



## Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Divinópolis

Engenharia Mecatrônica 6º período

Prof. Nelson de Figueiredo Barroso

### Estudo dirigido 01 (03/11/2021) – Diodos

**Alunos:** Luiza Gomes de Castro e Sá  
Thiago José da Silva

- 1) Defina camada de depleção e descreva, em termos de lacunas e elétrons livres, o seu comportamento quando o diodo não está polarizado, na polarização direta e na polarização reversa.

#### Resposta:

Semicondutores tipo n são formados a partir da dopagem do silício com impurezas pentavalentes gerando elétrons livres. Desse modo os elétrons livres passam a ser portadores majoritários e as lacunas são portadores minoritários. Semicondutores do tipo p são formados a partir da dopagem do silício com impurezas trivalentes gerando lacunas. Desse modo as lacunas passam a ser portadores majoritários e os elétrons livres são portadores minoritários.

- Diodo não polarizado: Quando ocorre a união de materiais tipo P e N, surge a junção PN, também conhecida como diodo. Com a junção, os elétrons livres do material tipo N tendem a se mover para o material tipo P, se unindo a uma lacuna e provocando o surgimento de íons. Na região tipo N surgem íons positivos, conhecidos como cátions, e na região tipo P surgem íons negativos, conhecidos como ânions. Estes íons se localizam próximo a região de junção dos materiais.

Surge então a camada de depleção, a região vazia de portadores. Surge também um campo elétrico entre os íons positivos e os íons negativos, esta diferença de potencial é chamada de barreira de potencial.

- Polarização direta: esta polarização ocorre quando o terminal negativo da fonte é conectado ao material tipo N, e o terminal positivo é conectado ao material tipo P.

Com isso, o elétrons da fonte repelem os elétrons livres do diodo, forçando-os a ficarem próximos a camada de depleção. De maneira análoga, a fonte repele as lacunas forçando-as a ficarem próximas a camada de depleção. Desse modo, a camada de depleção irá diminuir.

No momento em que a tensão da fonte for maior que a tensão da barreira potencial, a camada de depleção será desfeita, permitindo que os elétrons livres possam recombinar com as lacunas, permitindo assim a passagem de corrente no diodo.

- Polarização reversa: o terminal positivo da fonte é conectado ao material tipo P, enquanto que o terminal negativo da fonte é conectado ao material tipo N.

Desse modo, o terminal negativo atrai as lacunas para longe da camada de depleção, e o terminal positivo atrai os elétrons livres para a região mais externa do material tipo P. Com isso, a camada de depleção aumenta, impedindo assim a passagem de corrente. A camada de depleção pode aumentar até que a tensão da barreira de potencial seja igual a tensão da fonte.

Em suma, a polarização direta permite a passagem de corrente pelo diodo, enquanto que a polarização reversa impede a passagem de corrente.

2) Além do comportamento ideal de um diodo, existem outros efeitos causados pela temperatura, pelas imperfeições do cristal, pelo excesso de dopagem e pela tensão reversa. Com isso em mente, defina:

- a) Corrente de saturação.
- b) Corrente de fuga de superfície.
- c) Ruptura / efeito avalanche.
- d) Efeito Zener / Emissão de alto campo.

*Ref.: Malvino, A. P., Eletrônica, Volume I, Cap. 2.*

### **Resposta:**

- a) A corrente de saturação ocorre quando a energia térmica gera um elétron livre e uma lacuna próximos a camada de depleção, com isso torna-se possível o movimento, em pequena quantidade, de elétrons livres, gerando uma pequena corrente contínua. É uma corrente causada termicamente por portadores minoritários.
- b) A corrente de fuga da superfície é causada pelas impurezas da superfície e imperfeições na estrutura do cristal
- c) O efeito avalanche produz muitos elétrons livres e lacunas na camada de depleção. Isso ocorre quando tem-se uma tensão reversa muito alta, atingindo a tensão de rup-

tura do diodo, fazendo com que uma grande quantidade de portadores minoritários apareçam de repente na camada de depleção e o diodo conduza intensamente.

- d) O efeito zener é análogo ao efeito avalanche, no entanto ocorre no diodo Zener. O efeito zener pode ser definido da seguinte forma: mesmo com uma grande variação de corrente no diodo, a tensão sobre ele varia muito pouco, quando varia.

- 3) Leia o material complementar indicado a seguir e descreva como são construídos os diodos e transistores. *Ref.: Malvino, A. P., Eletrônica, Volume II, Cap. 17, seção 17.1.*

### Resposta:

- Transistores:

Inicialmente, o fabricante produz um cristal tipo p de vários centímetros de comprimento, logo após, esse cristal é cortado em várias fatias finas. Um dos lados da fatia é limpo e polido para eliminar suas imperfeições, essa camada é chamada de substrato p. Em seguida, as fatias são colocadas em um forno. Sobre as fatias, é colocado uma mistura gasosa de átomos de silício e átomos pentavalentes, desse modo uma fina camada de semiconductor tipo n é formado na superfície aquecida, esta fina camada é chamada de camada epitaxial.

Posteriormente é colocado oxigênio puro sobre a cama epitaxial, a fim de evitar possíveis contaminações. Então os átomos de oxigênio se combinam com os átomos de silício, originando uma camada de dióxido de silício, essa camada impede outras reações químicas. Esta selagem recebe o nome de passivação. A fatia então é cortada em áreas retangulares.

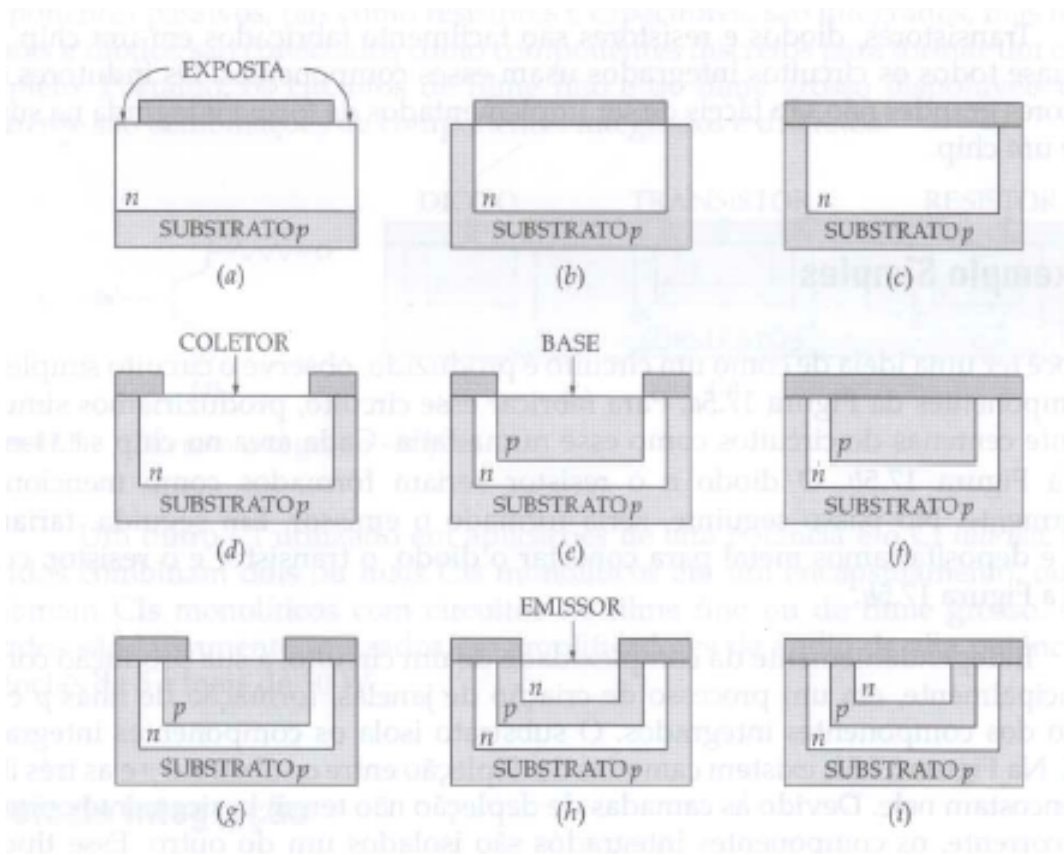
Após a fatia ser cortada em áreas retangulares, uma parte do dióxido de silício é removida quimicamente, expondo-se a camada epitaxial. A fatia é colocada em um forno, no qual os átomos trivalentes irão se difundir na camada epitaxial. Desse modo, a camada tipo n torna-se uma camada tipo p.

Novamente é colocado oxigênio puro na superfície para a formação da camada de dióxido de silício. É retirada então, a cada de  $SiO_2$  da região central, a abertura resultante é chamada de janela. Os átomos trivalentes passam através desta janela. Eles então se difundem na camada epitaxial e formam uma ilha de material tipo p. Em seguida, a camada de  $SiO_2$  é novamente reconstruída.

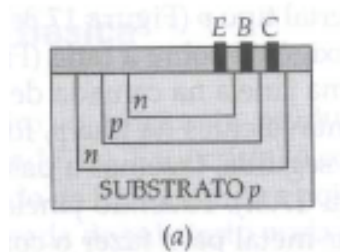
É produzido quimicamente uma janela na camada de dióxido de silício, expondo a ilha p, formando assim o emissor. Difunde-se átomos pentavalentes na região p, originando uma pequena região n. Outra vez é realizada a passivação com o oxigênio puro.

Faz-se janelas na camada de  $SiO_2$  por remoção química, permitindo o depósito de metal para fazer o contato elétrico com o emissor, a base e coletor. Todo este processo resulta no transistor integrado.

A imagem abaixo, retirada do livro Eletrônica, vol 2, Malvino, apresenta o passo-a-passo do processo.



**Figura 1:** Processo de fabricação de um transistor



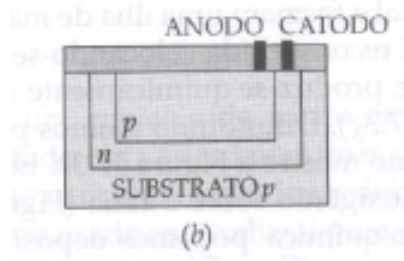
**Figura 2:** Transistor formado pelo processo

- Diodos:

A fabricação do diodo segue o mesmo processo de fabricação do transistor, até o ponto onde a ilha p é formada e selada pelo processo de passivação Figura (1)-f.

