

4º experimento - Díodo semicondutor

Carlos Eduardo da S. Papa

232013390@aluno.unb.br

23/2013390

Turma 1A

Ronan Cunha Freitas

232013425@aluno.unb.br

23/2013425

Turma 2B

Rodrigo Cardoso da Silva

231031699@aluno.unb.br

23/1031699

Turma 2B

Resumo Este relatório apresenta a caracterização elétrica de um diodo semicondutor do tipo BY127 por meio do levantamento de suas curvas $I_D \times V_D$ em polarização direta e reversa, bem como a análise funcional de múltiplas configurações de circuitos utilizando diodos retificadores sob sinal senoidal de 100 Hz e 8 Vpp. O trabalho investiga o comportamento dinâmico, a condução seletiva, a retificação e os efeitos de topologias como série, antissérie, antiparalelo e filtragem por capacitor. Todos os resultados são discutidos com base nos fundamentos teóricos da junção PN, leis de semicondutores e formas de onda obtidas experimentalmente.

1. Objetivos

Os objetivos deste experimento são estabelecer a caracterização elétrica do diodo semicondutor do tipo BY127 e analisar seu comportamento em diferentes condições de operação. De forma específica, o experimento visa:

- Levantar a curva característica $I_D \times V_D$ do diodo em polarização direta, identificando a tensão limiar de condução e o comportamento exponencial previsto pela equação de Shockley;
- Determinar a característica $I_D \times V_D$ em polarização reversa, verificando a ausência de condução e o regime de corrente de saturação abaixo da tensão de ruptura;
- Investigar a resposta dinâmica do diodo quando submetido a um sinal senoidal, analisando cinco configurações distintas de circuitos retificadores;
- Observar e interpretar as formas de onda medidas no resistor de carga por meio do osciloscópio, relacionando-as com o funcionamento das topologias de retificação;
- Desenvolver competências práticas de montagem de circuitos, operação de instrumentos de medição

e análise crítica de dados experimentais.

Esses objetivos buscam integrar fundamentos teóricos sobre junções PN, dispositivos semicondutores e retificação, com a prática laboratorial necessária para compreensão aprofundada do comportamento do diodo BY127.

2. Introdução

Os diodos semicondutores constituem dispositivos fundamentais na eletrônica, sendo amplamente aplicados em retificação, proteção, chaveamento e circuitos de filtragem. Sua operação se baseia na formação de uma junção PN, estrutura que estabelece uma região de depleção e uma barreira de potencial cuja modulação determina o fluxo de corrente no dispositivo. Quando diretamente polarizado, o diodo conduz corrente de forma exponencial em função da tensão aplicada; quando reversamente polarizado, a corrente é drasticamente reduzida, restringindo-se ao regime de saturação até a eventual ocorrência de ruptura em tensões elevadas [2].

O comportamento elétrico de um diodo ideal pode ser descrito pela equação de Shockley [1]:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right), \quad (1)$$

em que I é a corrente conduzida, I_0 é a corrente de saturação reversa, η é o fator de idealidade ($1 \leq \eta \leq 2$), e $V_T = kT/q$ é a tensão térmica, aproximadamente 26 mV à temperatura ambiente.

O dispositivo estudado neste experimento é o diodo retificador BY127, caracterizado por alta tensão reversa máxima (800 V) e corrente direta de até 1 A, parâmetros que o tornam adequado para aplicações de retificação em baixa frequência [3]. A compreensão do comportamento de sua curva característica $I_D \times V_D$ é essencial para o dimensionamento de circuitos com cargas reais e análise de eficiência em processos de conversão AC-DC.

Além da caracterização estática, o experimento abrange a análise dinâmica do diodo sob sinal senoidal de 100 Hz e 8 V_{pp}. Nesta etapa, são investigadas diferentes topologias de retificação, incluindo meia onda, uso de múltiplos diodos em série, configurações antissérie e antiparalelo, bem como a inserção de filtro capacitivo. Essas montagens permitem observar fenômenos como condução unilateral, aumento da tensão mínima de condução, recorte de semiciclos, condução alternada e redução de ondulação (ripple) por ação do capacitor.

