

4º experimento - Diodo 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 [?].

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

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

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 [?]. 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 Vpp. 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 $1\text{ k}\Omega$;
- Capacitor de $10\text{ }\mu\text{F}$
- 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 reprodutibilidade. 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 ??), 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 $100\text{ }\Omega$ ($\pm 5\%$) 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 $0,1\text{ V}$.
2. Mediu-se a corrente total do circuito utilizando um amperímetro digital conectado em série.
3. Registrou-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 $0,1\text{ V}$, 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.

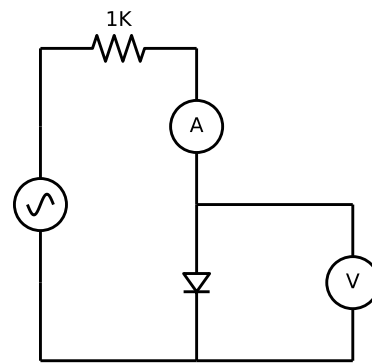


Figura 1: Circuito do procedimento A

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 $0,1\text{ V}$.
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 ?. 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.

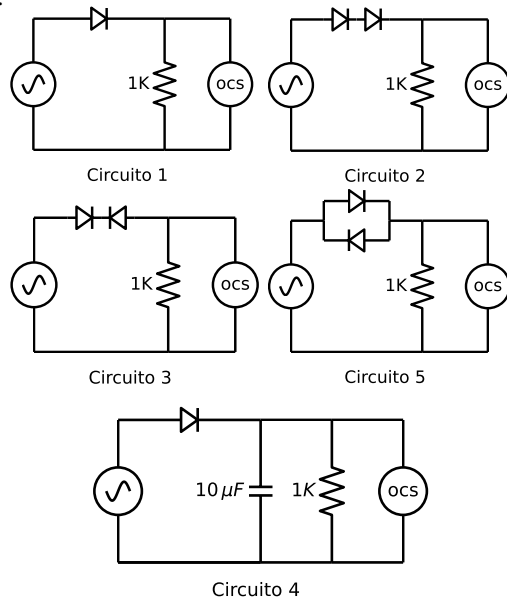


Figura 2: Circuitos do procedimento B

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 ?? 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 ?? mostra a protoboard após conclusão da montagem.

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

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

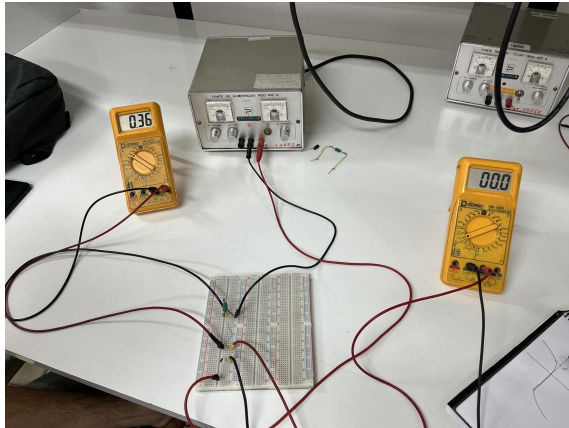


Figura 3: Arranjo experimental utilizado no Procedimento 2a.

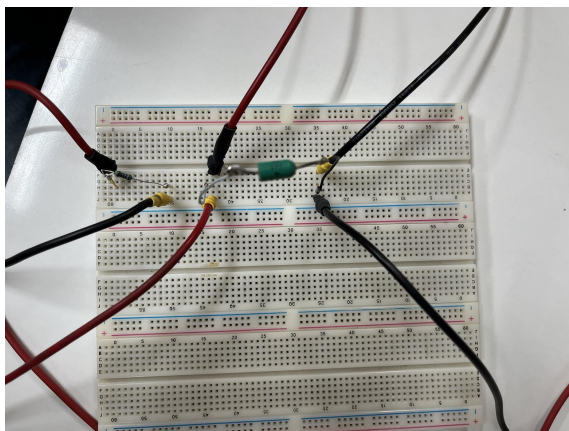


Figura 4: Vista da protoboard após montagem do arranjo do Procedimento 2a.

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 análise da Tabela ?? 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 ?? apresenta os dados medidos com o diodo invertido.

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

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 Montagens 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.