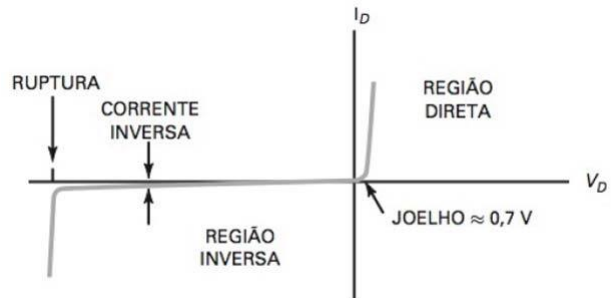
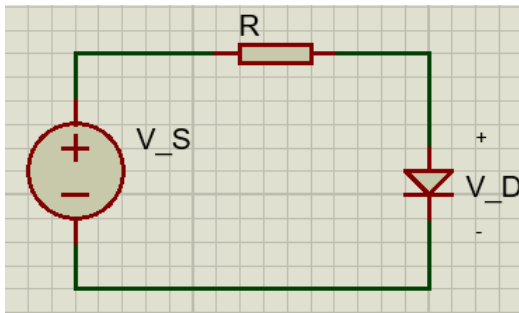
Após este passo, são feitas janelas com a finalidade de expor as ilhas p e n. é então, depositado metal através das janelas, realizando o contato elétrico com catodo e o anodo do diodo integrado.

Ao fim do processo, obtêm-se o seguinte componente:



**Figura 3:** Transistor formado pelo processo

- 4) O gráfico a seguir mostra a curva de diodo retificador. Com base nesse gráfico explique o comportamento do diodo para as diferentes regiões indicadas (direta, inversa e ruptura). Defina também o que é tensão de joelho e a tensão de ruptura e relacione tais parâmetros com a barreira de potencial na polarização direta e inversa.



### Resposta:

Analisando o gráfico é possível observar que, quando o diodo está polarizado diretamente, ou seja atuando na região direta do gráfico, não há uma corrente significativa até que a camada de depleção seja rompida, isso ocorre quando a fonte alcança a tensão de joelho, valor em que a corrente aumenta rapidamente, aproximadamente 0,7V. Ao atingir a tensão de joelho, ocorre o rompimento da camada de depleção, ou barreira de potencial.

Na região inversa, diodo polarizado reversamente, é possível observar que o fluxo de corrente é mínimo, conhecida como corrente de fuga, isso devido ao aumento da camada de depleção, impedindo assim a passagem de elétrons. No entanto, observa-se que a corrente aumenta repentinamente ao atingir a ruptura.

A ruptura ocorre quando a tensão de ruptura é atingida. Tal tensão representa o limite que o diodo consegue impedir a passagem de corrente, neste momento a camada de depleção está no seu máximo. Após atingida esta tensão, o diodo sofre uma grande descarga e devido a um processo conhecido como avalanche, acaba sendo destruído.

Devido a isso, a corrente sofre tal aumento.

- 5) Baixe a folha de dados de um diodo de sua preferência, com exceção do diodo 1N4001. Defina e identifique as características a seguir: Tensão de ruptura reversa; Corrente máxima direta; Queda de tensão direta; Corrente reversa máxima.

**Resposta:**

Definindo os termos:

- Tensão de ruptura reversa: é a tensão máxima reversa que o diodo pode suportar. Após atingida esta tensão, o diodo sofre o efeito avalanche, o que provoca a perda de suas características operacionais.
- Corrente máxima direta: é a máxima corrente que circula pelo diodo quando o diodo está polarizado diretamente, sem que ele queime.
- Queda de tensão direta: é a tensão mínima necessária para que a camada de depleção permita a movimentação dos portadores, e consequentemente o fluxo de corrente.
- Corrente reversa máxima: é a corrente que circula pelo diodo quando ele é polarizado com a tensão inversa máxima. Também é conhecida como corrente de fuga.

Para tal análise foi escolhido o diodo P600K. Para acessar o datasheet [clique aqui](#).

- Tensão de ruptura reversa: 800 V
- Corrente máxima direta: 6.0 A
- Queda de tensão direta: 0.9 V
- Corrente reversa máxima:

$T_A = 25^\circ \text{ C}$	5.0 $\mu\text{A}$
$T_A = 100^\circ \text{ C}$	1.0 mA

- 6) Explique como estimar a resistência de corpo de um diodo retificador. *Ref.: Malvino, A. P., Eletrônica, Volume I, Cap. 3, seções 3.11 e 3.13.*

**Resposta:**

A resistência de corpo é a soma das resistências ôhmicas dos materiais tipo N e P de um diodo. Tal resistência é responsável por impedir a corrente de fluir, após rompida a camada de depleção. Ela pode ser calculada pela seguinte equação:

$$R_B = R_P + R_N \quad (1)$$

em que,  $R_B$  é a resistência de corpo,  $R_P$  é a resistência da região P e  $R_N$  é a resistência da região N.

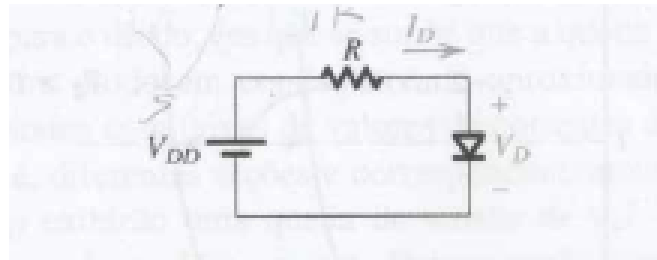
No entanto, os datasheets dos diodos não informam a resistência separada de cada região. Há algumas informações que permitem o cálculo deste valor:

$$R_B = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \quad (2)$$

em que  $V_1$  e  $I_1$  são a tensão e a corrente em algum ponto no joelho ou acima;  $V_2$  e  $I_2$  são a tensão e a corrente em algum ponto bem acima do joelho na curva do diodo.

- 7) Descreva o modelo exponencial para a curva característica do diodo na região de polarização direta. Explique como se dá a análise gráfica e iterativa utilizando-se tal modelo. *Sedra / Smith, Microeletrônica, Cap. 3, seções 3.2 e 3.3 até subseção 3.3.4.*

**Resposta:** O modelo exponencial é o mais preciso para operação do diodo na região de polarização direta, no entanto, por ser não-linear sua utilização torna-se difícil.



**Figura 4:** Circuito exemplo

Analisando o circuito acima, considerando que  $V_{DD}$  seja muito maior que  $I_S$ , tem-se a seguinte equação:

$$I_D = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} \quad (3)$$

Outra equação que pode descrever o circuito é:

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} \quad (4)$$

- Análise gráfica:

A análise gráfica é realizada plotando o gráfico no plano  $i - v$ , das equações (3) e (4). A solução gráfica é obtida pelas coordenadas do ponto de interseção dos dois gráficos.

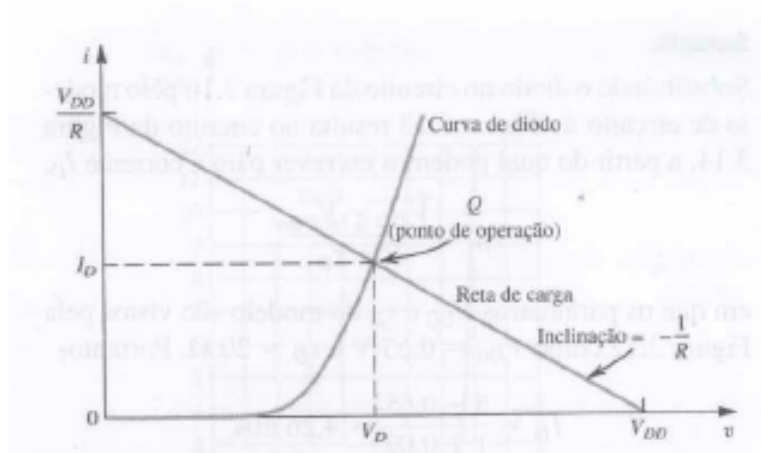


Figura 5: Gráfico do modelo exponencial

Na figura 5, a curva representa a equação exponencial do diodo (3), enquanto que a linha representa a equação (4), esta reta recebe o nome de reta de carga.

A reta de carga intercepta a curva do diodo no ponto Q, este ponto é denominado ponto de operação do circuito, suas coordenadas representam os valores de  $I_D$  e  $V_D$ .

- Análise iterativa:

As equações (3) e (4) podem ser solucionados usando-se um procedimento iterativo simples, como no exemplo abaixo.

Utilizando o mesmo circuito apresentado anteriormente (figura 4) e considerando:  $V_{DD} = 5V$  e  $R = 1k\Omega$ , a corrente do diodo sendo  $1mA$  para uma tensão de  $0,7V$  e com a queda de tensão que varia de  $0,1V$  para cada década de variação na corrente, é possível determinar os valores da corrente  $I_D$  e da tensão  $V_D$ .

Inicia-se a interação supondo  $V_D = 0,7V$ :

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0,7}{1} = 4,3mA \quad (5)$$

Agora, para obter um valor mais preciso de  $V_D$ , usa-se a equação do diodo:

$$V_2 - V_1 = 2,3nV_T \log \frac{I_2}{I_1} \quad (6)$$

Onde:

- $2,3nV_T = 0,1V$ ;
- $V_1 = 0,7V$ ;
- $I_1 = 1mA$ ;



$$- I_2 = 4,3\text{mA};$$

$$V_2 = V_1 + 2,3nV_T \log \frac{I_2}{I_1} \quad (7)$$

$$V_2 = 0,7 + 0,1 \log \frac{4,3}{1}$$

$$V_2 = 0,763\text{V}$$

Assim, com a primeira iteração:  $V_D = 0,763\text{V}$  e  $I_D = 4,3\text{ mA}$ . Na segunda iteração, de maneira similar:

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0,763}{1} = 4,237\text{mA} \quad (8)$$

$$V_2 = 0,763 + 0,1 \log \frac{4,237}{4,3} \quad (9)$$

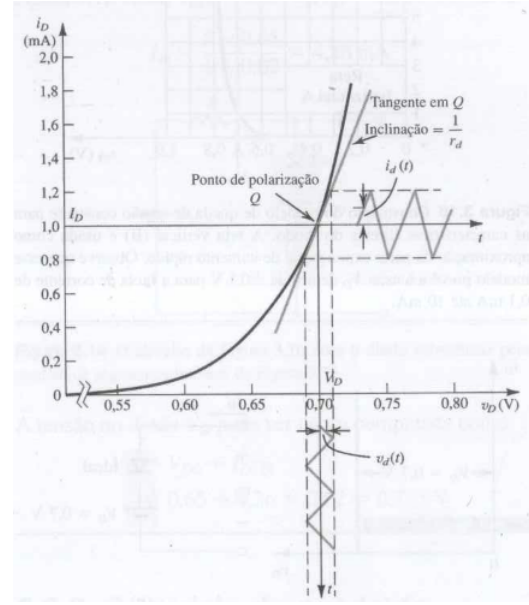
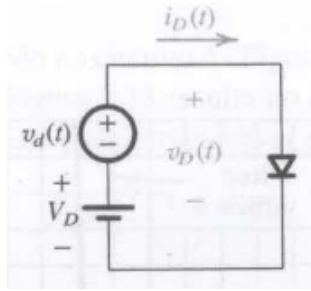
$$V_2 = 0,762\text{V}$$

Dessa forma, na segunda iteração obteve-se:  $I_D=4,237\text{ mA}$  e  $V_D=0,762\text{V}$ . Fica explícito que esses valores obtidos nas duas iterações são muito próximos e portanto, não é necessário outras iterações. A solução é  $I_D=4,237\text{ mA}$  e  $V_D=0,762\text{V}$ .