3. Materiais e equipamentos utilizados

- 2 diodos BY127;
- Fonte de tensão;
- Gerador de função;
- Osciloscópio;
- 2 multímetros;
- Resistor de 1 kΩ;
- Capacitor de 10 μF
- Cabos para conexão e protoboard;

4. Procedimentos Experimentais

Esta seção descreve detalhadamente todos os procedimentos adotados na realização do experimento, de modo a permitir sua completa reproduzibilidade. As etapas foram divididas em duas partes: levantamento da curva característica do diodo (Procedimento 2a) e análise das respostas dinâmicas do dispositivo em diversas configurações sob excitação senoidal (Procedimento 2b).

4.1. Procedimento 2a: Levantamento da Curva Característica $I_D \times V_D$ do diodo BY127.

Após a montagem do circuito (Figura 1), procedeu-se à variação da queda de tensão sobre o diodo (V_D) em incrementos de 100 mV. Para cada incremento, foi registrada a respectiva corrente (I_D) que atravessava o componente. Estabeleceu-se um limite máximo de corrente de 40 mA, visando preservar a integridade física do diodo.

4.1.1 a) Polarização direta

Inicialmente, foi montado um circuito composto por uma fonte de tensão contínua ajustável, um resistor de 100 Ω ($\pm 5\%$) e um diodo BY127 conectado em série. O objetivo era aplicar diferentes tensões ao diodo e medir a corrente resultante no circuito.

1. Ajustou-se a fonte de tensão para o valor inicial de 0,1 V.
2. Mediu-se a corrente total do circuito utilizando um amperímetro digital conectado em série.
3. Registrhou-se também a tensão diretamente sobre o diodo por meio de um voltímetro digital conectado em paralelo ao componente.
4. A tensão aplicada foi aumentada em incrementos de 0,1 V, repetindo-se as medições para cada valor, até que a corrente atingisse aproximadamente 40 mA.
5. Todos os dados foram registrados para posterior construção da curva característica.

Essa etapa permitiu a identificação da tensão limiar de condução e da região exponencial da curva característica. Para concluir esta etapa, os terminais da fonte de tensão foram invertidos, repetindo-se a metodologia para a condição de polarização reversa do diodo.

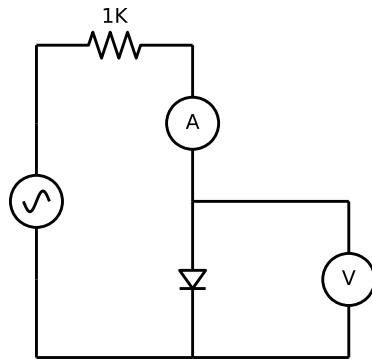


Figura 1: Circuito do procedimento A

4.1.2 b) Polarização reversa

Para determinar a característica do diodo em polarização reversa, o sentido do diodo na montagem anterior foi invertido.

1. Com o diodo invertido, ajustou-se novamente a fonte DC para 0,1 V.
2. Mediu-se a corrente reversa utilizando o amperímetro em série.
3. A tensão foi aumentada gradualmente, como na etapa anterior, observando-se o comportamento da corrente.

4. Os valores foram anotados até o limite operacional seguro, evitando aproximação da tensão máxima reversa (800 V).

Esta etapa permitiu verificar a corrente de saturação reversa, bem como a ausência de condução significativa abaixo da tensão de ruptura.

4.2. Procedimento 2b: Análise de Montagens sob Excitação Senoidal

Nesta etapa, realizou-se a montagem de cada circuito proposto na Figura 2. Em todas as configurações, a fonte de alimentação forneceu um sinal senoidal com amplitude de 8 V_{pp} (pico a pico) e frequência de 100 Hz .

Para cada montagem, foram registrados (fotografados) os sinais de entrada e de saída observados no osciloscópio. Foi dada especial atenção à mensuração da atenuação e da defasagem entre as respectivas formas de onda.