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

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

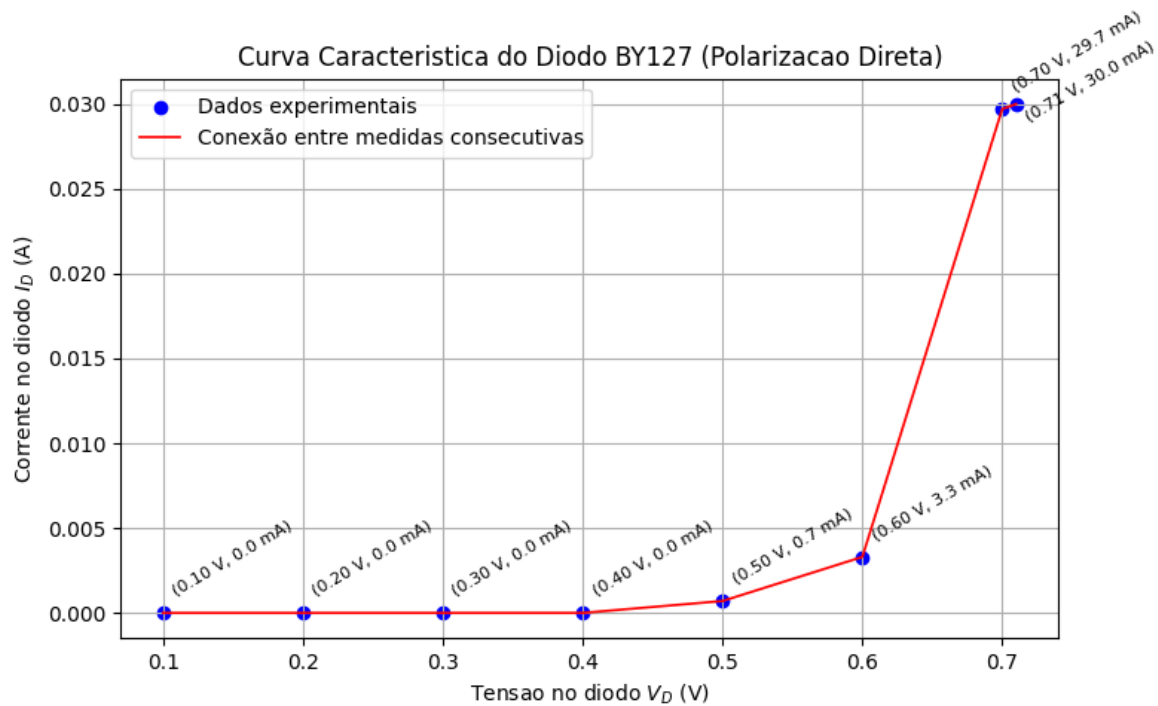


Figura 5: Curva característica experimental $I_D \times V_D$ do diodo BY127.

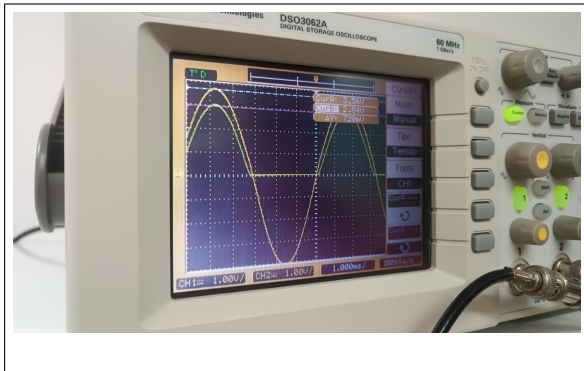


Figura 6: Forma de onda do Circuito 1 (meia onda).

Atraso de condução medido:

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

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.

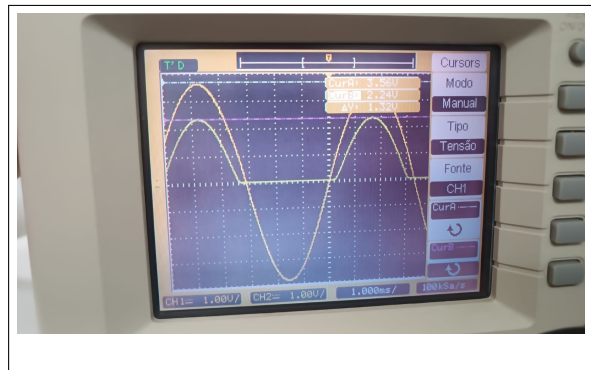


Figura 7: Forma de onda do Circuito 2.