- 8) Descreva o modelo para pequenos sinais e explique quando esta aproximação é válida. *Sedra / Smith, Microeletrônica, subseção 3.3.8.*

**Resposta:** No modelo para pequenos sinais o diodo é polarizado para operar em um ponto sobre a característica direta  $i-v$  e um pequeno sinal  $ca$  é sobreposto aos valores  $cc$ . Nesse caso, deve-se, inicialmente, determinar o ponto de operação do diodo ( $V_D$  e  $I_D$ ) e, depois, para analisar o comportamento do diodo para pequenos sinais em torno do ponto  $cc$  de polarização, o diodo é mais bem modelado por uma resistência de valor igual ao inverso da inclinação da tangente à curva característica  $i-v$  no ponto de polarização.

Considerando o circuito abaixo:



Na ausência de  $v_d(t)$ , a tensão no diodo é igual a  $V_D$  e ele conduz a uma corrente cc,  $I_D$ , dada por

$$I_D = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} \quad (10)$$

Quando o sinal  $v_d(t)$  for aplicado, a tensão e a corrente total instantânea no diodo são:

$$v_D(t) = V_D + v_d(t) \quad (11)$$

E,

$$i_D(t) = I_S e^{\frac{v_D}{nV_T}} \quad (12)$$

Substituindo (11) em (12)

$$i_D(t) = I_S e^{\frac{V_D + v_d}{nV_T}} \quad (13)$$

$$i_D(t) = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} e^{\frac{v_d}{nV_T}}$$

E, agora, com a equação (10):

$$i_D(t) = I_D e^{\frac{v_d}{nV_T}} \quad (14)$$

Para um sinal  $v_d(t)$  de pequena amplitude, onde se possa considerar

$$\frac{v_d}{nV_T} \gg 1 \quad (15)$$

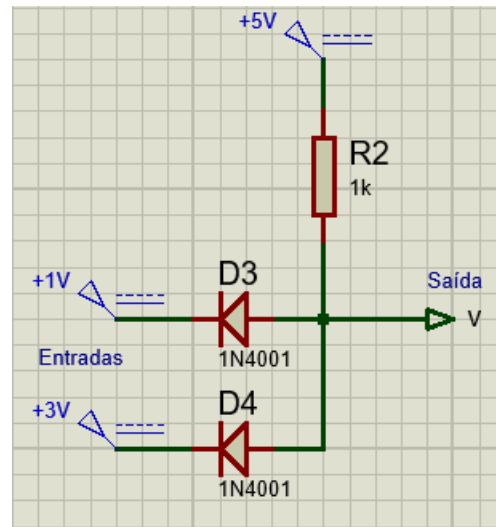
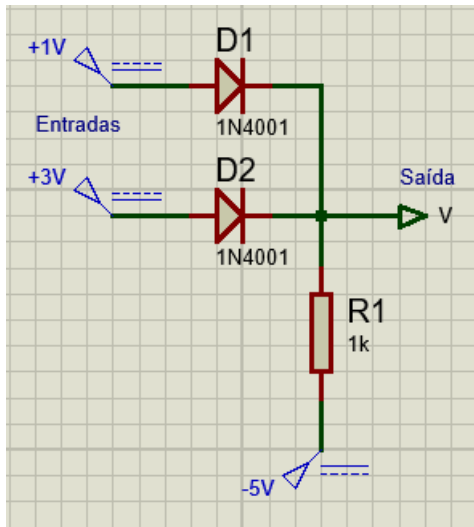
Então podemos expandir a equação (14) em uma série truncada após os dois primeiros termos para obter a seguintes expressão aproximada:

$$i_D(t) \approx I_D \left( 1 + \frac{v_d}{nV_T} \right) \quad (16)$$

Essa é a aproximação para pequenos sinais. Ela é válida para sinais cujas amplitudes são menores que 10mV quando  $n=2$  ou 5mV quando  $n=1$ .

### Modelos Matemáticos para os diodos

- 9) Para cada um dos circuitos a seguir, utilizando o modelo ideal para os diodos, calcule o valor das tensões de saída,  $V$ , e das correntes,  $I$ , nos resistores  $R_1$  e  $R_2$ .



### Resposta:

- Circuito 1:

Para calcular a tensão na saída e a corrente no resistor  $R_1$  é necessário realizar a análise da polarização dos diodos.

Caso o primeiro esteja polarizado diretamente, a tensão no nó será de 1V, gerando uma ddp de 2V no segundo diodo, isso afirma que o segundo está polarizado diretamente. No entanto, iniciando a análise pelo segundo diodo, a tensão no nó será de 3V, o que implica em uma ddp no primeiro diodo de -2V, sendo assim o primeiro diodo estaria polarizado inversamente.

Sendo assim, a tensão no nó será de +3V, que também representa a tensão de saída  $V$ :

$$V = 3V \quad (17)$$

Para calcular a corrente que circula no resistor, deve-se calcular primeiro a diferença de potencial sobre o resistor:

$$\begin{aligned} \Delta V &= 3V - (-5V) \\ \Delta V &= 8V \end{aligned} \quad (18)$$

Dividindo a diferença de potencial pela resistência, obtêm-se a corrente no resistor:

$$\begin{aligned}I_{R1} &= \frac{\Delta V}{R_1} \\I_{R1} &= \frac{8}{1000} \\I_{R1} &= 8mA\end{aligned}\tag{19}$$

- Circuito 2:

Para calcular a tensão na saída e a corrente no resistor R2 é necessário realizar a análise da polarização dos diodos.

Caso o primeiro diodo esteja polarizado diretamente, a tensão no nó será de 1V, o que provoca uma ddp de -2V no segundo diodo, o que indica que o segundo diodo está polarizado inversamente, desse modo não teria fluxo de corrente no segundo diodo. Iniciando a análise pelo segundo diodo, a tensão no nó seria de 3V, e a ddp do primeiro diodo seria de 2V, indicando que o diodo está polarizado diretamente. Como as análises resultaram em respostas contrárias, a primeira análise é a correta.

Desse modo, pode-se afirmar que a tensão no nó é de 1V e que, o diodo que apresenta a entrada de 1V possui polarização direta, e o diodo com entrada 3V apresenta polarização inversa.

Sendo assim, o V de saída é:

$$V = 1V\tag{20}$$

Para calcular a corrente que circula no resistor, deve-se calcular primeiro a diferença de potencial sobre o resistor:

$$\begin{aligned}\Delta V &= 5V - 1V \\ \Delta V &= 4V\end{aligned}\tag{21}$$

Dividindo a diferença de potencial pela resistência, obtêm-se a corrente no resistor:

$$\begin{aligned}I_{R2} &= \frac{\Delta V}{R_2} \\I_{R2} &= \frac{4}{1000} \\I_{R2} &= 4mA\end{aligned}\tag{22}$$

- 10) Considerando que as entradas nos circuitos do exercício anterior possam ser somente +5V ou 0V, que tipo de lógica digital poderia ser implementada? Justifique a sua resposta utilizando uma tabela verdade e considerando a segunda aproximação. Quais os valores de V e I para cada combinação?

**Resposta:**

- Circuito 1: Ao utilizar a segunda aproximação para diodo, deve-se lembrar que o diodo é substituído por uma chave e por uma bateria de 0.7V, isso significa que para uma tensão "n" de entrada, com n maior que 0.7, a saída de tensão no diodo é dado por

$$V_{sada} = n - 0.7 \quad (23)$$

caso este esteja diretamente polarizado. Realizando a análise para cada combinação possível, tem-se que:

- i) Diodo 1 - 0 V; Diodo 2 - 0 V:

Como não há entrada de tensão no circuito, e tensão de saída será nula, além disso, não haverá corrente sobre a carga.

- ii) Diodo 1 - 5 V; Diodo 2 - 0 V:

A tensão de entrada é maior que 0.7 V, desse modo, a saída pode ser obtida pela expressão (23).

Sendo assim a tensão de saída do circuito é de 4.3V.

Para calcular a corrente sobre a carga utiliza-se a equação (19):

$$I_{R1} = \frac{4.3}{1000} \quad (24)$$

$$I_{R1} = 4.3mA$$

- iii) Diodo 1 - 0 V; Diodo 2 - 5 V:

A mesma análise do item anterior é realizada, e, conseqüentemente, os mesmo valores são encontrados, ou seja:

Tensão de saída é igual a 4.3 V e a corrente que passa pela carga é de 4.3 mA.

- iv) Diodo 1 - 5 V; Diodo 2 - 5 V:

Ambos os diodos apresentam 5V de entrada, no entanto, as tensões não se somam. É considerado apenas uma entrada de 5V, que provoca uma saída de 4.3 V no circuito.

A corrente da carga também será de 4.3 mA.

Diodo 1 [V]	Diodo 2 [V]	Saída V [V]	Corrente na carga [mA]
0	0	0	0
5	0	4.3	4.3
0	5	4.3	4.3
5	5	4.3	4.3

**Tabela 1:** Tabela verdade Circuito 1

A partir da análise realizada, obtêm-se a seguinte tabela verdade do circuito:

Analizando a tabela, pode-se concluir que os diodos funcionam como uma porta OR.

- Circuito 2:

Realizando a análise para cada combinação possível, tem-se que:

i) Diodo 1 - 0 V; Diodo 2 - 0 V:

Caso os dois diodos estejam com uma entrada de 0V, significa que ambos estão diretamente polarizados, desse modo ambos conduzem corrente. Devido a fonte do diodo, devido a segunda aproximação, a saída de tensão no circuito será de 0,7V.

Utilizando a equação (19) e (21) para determinar a corrente sobre a carga tem-se que:

$$I_{R2} = \frac{4,3}{1000} \quad (25)$$

$$I_{R2} = 4,3mA$$

ii) Diodo 1 - 5 V; Diodo 2 - 0 V:

Com essa configuração, o diodo que apresenta entrada de 5V está inversamente polarizado, não permitindo a passagem de corrente, enquanto que o diodo de 0V está diretamente polarizado, permitindo o fluxo de corrente. Desse modo, devido a fonte do diodo, a tensão de saída do circuito, será novamente de 0,7 V.

Com isso, a corrente sobre a carga também será de 4,3mA.

iii) Diodo 1 - 0 V; Diodo 2 - 5 V:

A mesma análise do item anterior deve ser feita, obtendo os mesmos resultados: tensão de saída igual a 0,7V e corrente na carga igual a 4,3mA.

iv) Diodo 1 - 5 V; Diodo 2 - 5 V:

Nessa distribuição, ambos os diodos estarão inversamente polarizados, portanto, a corrente não passará em nenhum dos dois. Com isso a tensão de saída do circuito será de 5V.

Utilizando a equação (21) observa-se que a variação de tensão sobre a carga será de 0V, desse modo não haverá corrente sobre a carga.