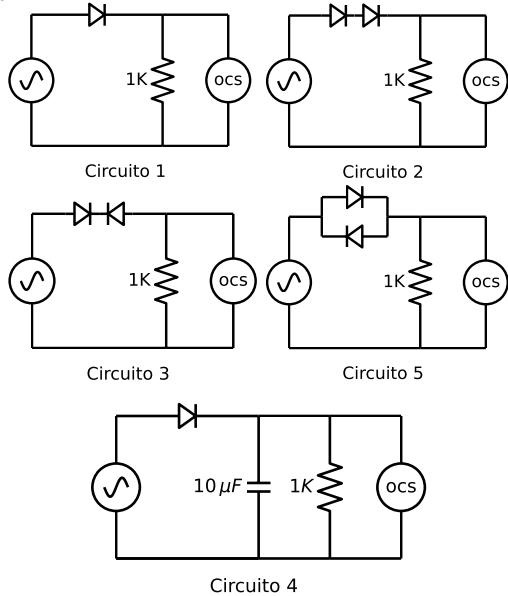


Figura 2: Circuitos do procedimento B

A segunda parte do experimento consistiu em analisar a resposta temporal de diferentes topologias de retificação utilizando o diodo BY127. Em todos os casos, aplicou-se ao circuito uma tensão senoidal de amplitude 8 V_{pp} e frequência 100 Hz , proveniente de uma fonte CA ajustável.

A tensão observada no resistor de carga foi monitorada por meio de um osciloscópio digital, configurado para medir a forma de onda resultante da condução do diodo.

As montagens realizadas foram:

1. Um diodo em série com o resistor: configuração clássica de retificação de meia onda.
2. Dois diodos em série: aumento da queda direta total, modificando o limiar de condução.
3. Dois diodos em antissérie: bloqueio mútuo dos semiciclos, resultando em condução mínima.
4. Dois diodos em antiparalelo: cada diodo conduz em um semiciclo, permitindo passagem alternada.
5. Um diodo em série com um filtro capacitivo (capacitor em paralelo com o resistor): implementação de um retificador de meia onda com suavização da tensão.

Para cada uma das cinco montagens, adotou-se o seguinte procedimento:

1. Conectou-se o circuito correspondente na protoboard, verificando a polaridade dos diodos.
2. Ajustou-se a fonte CA para fornecer 8 V_{pp} a 100 Hz .
3. Configurou-se o osciloscópio para registrar a tensão sobre o resistor de carga.
4. Observou-se a forma de onda resultante, anotando suas características gerais, incluindo recortes, distorções, níveis de pico e presença de ripple (quando aplicável).
5. Fotografou-se a tela do osciloscópio para posterior inclusão no relatório.
6. Mediu-se o atraso de condução (delay) associado a cada configuração.

Esses procedimentos possibilitaram a análise comparativa entre o comportamento ideal e o comportamento real dos circuitos retificadores, fornecendo subsídios para a discussão apresentada na seção de resultados.

5. Resultados e Análise dos Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos experimentalmente no levantamento das curvas características do diodo BY127 (Procedimento 2a) e na análise temporal das cinco montagens retificadoras submetidas a sinal senoidal (Procedimento 2b). São discutidos tanto os aspectos quantitativos quanto qualitativos, relacionando-se os fenômenos observados com os modelos teóricos estudados.

5.1. Procedimento 2a: Curvas Características $I_D \times V_D$

A Figura 3 apresenta o arranjo experimental utilizado para o levantamento da curva característica do diodo BY127, incluindo a fonte DC, multímetros e conexões sobre a protoboard. A Figura 4 mostra a protoboard após conclusão da montagem.



Figura 3: Arranjo experimental utilizado no Procedimento 2a.

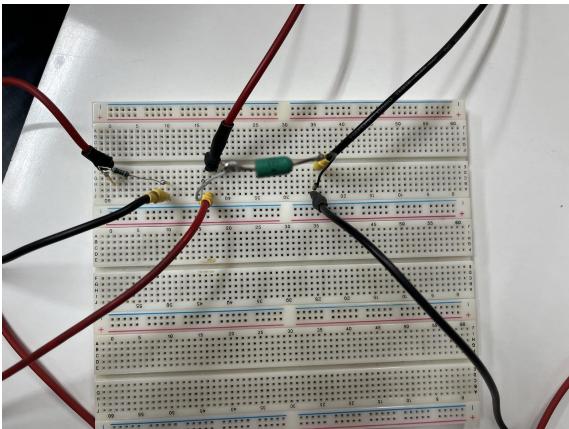


Figura 4: Vista da protoboard após montagem do arranjo do Procedimento 2a.