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

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 capacitância de junção.

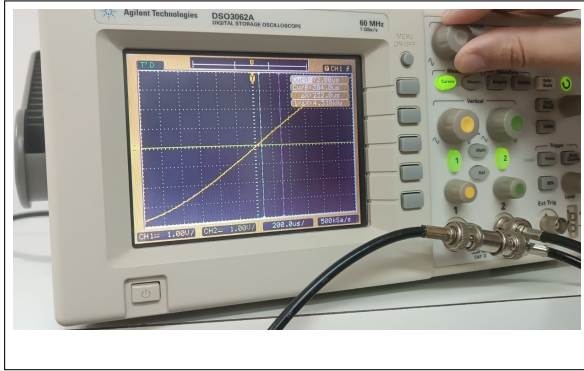


Figura 8: Forma de onda do Circuito 3.

$$t_{\text{delay},3} == 148 \text{ us}$$

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 .

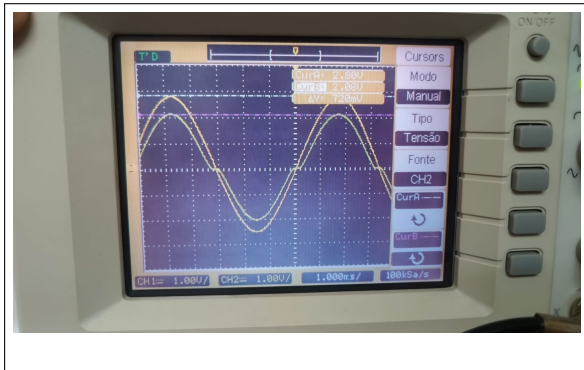


Figura 9: Forma de onda do Circuito 4.

$$t_{\text{delay},4} = 520 \text{ us}$$

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.

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

Para esse circuito, cabe observação quanto à tensão do pico superior, que apresenta uma distorção, quando, na ver-

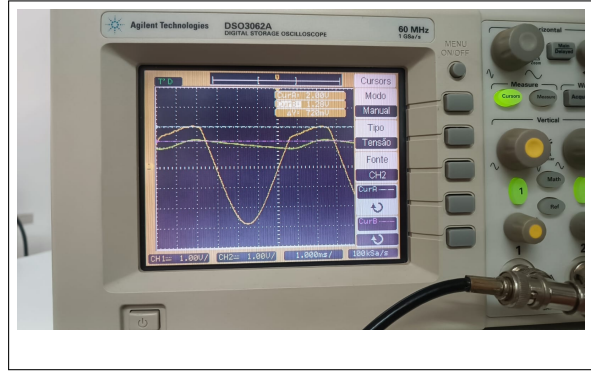


Figura 10: Forma de onda do Circuito 5.

dade, 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, conseqüentemente, a distorção observada.

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

Table 3: Defasagem e Atenuação dos Circuitos

Circuito	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 ?? e da curva mostrada na Figura ?? 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 de

sprezível 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 ??, 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 ?? 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 ?? 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 ??, os diodos encontram-se polarizados de forma oposta, o que impede a condução em ambos os semiciclos 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 ?? 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 semiciclo, 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 semiciclos, 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 dados.

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.

A. Script Python de plotagem dos dados da tabela

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')
22
23 # Rotulos junto aos pontos
24 for x, y in zip(Vd, Id):
25     if y==0.03:
26         break;
27     plt.text(x + 0.005, y+0.001, f'({x:.2f}
  _V,_{y*1000:.1f}_mA)',
28             fontsize=8, color='black',
29             rotation=30)
30 plt.text(x + 0.005, y-0.001, f'({0.71:.2f}_
  V,_{0.03*1000:.1f}_mA)',
31          fontsize=8, color='black',
32          rotation=30)
33
34 plt.xlabel('Tensao_no_diodo_$V_D$(V)')
35 plt.ylabel('Corrente_no_diodo_$I_D$(A)')
36 plt.title('Curva_Caracteristica_do_Diodo_
  BY127_(Polarizacao_Direta)')
37
38 plt.grid(True)
39 plt.legend()
40 plt.tight_layout()
41 plt.show()
42
43 # Exibir valores no terminal
44 print("Dados_experimentais_utilizados_(V_D,
  _I_D):")
45 for x, y in zip(Vd, Id):
46     print(f"{x:.2f}_V_{y*1000:.1f}_mA"
  )

```