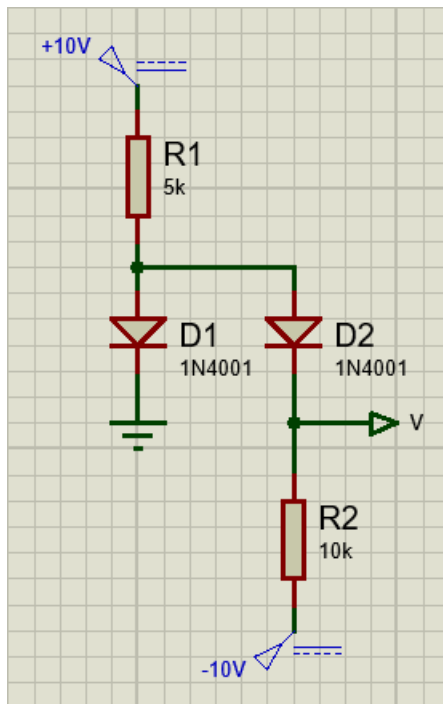
A partir da análise realizada, obtêm-se a seguinte tabela verdade do circuito:

Diodo 1 [V]	Diodo 2 [V]	Saída V [V]	Corrente na carga [mA]
0	0	0.7	4.3
5	0	0.7	4.3
0	5	0.7	4.3
5	5	5	0

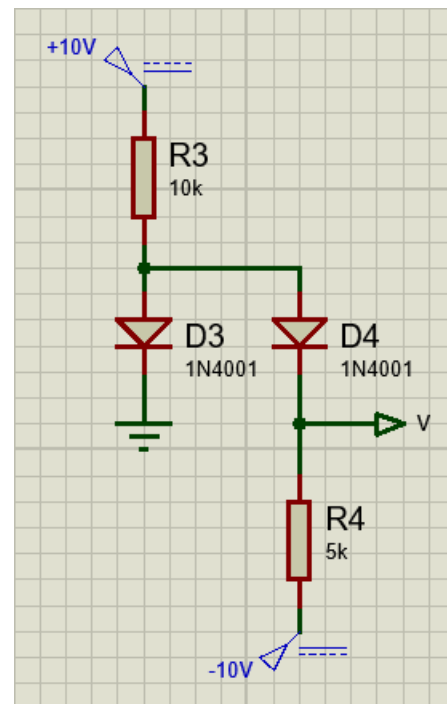
**Tabela 2:** Tabela verdade Circuito 2

Analizando a tabela, pode-se concluir que os diodos funcionam como uma porta AND.

- 11) Faça uma análise dos circuitos a seguir considerando a segunda aproximação para os diodos. Calcule os valores das tensões de saída,  $V$ , e das correntes,  $I$ , nos diodos  $D_1$  e  $D_3$ .



**Figura 6:** Circuito 1



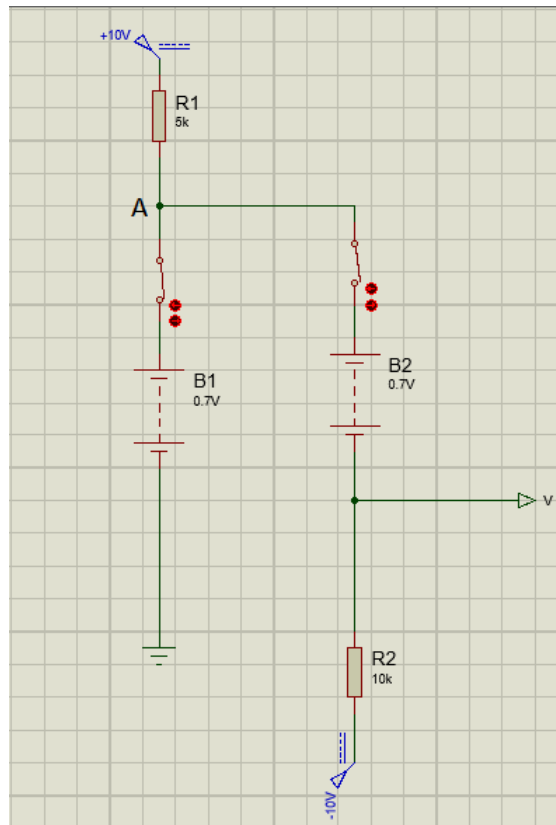
**Figura 7:** Circuito 2

**Resposta:**

- Circuito 1:

Utilizando a segunda aproximação, como ordenado pelo enunciado, pode-se redesenhar o circuito da seguinte forma. considerando que ambos os diodos estão

em condução, ou seja, diretamente polarizados:



**Figura 8:** Segunda aproximação para o circuito 1

Os diodos formam substituídos por uma chave e uma bateria de 0,7V. Desse modo, como a tensão na bateria é de 0,7V, a tensão no ponto A é de, também, 0,7V. No entanto, como a segunda bateria consome 0,7V, a tensão de saída passa a ser 0V. Portanto:

$$V = 0V \quad (26)$$

Para calcular a corrente que passa pelo diodo D1, pode-se utilizar a primeira Lei de Kirchhoff para o nó A, no entanto é necessário calcular a corrente que chega ao nó A, e a corrente que passa por D2. Ambas as correntes são simples de serem calculadas:

– Corrente que chega ao nó A:

Tem-se uma entrada de 10V e a tensão no nó A é de 0,7V, sendo assim a ddp é de:

$$\begin{aligned} \Delta V &= 10V - (0,7V) \\ \Delta V &= 9,3V \end{aligned} \quad (27)$$



Com uma resistência de  $5000\ \Omega$ , utiliza-se a primeira lei de ohm, encontrando a corrente que passa por esta carga:

$$\begin{aligned} I_T &= \frac{V}{R} \\ I_T &= \frac{9.3}{5000} \\ I_T &= 1,8mA \end{aligned} \quad (28)$$

– Corrente que passa pelo diodo D2:

Como a tensão no nó de saída é  $0V$ , e a tensão abaixo do resistor é de  $-10V$ , tem-se que a variação de tensão é:

$$\begin{aligned} \Delta V &= 0V - (-10V) \\ \Delta V &= 10V \end{aligned} \quad (29)$$

Utilizando novamente a primeira lei do ohm, encontramos que a corrente, chamada de  $I_{D2}$ , será:

$$\begin{aligned} I_{D2} &= \frac{\Delta V}{R} \\ I_{D2} &= \frac{10}{10000} \\ I_{D2} &= 1mA \end{aligned} \quad (30)$$

Com os valores de  $I_T$  e  $I_{D2}$ , encontramos  $I_{D1}$ . A primeira lei de Kirchhof diz que a soma das correntes que chegam e que saem do nó é igual a zero, sendo assim:

$$\begin{aligned} -I_T + I_{D1} + I_{D2} &= 0 \\ -1,8mA + I_{D1} + 1mA &= 0 \\ I_{D1} &= 0,8mA \end{aligned} \quad (31)$$

- Circuito 2:

Inicialmente, analisando se os dois diodos vão conduzir corrente, ou seja, se ambos estão polarizados diretamente.

Para determinar as correntes nos diodos  $D_3$  e  $D_4$ , respectivamente,  $I_{D3}$  e  $I_{D4}$ , deve-se analisar, os dois caminhos separadamente. Assim:

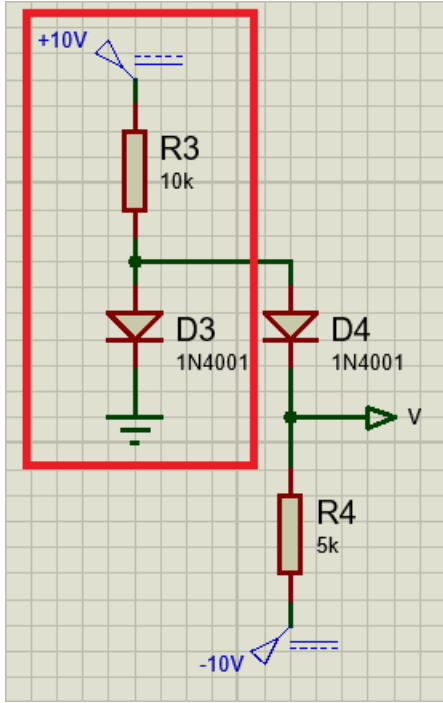


Figura 9: Caminho 1

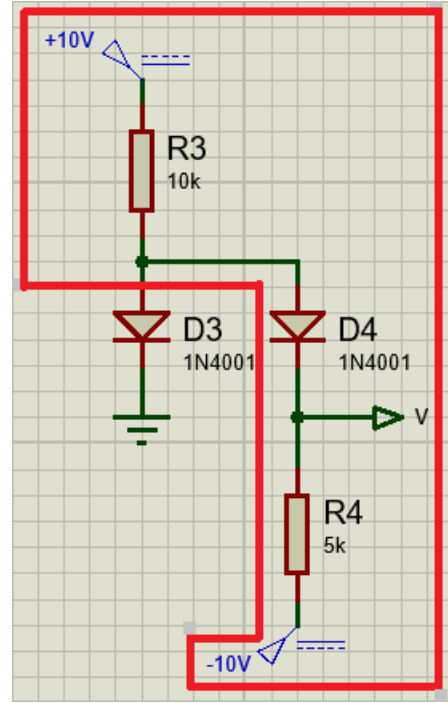


Figura 10: Caminho 2

Pela 2ª lei de Kirchhoff, no primeiro caso tem-se:

$$\begin{aligned} 10 - 10000 i_{R3} - 0,7 &= 0 \\ i_{R3} &= \frac{10 - 0,7}{10000} \\ i_{R3} &= 0,93mA \end{aligned} \quad (32)$$

Onde  $i_{R3}$  é a corrente no  $R_3$ . Analogamente,  $i_{R4}$  é a corrente no resistor  $R_4$ , no caminho 2:

$$\begin{aligned} 10 - 10000 i_{R3} - 0,7 - 5000 i_{R4} &= -10 \\ 10 - 10000 \cdot 0,93 - 0,7 - 5000 i_{R4} &= -10 \\ i_{R4} &= \frac{-10}{-5000} \\ i_{R4} &= 2mA \end{aligned} \quad (33)$$