Os dados experimentais foram obtidos em incrementos de tensão de aproximadamente 0,1 V, sendo a corrente medida diretamente no circuito.

5.1.1 a) Polarização direta (2a1)

A Tabela 1 apresenta os valores experimentais de tensão e corrente obtidos no levantamento da curva característica do diodo BY127.

Table 1: Medidas Realizadas para Levantar a Curva

V_D [V]	I_D [mA]
-0.8	0
0	0
0.1	0
0.2	0
0.3	0
0.4	0
0.5	0.7
0.6	3.3
0.7	29.7
0.71	30.0

A Figura 5 mostra a relação exponencial entre a corrente e a tensão direta, evidenciando o início da condução aproximadamente em 0,5 V.

A análise da Tabela 1 revela que o diodo inicia sua condução significativa a partir de aproximadamente:

$$V_{TH} \approx 0,5 \text{ V},$$

valor compatível com diodos de silício de junção retificadora. Acima desse ponto, observa-se crescimento exponencial da corrente, conforme descrito pela equação de Shockley.

A curva resultante apresenta a região não condutora, a região de transição e a região condutora, reproduzindo adequadamente o comportamento teórico esperado.

5.1.2 b) Polarização reversa (2a2)

A Tabela 2 apresenta os dados medidos com o diodo invertido.

Em todos os pontos medidos, a corrente reversa permaneceu essencialmente nula, indicando que o diodo operou muito abaixo da tensão máxima reversa permitida (800 V).

5.2. Procedimento 2b: Análise Temporal das Mutações Senoidais

Nesta etapa, analisou-se a forma de onda sobre o resistor de carga para cada uma das cinco configurações de circuitos. A tensão aplicada foi senoidal, com amplitude de 8 V_{pp} e frequência de 100 Hz. As figuras abaixo apresentam as formas de onda obtidas no osciloscópio.

