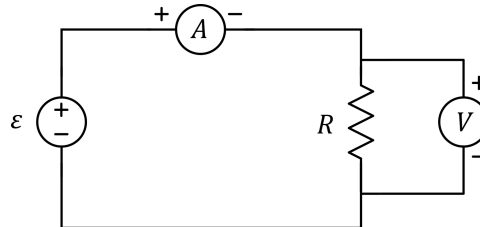


Figura 6 Esquema de montagem com fonte de tensão contínua, resistor (**ôhmico, incandescente ou VDR**), voltímetro e amperímetro.

1. Monte o circuito conforme o esquema da figura 6, utilizando o resistor R (NiCr), ainda sem ligar a fonte de tensão.
Observação: O amperímetro deve ser ligado **sempre em série** ao circuito, enquanto que o voltímetro conecta-se **sempre em paralelo**. O terminal “COM” do multímetro corresponde ao terminal (-).
2. Coloque o amperímetro na escala de 200 mA e o voltímetro na escala de 200 V. Antes de ligar a fonte, certifique-se de que o botão de controle de tensão está no mínimo e o de corrente no máximo. Agora, ligue a fonte.
3. Complete a parte da Tabela I referente ao NiCr. Para isso, vá aumentando a tensão fornecida pela fonte em pequenos passos. Comece no zero e vá até aproximadamente 30 V. Em cada valor de tensão que você parar, anote na tabela os valores lidos no voltímetro e no amperímetro, **referentes ao resistor**.
Observação: Se necessário, ajuste a faixa do amperímetro, passando de 200 mA para 20 A.
4. Repita os procedimentos anteriores, utilizando agora como resistor a lâmpada incandescente com filamento de Tungstênio (W), completando a Tabela I.

SEGUNDA PARTE - Varistor (VDR)

1. Monte o circuito conforme o esquema da figura 6, utilizando um VDR como elemento resistivo. Este estará devidamente mergulhado com seu suporte no óleo de transformador dentro de um béquer à temperatura ambiente (anote a temperatura lida no termômetro).
2. Complete a Tabela II referente ao VDR. Para isso, vá aumentando a tensão fornecida pela fonte em pequenos passos. **Comece em 15 V e vá até aproximadamente 30 V**. Em cada valor de tensão que você parar, anote na tabela os valores lidos no voltímetro e no amperímetro, **referentes ao resistor**.
Observação: Ajuste sempre que necessário a faixa do amperímetro pra uma melhor precisão na leitura de corrente. A corrente neste circuito é bem menor que nos casos anteriores.

TERCEIRA PARTE - Termistor (NTC)

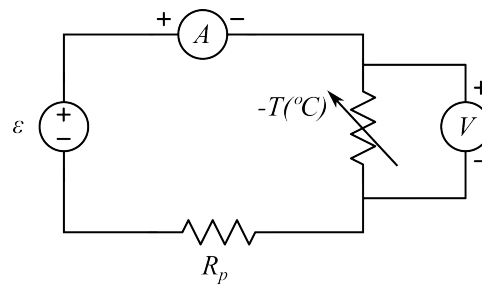


Figura 7 Esquema de montagem com fonte de tensão contínua, **termistor NTC**, resistor de proteção ($R_p = 20\text{k}\Omega$), voltímetro e amperímetro.

1. Monte o circuito conforme o esquema da figura 7, que contém um NTC e um resistor de proteção $R_p = 20\text{k}\Omega$ montados em série.
2. Complete a Tabela III com as medidas de corrente e tensão, variando a tensão na **fonte** de 0 a 30 V e anotando na tabela as tensões e correntes lidas **no voltímetro e no amperímetro**.
3. Para completar a segunda parte da Tabela III, repita o item anterior, só que mantendo o NTC pinçado entre seus dedos **durante toda a tomada de dados** (pince o NTC entre os dedos polegar e indicador e aguarde uns 30 segundos antes de iniciar as medidas). O objetivo é observar a diminuição da resistência deste elemento com o aumento da sua temperatura. Se antes o NTC estava à temperatura ambiente, agora ele está com a temperatura da superfície dos seus dedos.

QUARTA PARTE - Diodo

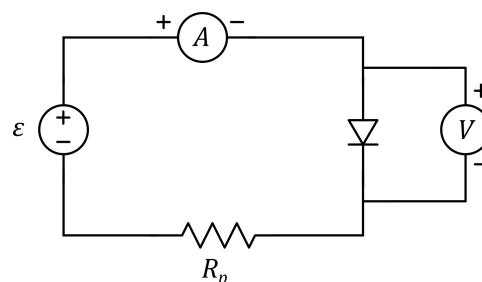


Figura 8 Esquema de montagem com fonte de tensão contínua, **diodo**, resistor de proteção ($R_p = 150\Omega$), voltímetro e amperímetro.

1. Monte o circuito esquematizado na figura 8, que contém um diodo e um resistor de proteção $R_p = 150\Omega$.
2. Complete a Tabela IV com as medidas de corrente e tensão, variando a tensão na **fonte** de 0 a 30 V e anotando na tabela as tensões e correntes lidas **no voltímetro e no amperímetro**.
3. Realize agora duas medidas com tensões negativas (por exemplo, -10 V e -20 V). Para impor tensão negativa no diodo, basta intercambiar as conexões na fonte ou inverter a polaridade do diodo.

5 Questionário

1. (a) Faça os gráficos de i em função de V com os dados da Tabela I para os dois resistores metálicos: NiCr e lâmpada.
(b) O que é um *resistor ôhmico*? Indique qual dos resistores nesta primeira parte é ôhmico, justificando a resposta.
(c) Através de uma regressão linear, determine a resistência R (em ohms) do resistor de NiCr.
(d) Calcule o valor da resistência da lâmpada de Tungstênio nos casos em que a tensão aplicada vale $\sim 3\text{ V}$ e $\sim 30\text{ V}$ e compare com a resistência do resistor de NiCr.
2. (a) Faça o gráfico i em função de V com os dados da Tabela II para o VDR.
(b) Descreva como varia a resistência deste VDR à medida que a tensão varia entre os limites medidos.
(c) Faça um gráfico dilog para o VDR: $\log V$ no eixo vertical contra $\log i$ no eixo horizontal. Os dados seguem tendência linear? Se sim, calcule os coeficientes da reta via regressão e, a partir deles, determine β e C .
3. (a) Para cada temperatura (a ambiente e a da pele do(a) experimentador(a)), é possível uma curva característica do NTC. Plote as duas curvas num mesmo gráfico, realizando uma regressão linear para cada.
(b) As curvas experimentais seguem tendência linear? Se sim, obtenha as resistências para cada temperatura. É possível observar uma diferença significativa entre as resistências? A partir dos resultados, confirme se o resistor é realmente um NTC ou se se trata de um PTC, justificando sua resposta.
4. (a) Construa a curva característica do diodo semicondutor para $V > 0$ a partir dos dados experimentais. Comente qualitativamente o gráfico. O mesmo ocorre para $V < 0$?
(b) Tendo em vista como o circuito foi montado, explique por que a tensão na fonte difere significativamente da tensão no diodo.
(c) Tendo em vista a queda de tensão máxima observada no diodo, determine se ele é constituído de silício ou de germânio.