Com isso, obteve-se:

$$i_{R4} > i_{R3}$$

o que não pode acontecer. Então, a conclusão é de que  $D_3$  está polarizado reversamente e, agora, é possível encontrar a corrente  $I_{D3}$ :

$$I_{D3} = 0A$$

Finalmente, a tensão de saída  $V$  é dada por:

$$V = -10 + 5000i \quad (34)$$

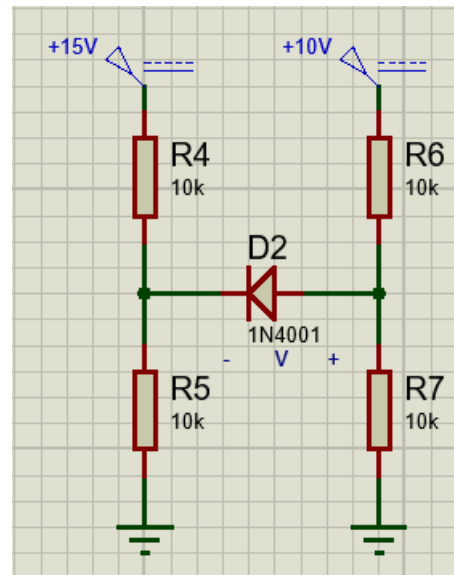
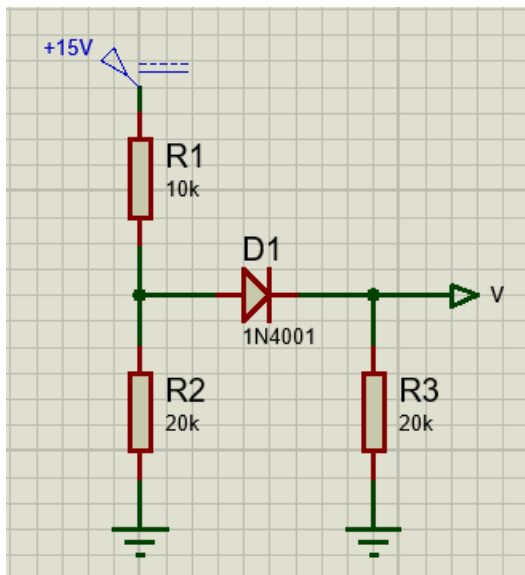
O valor da corrente  $i$  é encontrada analisando o segundo caminho:

$$\begin{aligned} 10 - 10000i - 0,7 - 5000i &= -10 \\ -10000i - 5000i &= -10 - 10 + 0,7 \\ i &= \frac{10 + 10 - 0,7}{10000 + 5000} \\ i &= 1,29mA \end{aligned} \quad (35)$$

Substituindo na equação (34):

$$\begin{aligned} V &= -10 + 5000i \\ V &= -10 + 5000 \cdot 1,29 \\ V &= -3,57V \end{aligned} \quad (36)$$

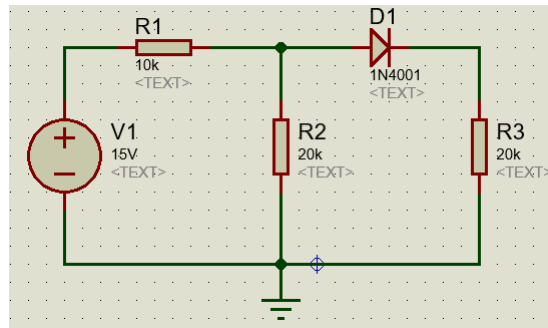
- 12) Estime a resistência de corpo do diodo 1N4001 e, utilizando a terceira aproximação, aplique o teorema de Thévenin para simplificar os circuitos e calcular os valores das tensões,  $V$ , conforme indicado e das correntes,  $I$ , sobre os diodos  $D_1$  e  $D_2$ . Discuta a necessidade de utilização da terceira aproximação para a análise do circuito e justifique qual seria o melhor modelo a ser utilizado.



**Resposta:**

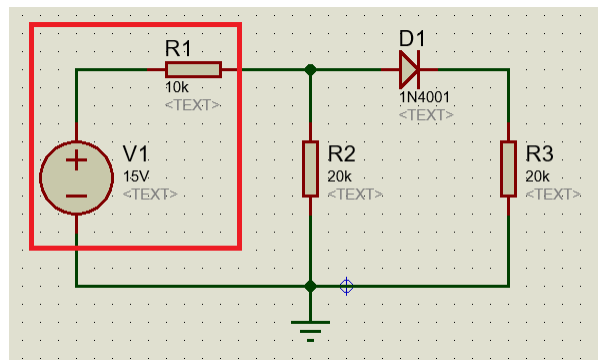
- Circuito 1:

Inicialmente aplica-se o teorema de Thévenin, como solicitado pelo enunciado.



**Figura 11:** Circuito inicial

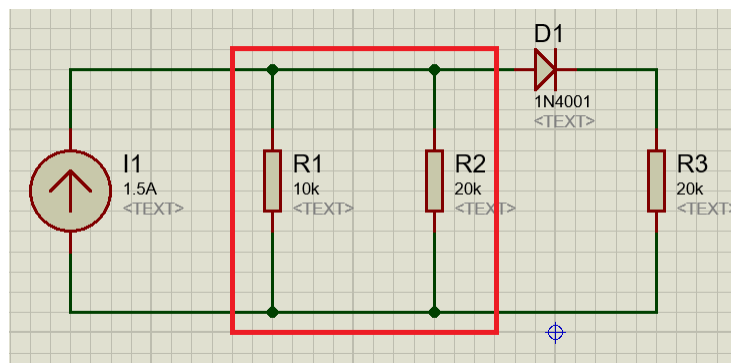
Primeiro, fazemos uma transformação de fontes:



**Figura 12:** Primeira transformação de fontes

$$i_1 = \frac{15}{10000} = 1,5mA \quad (37)$$

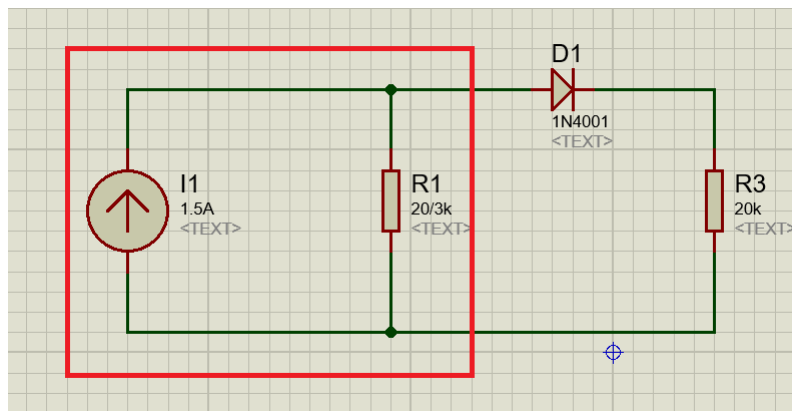
E, agora, associando os resistores:



**Figura 13:** Associação de resistores

$$\begin{aligned}
 R_{TH} &= \frac{10 \cdot 20}{10 + 20} \\
 R_{TH} &= \frac{200}{30} \\
 R_{TH} &= \frac{20}{3} k\Omega
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

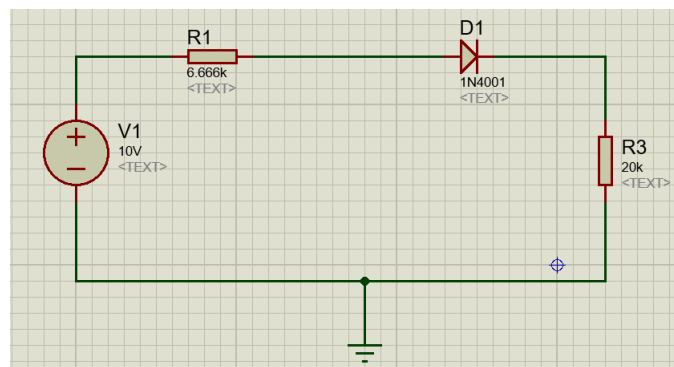
Por fim, encontra-se a tensão equivalente de Thévenin:



**Figura 14:** Transformação de fontes para encontrar  $V_{TH}$

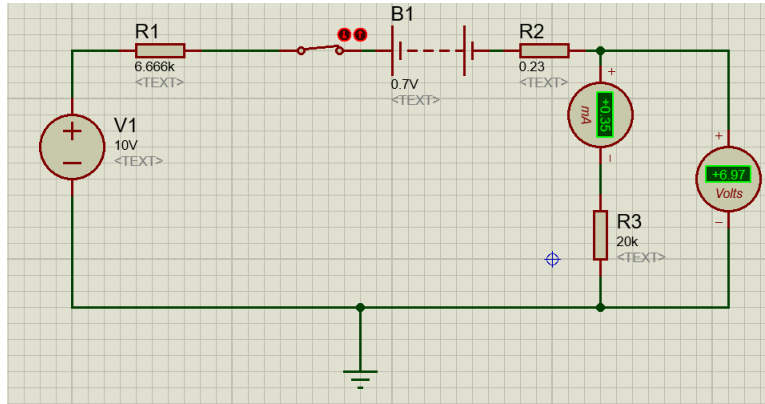
$$\begin{aligned}
 V_{TH} &= \frac{20}{3} \cdot 1,5 \\
 V_{TH} &= 10V
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

Com o circuito simplificado, tem-se:



**Figura 15:** Circuito simplificado

De acordo com a atividade, agora, utilizando a terceira aproximação:



**Figura 16:** Circuito com a terceira aproximação

$r_b$  pode ser obtida através da seguinte equação:

$$R_b = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \quad (40)$$

Em que:

- $V_1$ : tensão no joelho
- $I_1$ : corrente no joelho
- $V_2$ : tensão em algum ponto acima do joelho na curva do diodo
- $I_2$ : corrente em algum ponto acima do joelho na curva do diodo

A folha do 1N4001, fornece uma tensão direta de 0,93 V para uma corrente de 1A. Como é um diodo de silício, sabemos que no joelho temos uma tensão de 0,7 V e uma corrente de aproximadamente 0 A. Com isso temos:

$$\begin{aligned} R_b &= \frac{0,93 - 0,7}{1 - 0} \\ R_b &= \frac{0,23}{1} \\ R_b &= 0,23\Omega \end{aligned} \quad (41)$$

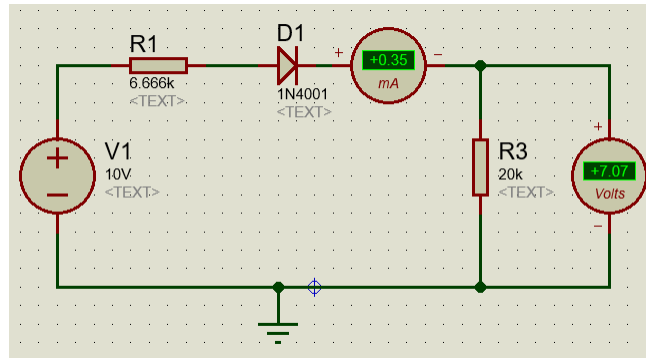
Dessa forma, finalmente é possível encontrar a corrente I:

$$\begin{aligned} 10 - \frac{20}{3} \times 10^3 I - 0,23I - 0,7 - 20 \times 10^3 I &= 0 \\ -\frac{20}{3} \times 10^3 I - 0,23I - 20 \times 10^3 I &= -10 + 0,7 \\ 26,67 \times 10^3 I &= 10 - 0,7 \\ I &= \frac{10 - 0,7}{26,67 \times 10^3} \\ I &= 0,35 \text{mA} \end{aligned} \quad (42)$$