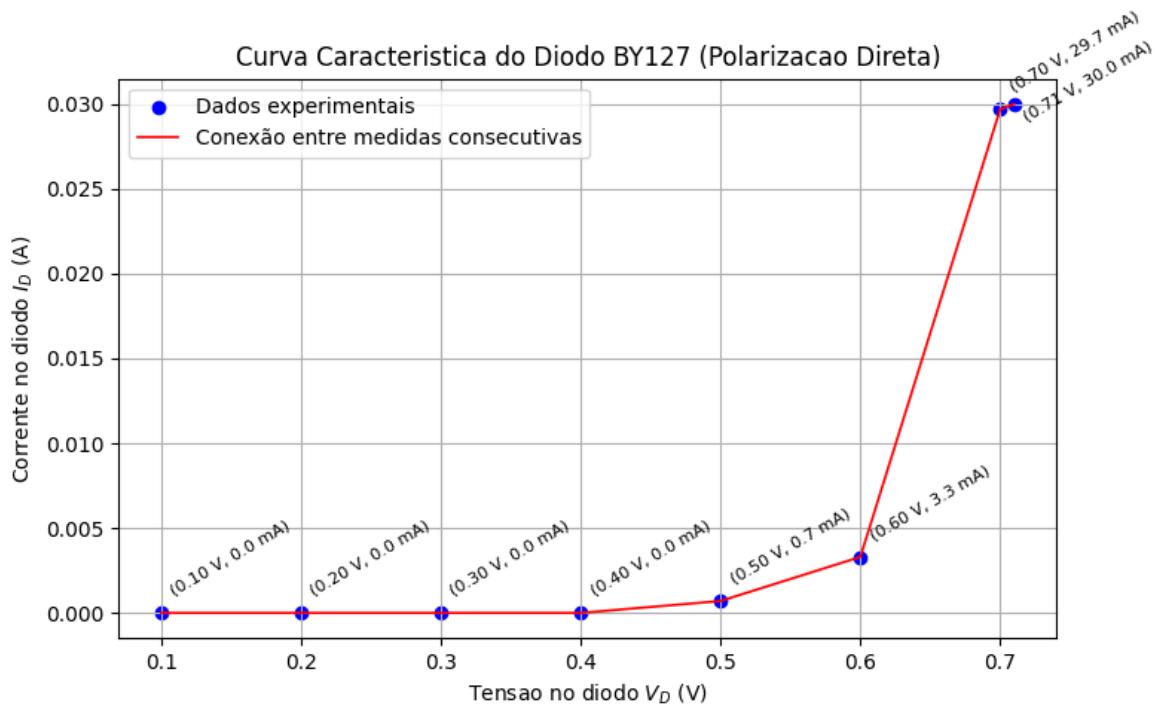


Figura 5: Curva característica experimental $I_D \times V_D$ do diodo BY127.

Table 2: Dados experimentais da polarização reversa (Procedimento 2a2).

V_D (V)	I_D (mA)
0.1	0.0
0.2	0.0
0.5	0.0
1.0	0.0
2.0	0.0
3.0	0.0
5.0	0.0
10.0	0.0
20.0	0.0
30.0	0.0
40.0	0.0
50.0	0.0

5.2.1 Circuito 1: Diodo em série (Retificação de meia onda)

A saída corresponde apenas ao semicírculo positivo da senoide, sendo o semicírculo negativo completamente bloqueado. A forma de onda apresenta valor de pico reduzido devido à queda direta do diodo.

Atraso de condução medido:

$$t_{\text{delay},1} = 120 \text{ us}$$

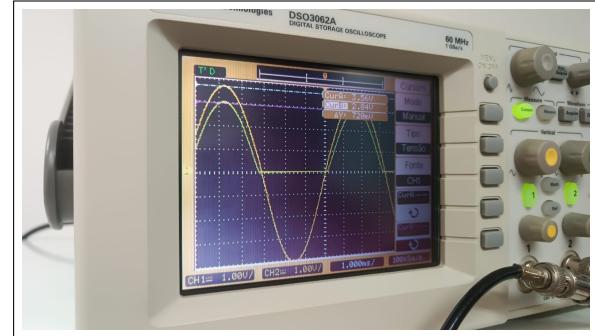


Figura 6: Forma de onda do Circuito 1 (meia onda).

5.2.2 Circuito 2: Dois diodos em série

Com dois diodos em série, a queda total de condução é aproximadamente:

$$V_\gamma \approx 2 \times 0.7 \text{ V} \approx 1.4 \text{ V.}$$

A forma de onda é similar à do circuito 1, porém a condução inicia apenas quando a tensão da fonte supera o valor acima.

$$t_{\text{delay},2} = 240 \text{ us}$$

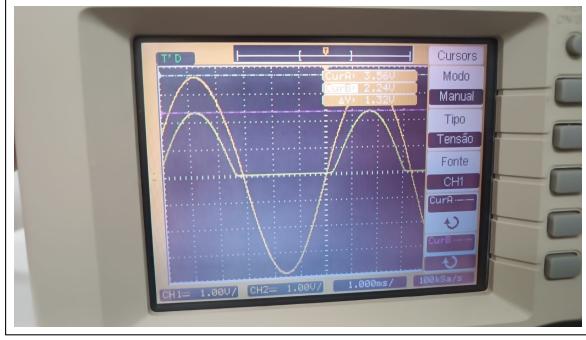


Figura 7: Forma de onda do Circuito 2.