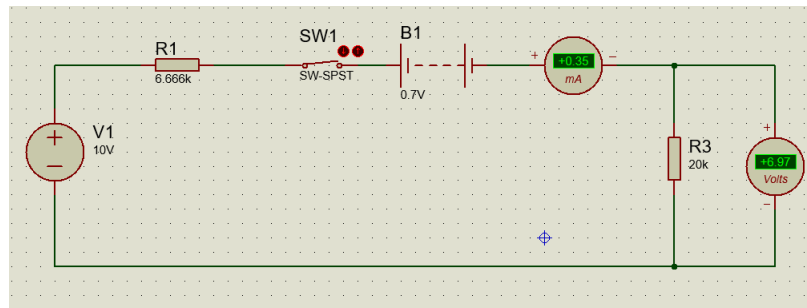
E, com ela, temos V:

$$V = 20 \times 10^3 \cdot 0,35 \times 10^{-3} = 7V \quad (43)$$

Agora, para discutir a necessidade de utilização da terceira aproximação tem-se a imagem abaixo, que exhibe os valores de V e I, sem a terceira aproximação:



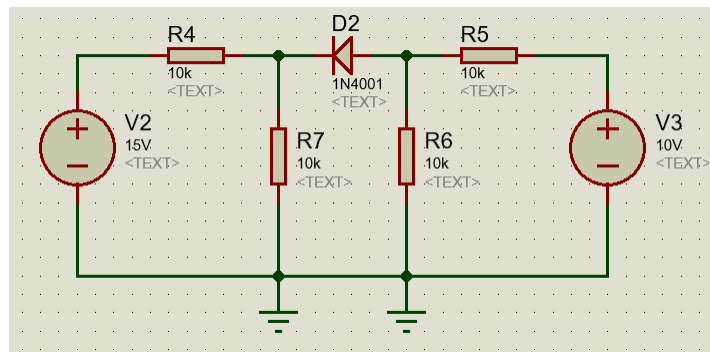
**Figura 17:** V e I no circuito simplificado



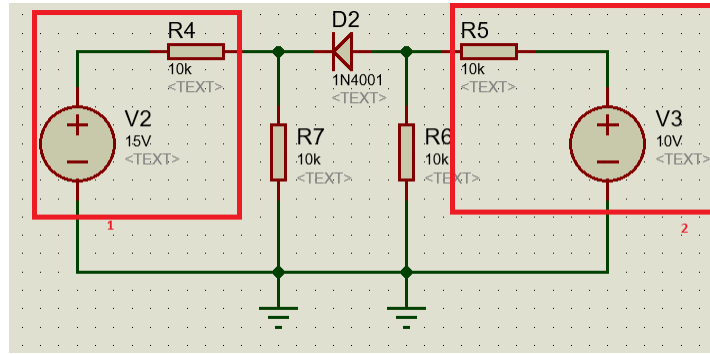
**Figura 18:** V e I na segunda aproximação

- **Circuito 2:**

Analogamente aos passos feitos no circuito 1, aplica-se o teorema de Thévenin, mas, dessa vez, nos dois lados do circuito:



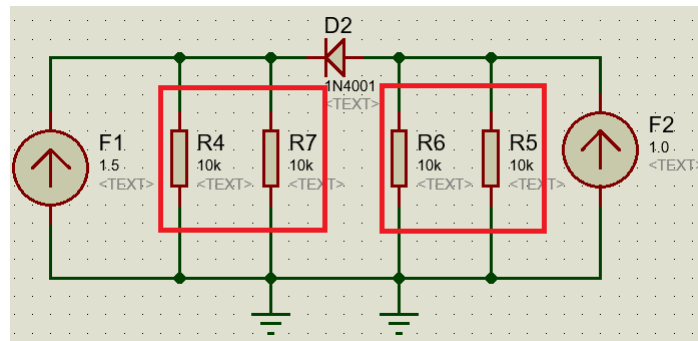
**Figura 19:** Circuito inicial 2



**Figura 20:** Transformações de fontes

$$i_1 = \frac{15}{10000} = 1,5mA \quad (44)$$

$$i_2 = \frac{10}{10000} = 1mA \quad (45)$$

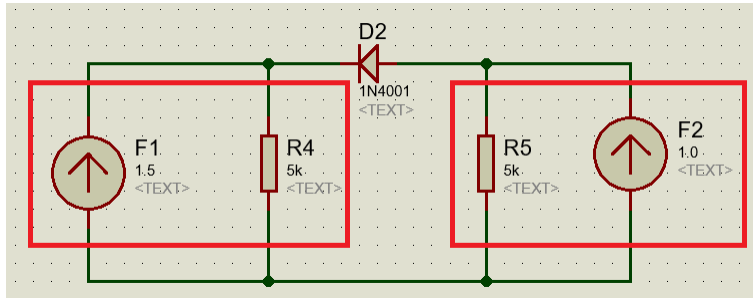


**Figura 21:** Associação dos resistores

Nesse caso,  $R_{eq1} = R_{eq2}$ , então:

$$\begin{aligned} R_{eq1} &= \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} \\ R_{eq1} &= \frac{100}{20} \\ R_{eq1} &= 5k\Omega \end{aligned} \quad (46)$$

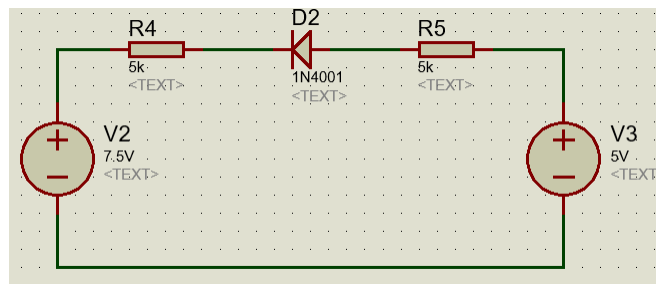




**Figura 22:** Tranformações de fontes para encontra  $V_{TH1}$  e  $V_{TH2}$

$$V_{TH1} = 5000 \cdot 0,0015 = 7,5V \quad (47)$$

$$V_{TH2} = 5000 \cdot 0,001 = 5V \quad (48)$$



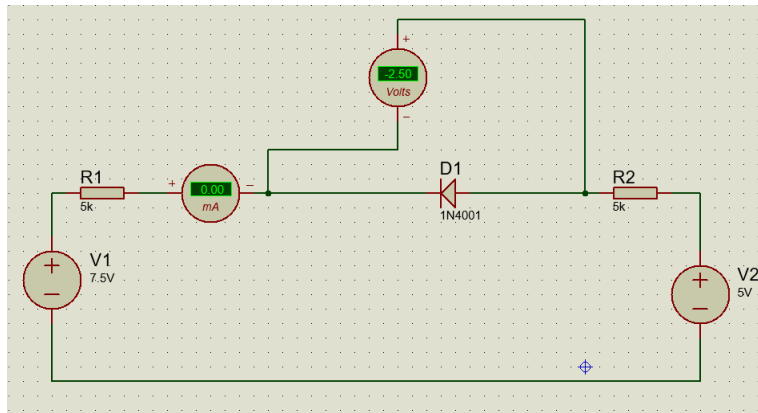
**Figura 23:** Circuito simplificado

Nesse caso, após simplificar o circuito, vê-se que a fonte do lado esquerdo, de 7,5V, está ligado ao cátodo do diodo e, a do lado esquerdo, de 5V, ao ânodo. Assim, o diodo está ligado reversamente, pois o lado esquerdo tem maior potencial. Com isso, a corrente sobre ele é nula:

$$I = 0A \quad (49)$$

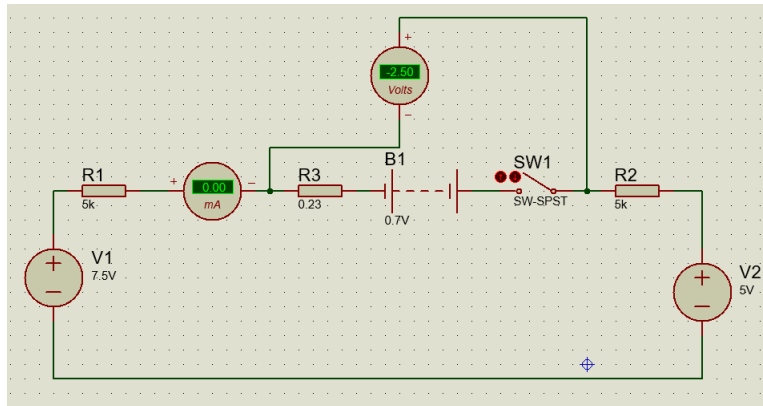
E a tensão é dada por:

$$V = 5 - 7,5 = -2,5V \quad (50)$$



**Figura 24:** V e I no circuito simplificado

Com a terceira aproximação:



**Figura 25:** V e I na terceira aproximação

É notável que os valores observados na imagem 16 e 17 são muito próximos. E, no circuito 2, os valores de V e I iguais nas imagens 24 e 25. Isso acontece porque  $r_b$  é um valor muito baixo quando comparado aos valores dos outros resistores do circuito. Portanto, a terceira aproximação se faz desnecessária nesses casos.

Entretando, os valores de tensão de joelho do diodo para os potenciais do circuito são bem menores que a diferença entre os valores das resistências. Por esse motivo, com a primeira aproximação, os valores de V e I seriam um pouco mais distantes dos encontrados (veja figura 18).

Sendo assim, a segunda aproximação para o diodo é a mais adequada nesses casos.

#### *O diodo Zener*

- 13) Baixe a folha de dados de um diodo Zener de sua preferência. Defina e indique as características a seguir: Potência de dissipação máxima; Corrente máxima; Tolerância na tensão Zener; Resistência Zener; Fator de degradação e Coeficiente de temperatura. Ref.: Malvino, A. P., *Eletrônica, Volume I*, Cap. 5, seções 5.2 e 5.7.

### Resposta:

Definindo os termos:

- **Potência de dissipação máxima:** A dissipação de potência num diodo Zener é igual ao produto de sua tensão por sua corrente máxima. Enquanto a potência de dissipação máxima for menor que a potência nominal, o diodo Zener poderá operar na região de ruptura sem ser danificado.
- **Corrente máxima:** é a corrente que um diodo Zener pode conduzir sem exceder sua potência máxima.
- **Tolerância de tensão Zener:** a faixa de tensões sobre a tensão de ruptura na qual um diodo Zener conduz na direção reversa.
- **Resistência Zener:** quando um diodo Zener opera na região de ruptura, um aumento na corrente produz um ligeiro aumento na tensão. Isto significa que o diodo Zener tem uma pequena resistência, que também é denominada impedância Zener.
- **Fator de degradação:** O fator de degradação mostra o quanto da potência nominal deve ser reduzida a potência de dissipação do dispositivo.
- **Coeficiente de temperatura:** Permite determinar de quantos milivolts varia o valor  $V_z$  para cada grau centígrado de variação da temperatura.