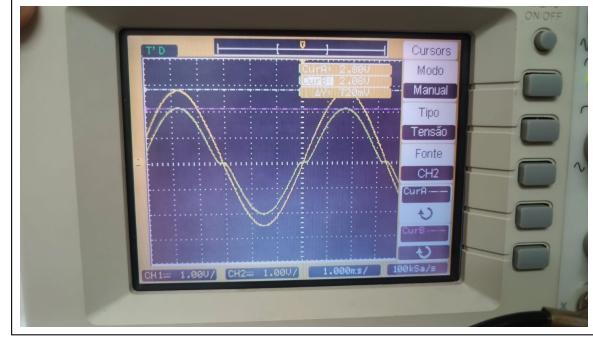


Figura 9: Forma de onda do Circuito 4.

5.2.3 Circuito 3: Dois diodos em antissérie

Nesta configuração, cada semiciclo é bloqueado por um dos diodos, resultando em praticamente nenhuma condução. Apenas pequenos pulsos podem ser observados devido à capacidade de junção.

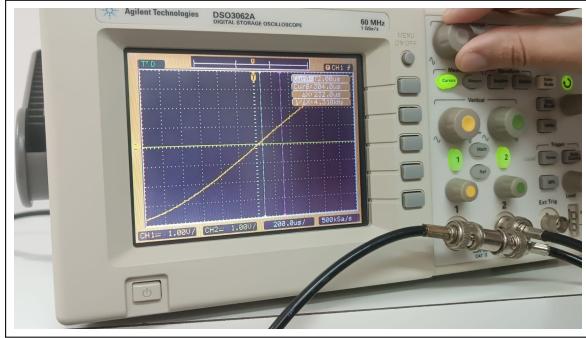


Figura 8: Forma de onda do Circuito 3.

$$t_{\text{delay},3} = 0$$

5.2.4 Circuito 4: Dois diodos em antiparalelo

Um diodo conduz no semiciclo positivo e o outro conduz no semiciclo negativo. A forma de onda resultante apresenta ambos os semiciclos, porém recortados no início devido à queda V_γ .

$$t_{\text{delay},4} = 540 \text{ us}$$

5.2.5 Circuito 5: Diodo com filtro capacitivo (meia onda filtrada)

Com a inclusão de um capacitor em paralelo ao resistor, observa-se um processo de carga rápida durante a condução e descarga lenta entre os picos, produzindo tensão suavizada e ondulação (ripple) reduzida.

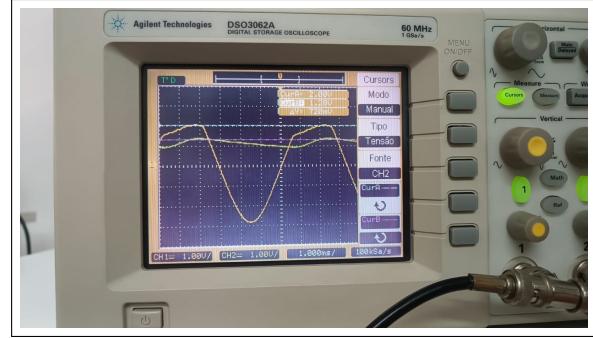


Figura 10: Forma de onda do Circuito 5.

$$t_{\text{delay},5} = 520 \text{ ms}$$

Para esse circuito, cabe observação quanto à tensão do pico superior, que apresenta uma distorção, quando, na verdade, esperava-se um espelhamento do semi-ciclo inferior. Conforme discutido em laboratório, isso ocorre devido ao descasamento de impedância entre o osciloscópio e a carga representada pelo circuito medido, o que propicia reflexões de ondas eletromagnéticas no circuito e, consequentemente, a distorção observada.

De forma resumida, a Tabela 3 apresenta os valores de defasagem e atenuação medidos para cada circuito analisado.

Table 3: Defasagem e Atenuação dos Circuitos

Círculo	Defasagem [us]	Atenuação [V]
1	120	0.720
2	240	1.32
3	-	-
4	148	0.720
5	520	0.720

5.3. Análise dos Resultados Experimentais

A. Curva característica do diodo BY127.

A análise dos valores apresentados na Tabela 1 e da curva mostrada na Figura 5 evidencia o comportamento típico do diodo BY127 sob diferentes condições de polarização.

Observa-se que, quando submetido à polarização direta, o dispositivo inicia a condução de corrente de forma significativa apenas para tensões superiores a aproximadamente 0,6 V. Por outro lado, para valores de V_D inferiores a zero, correspondentes à polarização reversa, não foi registrada condução apreciável, mantendo-se a corrente praticamente nula.

Esse comportamento está em consonância com as especificações presentes no datasheet do BY127, que indicam tensão de limiar entre 0,6 V e 0,8 V e corrente desprezível na região de polarização reversa. Assim, os resultados obtidos confirmam o regime de operação esperado para esse tipo de diodo retificador.

B. Análise de Circuitos com diodos BY127.

Os resultados referentes à segunda parte do experimento, sintetizados na Tabela 3, permitem observar que o diodo real pode ser interpretado como um diodo ideal acrescido de uma queda de tensão em série. Essa característica manifesta-se diretamente na atenuação verificada entre as tensões de entrada e saída, evidenciando o comportamento não ideal do componente.

A Figura 6 ilustra o funcionamento típico de um retificador de meia onda: a condução ocorre apenas durante a semiciclo positivo, enquanto a polarização reversa do diodo bloqueia a passagem de corrente no semiciclo negativo. Já a Figura 7 apresenta maior atenuação relativa, resultado da utilização de dois diodos em série, cada um contribuindo com sua respectiva queda de tensão.

Na configuração ilustrada na Figura 8, os diodos encontram-se polarizados de forma oposta, o que impede a condução em ambos os semicírculos e faz com que o circuito se comporte como um circuito aberto, independentemente da tensão aplicada. Em contraste, no caso mostrado na Figura 8, os diodos estão dispostos em paralelo, de modo que o caminho de condução depende da polaridade da fonte: o diodo superior conduz na polarização direta e o inferior conduz na polarização reversa.

Por fim, o circuito correspondente à Figura 9 representa um retificador com capacitor de filtro, também conhecido como retificador de pico. Nesse arranjo, considerando V_{in} , V_{out} e V_t como as tensões de entrada, saída e queda no diodo, respectivamente, observam-se dois regimes distintos. Inicialmente, quando $V_{in} > V_{out}$, o diodo conduz e o capacitor carrega até o valor

máximo da onda de entrada. Em seguida, com o diodo despolarizado, o capacitor passa a fornecer energia à carga, produzindo uma descarga exponencial dada por $V_{out} = V_{in} e^{-t/RC}$. Quando a tensão de entrada volta a superar a tensão no capacitor, o ciclo de carga se reinicia.

Em síntese, os resultados experimentais confirmam o comportamento teórico do diodo semicondutor. A curva direta apresentou limiar próximo de 0,5 V, enquanto a curva reversa manteve corrente praticamente nula, evidenciando o adequado bloqueio reverso. Nos circuitos retificadores, cada topologia apresentou características condizentes com sua função prevista, validando os conceitos de condução seletiva, recorte de semicírculo, e filtragem capacitiva.

6. Conclusões

O experimento permitiu a análise detalhada do comportamento elétrico do diodo semicondutor BY127, tanto no regime estático (curva característica $I_D \times V_D$) quanto no regime dinâmico, quando submetido a sinal senoidal em diversas configurações de retificação. Os resultados obtidos na polarização direta evidenciaram uma tensão limiar de condução próxima de 0,5 V, valor típico para diodos de silício, enquanto a polarização reversa apresentou corrente praticamente nula em toda a faixa de tensões aplicada, confirmando a elevada capacidade de bloqueio reverso do dispositivo.

A análise das cinco montagens retificadoras demonstrou com clareza as funcionalidades individuais de cada topologia. O circuito de meia onda (Circuito 1) confirmou o comportamento de condução unilateral, enquanto a inclusão de dois diodos em série (Circuito 2) evidenciou o aumento da tensão mínima necessária para início da condução. A configuração antissérie (Circuito 3) mostrou-se eficaz no bloqueio mútuo dos semicírculos, resultando em condução mínima. Por outro lado, o circuito em antiparalelo (Circuito 4) permitiu a condução alternada, produzindo uma forma de onda bidirecional limitada pela queda direta de cada diodo. Finalmente, a configuração com filtro capacitivo (Circuito 5) demonstrou uma significativa redução da ondulação (ripple), evidenciando o processo de carga e descarga do capacitor e sua importância na suavização da tensão retificada.