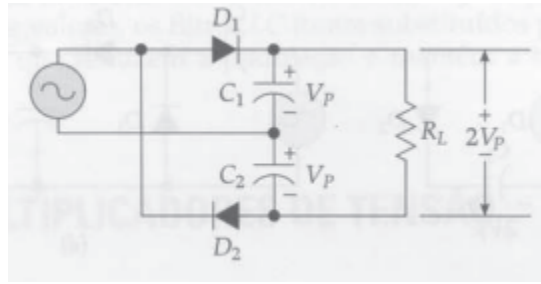
Para tal análise foi escolhido o diodo Zener 1N4733A. Para acessar o datasheet [clique aqui](#).

- Potência de dissipação máxima: 1W
- Corrente máxima: 178mA
- Tolerância na tensão Zener: 5%
- Resistência Zener:  $7\Omega$
- Fator de degradação:  $6,67mV/^{\circ}C$
- Coeficiente de temperatura:  $-0.01\%$ até  $+0.04\%mV/^{\circ}C$

- 14) Além da retificação, os diodos possuem outras aplicações importantes. Sendo assim, defina e descreva o funcionamento dos seguintes circuitos: Multiplicador de tensão; Limitador (ceifador); Grampeador CC e Detector de pico a pico. Ref.: Malvino, A. P., *Eletrônica, Volume I, Cap. 4, seções 4.15 a 4.18*.

### Resposta:

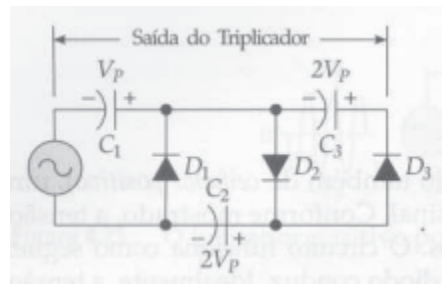
- **Multiplicador de tensão:** é um circuito com dois ou mais diodos retificadores que produzem uma tensão média igual a um múltiplo do valor da tensão de pico ( $2V_p$ ,  $3V_p$ ,  $4V_p$  etc). Abaixo, é possível ver o funcionamento:
  - Dobrador de tensão de onda completa:



**Figura 26:** Dobrador de tensão de onda completa

Durante o semiciclo positivo da fonte  $ca$ , o capacitor de cima carrega até o valor de pico com a polaridade mostrada. No próximo semiciclo, o capacitor debaixo carrega até o valor de pico com a polaridade mostrada. Para cargas leves atenção final é de aproximadamente  $2V_p$ .

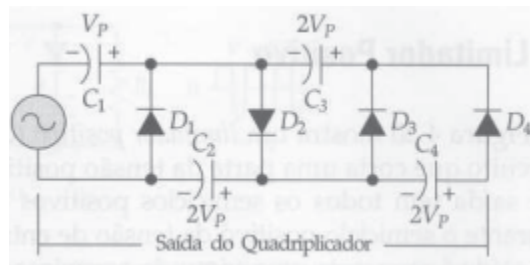
- Triplicador de tensão: pela conexão de outra seção, obtemos o triplicador de tensão.



**Figura 27:** Triplicador de tensão

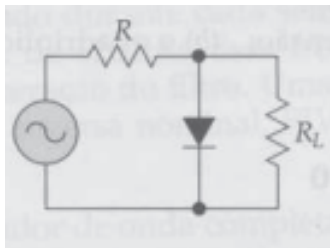
Os dois primeiros retificadores de pico funcionam como um dobrador. No bico dos mc com negativo,  $D_3$  fica diretamente polarizado. Isso carrega  $C_3$  a  $2V_p$  com a polaridade mostrada na figura 27. A saída dos triplicador aparece entre  $C_1$  e  $C_3$ . A resistência de carga é conectada na saída do triplicador. Enquanto a constante de tempo for alta, a saída será aproximadamente igual a  $3V_p$ .

Teoricamente, podemos adicionar seções indefinidamente, contudo, a ondulação piora a cada sessão adicionada.



**Figura 28:** Quadriplicador de tensão

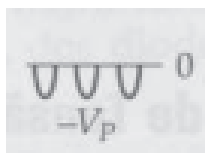
- **Limitador(ceifador):** é um circuito de pequeno sinal, ele retira uma parte do sinal de tensão acima ou abaixo de um nível especificado. Por exemplo, o limitador positivo ceifa a parte do sinal que está acima de 0, a parte positiva. Ele funciona assim:



**Figura 29:** Limitador positivo.

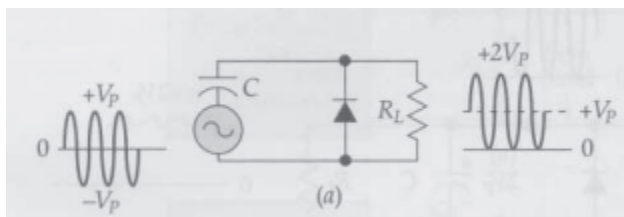
Durante o semiciclo positivo da tensão de entrada, o diodo conduz e durante o semiciclo negativo, o diodo está reversamente polarizado e aparece como uma chave aberta.

A figura abaixo mostra a forma de onda de saída, nota-se que o semiciclo positivo foi ceifando.

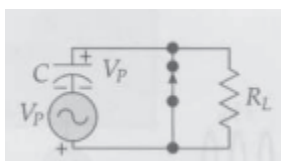


**Figura 30:** Forma de onda de saída do limitador positivo.

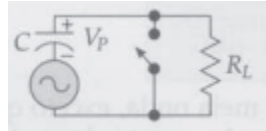
- **Grampeador cc:** esse circuito acrescenta uma tensão cc ao sinal. Por exemplo, se o sinal que entra varia de - 10V a + 10V, um grampeador positivo cc produzirá uma saída de 0 a +20V(no circuito ideal).



Seu funcionamento acontece da seguinte forma: no primeiro semiciclo negativo da tensão de entrada, o diodo conduz. Assim:



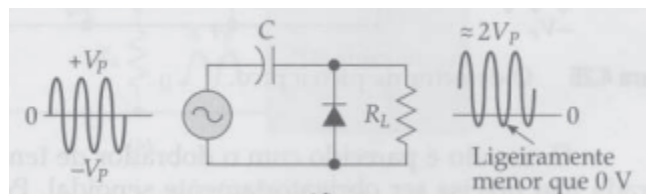
No pico negativo, o capacitor deve-se carregar com  $V_p$  com a polaridade mostrada. Imediatamente após o pico negativo o diodo corta e o capacitor permanece quase totalmente carregado durante o tempo em que o diodo fica em corte.



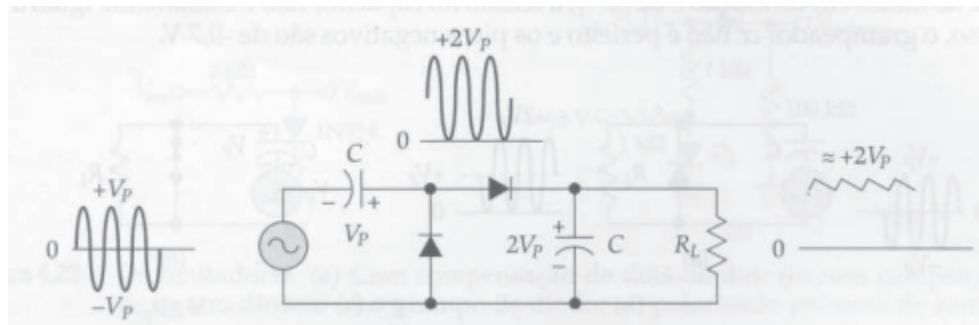
Então, o capacitor age como uma bateria de  $V_p$  V e a tensão na saída é um grampeador de sinal positivo.

Na prática, como a queda no diodo em condução é de 0,7V, essa tensão no capacitor não é exatamente igual a  $V_p$  e os picos negativos são de -0,7V.

Se invertermos a posição do diodo, a polaridade do capacitor é invertida e o circuito passa-se um grampeador negativo.



- **Detector de pico a pico:** É obtido ligando um grampeador cc e um detector de pico em cascata.



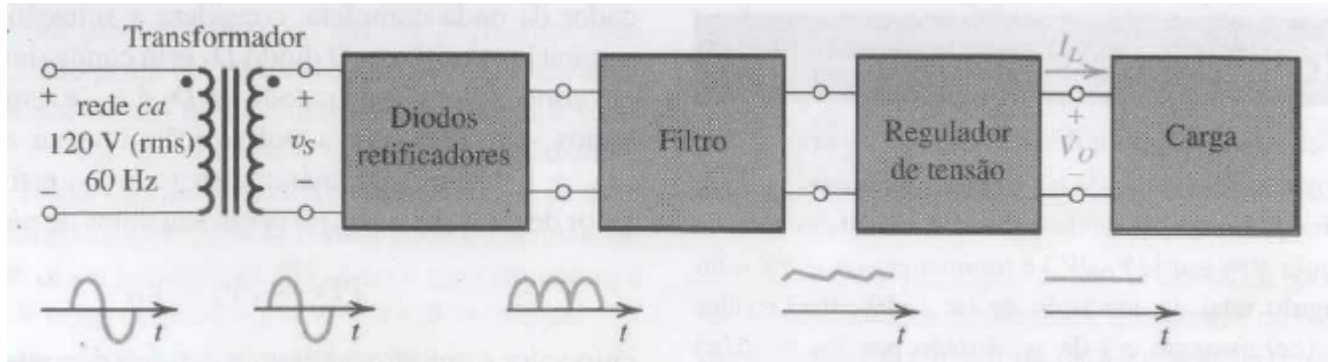
**Figura 31:** Detector de pico a pico.

A senoide de entrada é positivamente grampeada, logo, a entrada do detector de pico tem um valor igual a  $2V_p$ .

### *Circuitos Retificadores*

- 15) Projete um circuito retificador, conforme os estágios a seguir, para acionar uma carga resistiva que opera em  $12V_{CC}$  cuja corrente consumida pode variar entre 5mA e 20mA.

Ao longo do projeto, obtenha as curvas de cada etapa de retificação e justifique, por meio de cálculos, a escolha de cada componente. Utilize no circuito final valores comerciais.



### Resposta:

- Projeto Circuito Retificador de Onda Completa:

#### 1. Determinando o valor da fonte e retirando os dados do enunciado:

O valor de entrada, dada pelo enunciado, é de 120V, para encontrar o valor de pico, basta multiplicar essa tensão por  $\sqrt{2}$ , sendo assim:

$$V_{pico} = 120 \cdot \sqrt{2} \quad (51)$$

$$V_{pico} = 169,706V \quad (52)$$

A fonte irá atuar em uma frequência de 60Hz. A corrente mínima da carga é de 5mA e a corrente máxima é de 20mA.