De forma geral, os objetivos propostos foram plenamente alcançados. Os resultados experimentais mostraram-se coerentes com os modelos teóricos estudados, e permitiram observar fenômenos essenciais à eletrônica de potência e à conversão AC–DC. A atividade também contribuiu para o desenvolvimento de habilidades práticas, incluindo a montagem de circuitos, uso de instrumentos de medição e análise crítica de da-

dos.

Como sugestões para aprimoramentos futuros, recomenda-se: (i) investigar o comportamento do diodo sob sinais de diferentes frequências; (ii) comparar o desempenho de diferentes tipos de diodos (retificadores, zener, Schottky); (iii) utilizar capacitores de distintos valores para análise quantitativa do ripple; e (iv) explorar medições adicionais, como tempo de recuperação reversa e potência dissipada.

Os conhecimentos adquiridos neste experimento constituem uma base sólida para estudos avançados envolvendo dispositivos semicondutores e circuitos retificadores, evidenciando a relevância prática e teórica do tema no contexto da engenharia eletrônica.

Referências bibliográficas

- [1] Artemis M. Ceschin. Apostila de Materiais Elétricos e Magnéticos. 2000. Apostila. 35
 - [2] Sérgio M. Rezende. A Física de Materiais e Dispositivos Eletrônicos. Editora da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1996. 36
 - [3] Vishay. Miniature glass passivated junction rectifier, by127mgp datasheet, mar 2012. Datasheet, 12/03/2012. 37
 - [4] Vishay. Miniature glass passivated junction rectifier, by127mgp datasheet, mar 2012. Datasheet, 12/03/2012. 38
 - [5] Vishay. Miniature glass passivated junction rectifier, by127mgp datasheet, mar 2012. Datasheet, 12/03/2012. 39
 - [6] Vishay. Miniature glass passivated junction rectifier, by127mgp datasheet, mar 2012. Datasheet, 12/03/2012. 40
 - [7] Vishay. Miniature glass passivated junction rectifier, by127mgp datasheet, mar 2012. Datasheet, 12/03/2012. 41

A. Script Python de plotagem dos dados da tabela.

```

# Rotulos junto aos pontos
for x, y in zip(Vd, Id):
    if y==0.03:
        break;
    plt.text(x + 0.005, y+0.001, f'({x:.2f},{y*1000:.1f})',
              fontsize=8, color='black',
              rotation=30)
plt.text(x + 0.005, y-0.001, f'({0.71:.2f},{0.03*1000:.1f})',
          fontsize=8, color='black',
          rotation=30)

plt.xlabel('Tensao no diodo $V_D(V)$')
plt.ylabel('Corrente no diodo $I_D(A)$')
plt.title('Curva Caracteristica do Diodo  
BY127 (Polarizacao Direta)')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()

# Exibir valores no terminal
print("Dados experimentais utilizados $(V_D, I_D)$:")
for x, y in zip(Vd, Id):
    print(f"${x:.2f}V$-$>${y*1000:.1f}A$")

```

Código 1: Levantamento dos pontos da curva característica do diodo

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Dados experimentais do procedimento 2a1 (polarizacao direta)
5 # Tensao aplicada (V)
6 Vd = np.array([0.10, 0.20, 0.30, 0.40,
7                 0.50, 0.60, 0.70, 0.71])
8
9 # Corrente medida (mA) -> conversao para A
10 Id_mA = np.array([0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
11                     0.7, 3.3, 29.7, 30.0])
12 Id = Id_mA / 1000.0 # Converte de mA para A
13
14 # Plot da curva I x V
15 plt.figure(figsize=(8,5))
16
17 # Pontos experimentais
18 plt.scatter(Vd, Id, color='blue', label='Dados experimentais')
19
20 # Linhas conectando os pontos
21 plt.plot(Vd, Id, color='red', linestyle='-', linewidth=1.2, label='Conexao entre medidas consecutivas')

```