#### 2. Transformador:

O transformador utilizado será o TRAN-2P2S, que terá a função de transformar 120V em 12V. Para isso, será necessário alterar o valor de indutância da entrada do transformador, para tanto, utiliza-se a seguinte equação:

$$L_1 = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2 \cdot L_2 \quad (53)$$

sendo  $V_1$  a tensão de entrada da fonte,  $V_2$  a tensão desejada na saída com um erro de 0,5 e  $L_2$  a indutância na saída igual a 1H. Substituindo os valores na equação (75), tem-se que:

$$L_1 = \left( \frac{120}{12,5} \right)^2 \cdot 1 \quad (54)$$

$$L_1 = 92,16H$$

### 3. Diodo:

Os diodos escolhidos para a montagem da ponte de diodo foi o 1N4001, uma vez que suas características atendem a demanda solicitada pelo enunciado.

O diodo 1N4001 apresenta tensão de ruptura de 50V e corrente máxima direta de 1A.

### 4. Carga resistiva:

Para determinar a resistência da carga resistiva, utiliza-se a 1ª lei de ohm:

$$V_L = R_L \cdot I_L \quad (55)$$

Isolando  $R_L$  e considerando  $V_L$  igual a 12V, tem-se que:

$$\begin{aligned} R_{Lmin} &= \frac{12V}{5mA} \\ R_{Lmin} &= 2,4k\Omega \end{aligned} \quad (56)$$

$$\begin{aligned} R_{Lmax} &= \frac{12V}{20mA} \\ R_{Lmax} &= 600\Omega \end{aligned} \quad (57)$$

Utilizaremos o resistor de maior valor, ou seja 2,4kΩ. Desse modo, a primeira parte



do circuito, pode ser visualizada na figura abaixo:

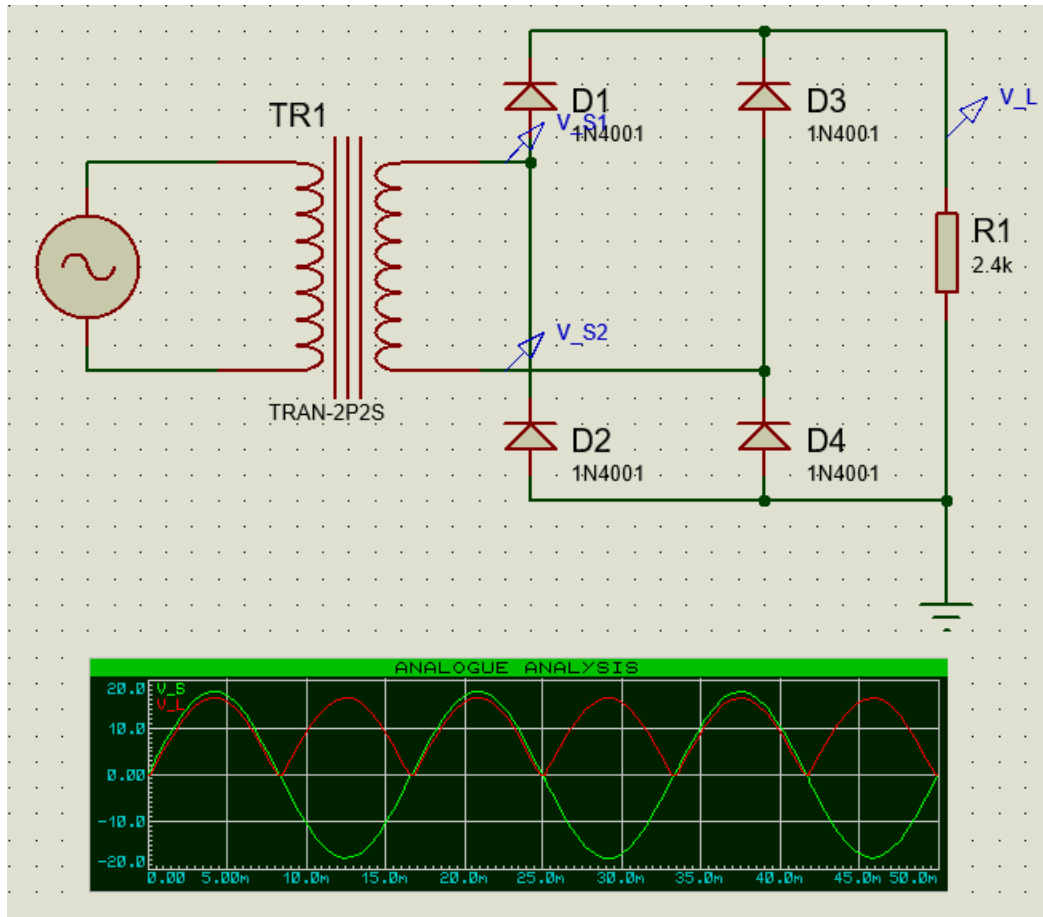


Figura 32: Circuito sem o Filtro Capacitivo

Através da análise gráfica gerada pelo software Proteus, é possível observar a entrada senoidal da fonte, em verde, e a saída em vermelho. A função do circuito retificador, é transformar os sinais negativos da fonte, em sinais positivos na saída. Outro ponto importante a ser analisado, a tensão de pico da saída, que apresenta valor de 16,2V.

##### 5. Filtro Capacitivo:

Com o valor da tensão máxima obtida do gráfico anterior, é possível calcular a tensão de Ripple, pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} V_R &= V_{max} \cdot 10\% \\ V_R &= 1,62V \end{aligned} \quad (58)$$

Para determinar o valor de capacitância a ser utilizado, utiliza-se a equação:

$$V_R = \frac{I_o}{fC} \quad (59)$$

Sendo  $I_o$ :

$$I_o = \frac{0,636 \cdot V_m}{R_L} \quad (60)$$

$$I_o = \frac{0,636 \cdot 16,2}{2400}$$

$$I_o = 4,293mA$$

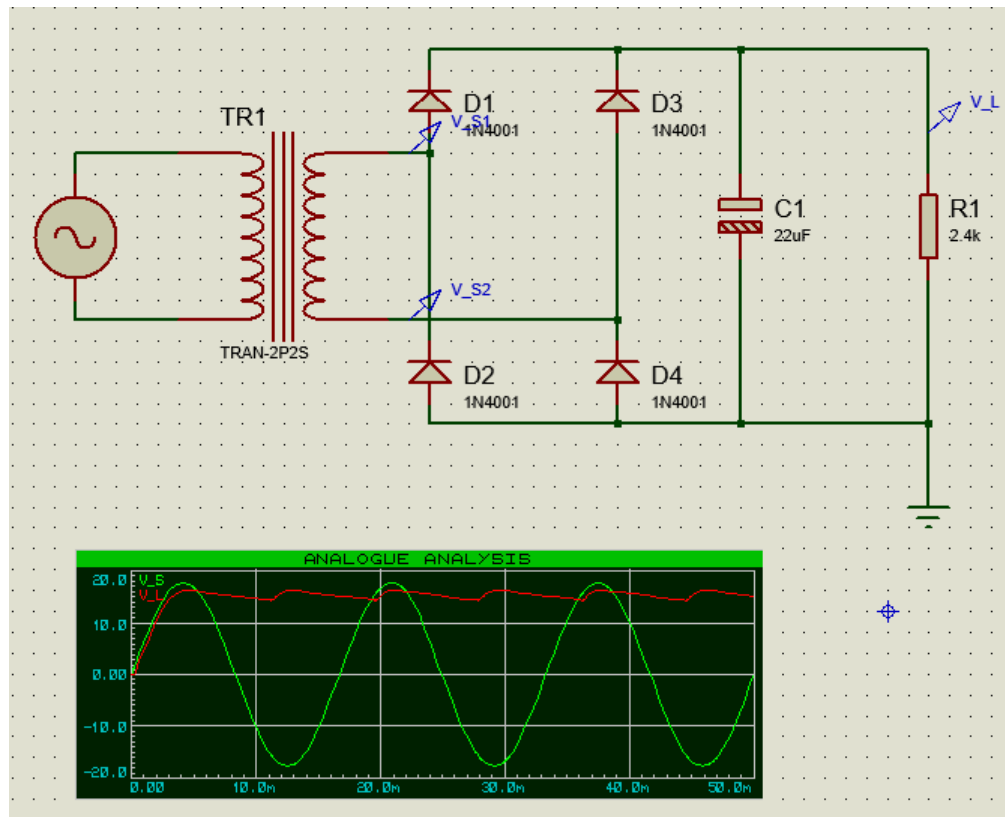
Isolando C e substituindo as variáveis na equação (82):

$$C = \frac{I_o}{fV_R} \quad (61)$$

$$C = \frac{4,293mA}{120Hz \cdot 1,62V}$$

$$C = 22,08\mu F$$

O capacitor comercial a ser utilizado é o de  $22\mu F$ .



**Figura 33:** Circuito com Filtro Capacitivo

O filtro capacitivo é utilizado com a finalidade de reduzir variações de tensão e corrente. No circuito, servem para eliminar uma tensão alternada pulsativa e

transformá-la em uma (tensão contínua) que varia menos, como pode-ser observado ao comparar o gráfico das imagens 33 e 32.

#### 6. Regulador de tensão:

Para a montagem do regulador de tensão é necessário a utilização de um resistor, cuja resistência deve ser calculada, e um diodo Zener, o diodo utilizado foi o 1N4742A.

Para calcular a resistência, temos que a tensão máxima de Ripple é de 16,2V e a tensão mínima é de 14,4V, e a tensão que desejamos na carga é de 12V.

A resistência pode ser obtida a partir da seguinte equação:

$$R_{Smax} = \frac{V_{Smin} - V_z}{I_{Lmax}} \quad (62)$$

Substituindo os valores na equação, temos que:

$$\begin{aligned} R_{Smax} &= \frac{14,4 - 12}{20mA} \\ R_{Smax} &= 120\Omega \end{aligned} \quad (63)$$

O resistor comercial a ser utilizado é o de 120Ω.

Para verificar se o circuito está funcionando na região de ruptura, deve-se calcular a tensão de Thevenin.

$$\begin{aligned} V_{Th} &= \frac{R_L}{R_S + R_L} \cdot V_S \\ V_{Th} &= \frac{2400}{120 + 2400} \cdot 14,4 \\ V_{Th} &= 13,71 \end{aligned} \quad (64)$$

Como  $V_{Th} > 12$ , pode-se afirmar que o circuito opera na região de ruptura.

Para o circuito final, o capacitor utilizado apresenta uma capacitância de 220μF, afim de atingir uma maior linearidade a forma de onda.

É possível observar no gráfico uma certa constância da tensão na saída, desse modo, pode-se afirmar que o circuito retificador está funcionando corretamente.

- 16) Considerando a saída do segundo estágio de retificação do circuito de onda completa do item anterior ligada à carga, determine: a) A tensão máxima na carga; b) A tensão média na carga; c) a corrente máxima na carga; d) a corrente média na carga; e) a corrente RMS na carga; f) A potência média na saída (Potência DC); A potência de entrada (Potência AC após o transformador); i) A eficiência do retificador até este estágio.

**Resposta:**

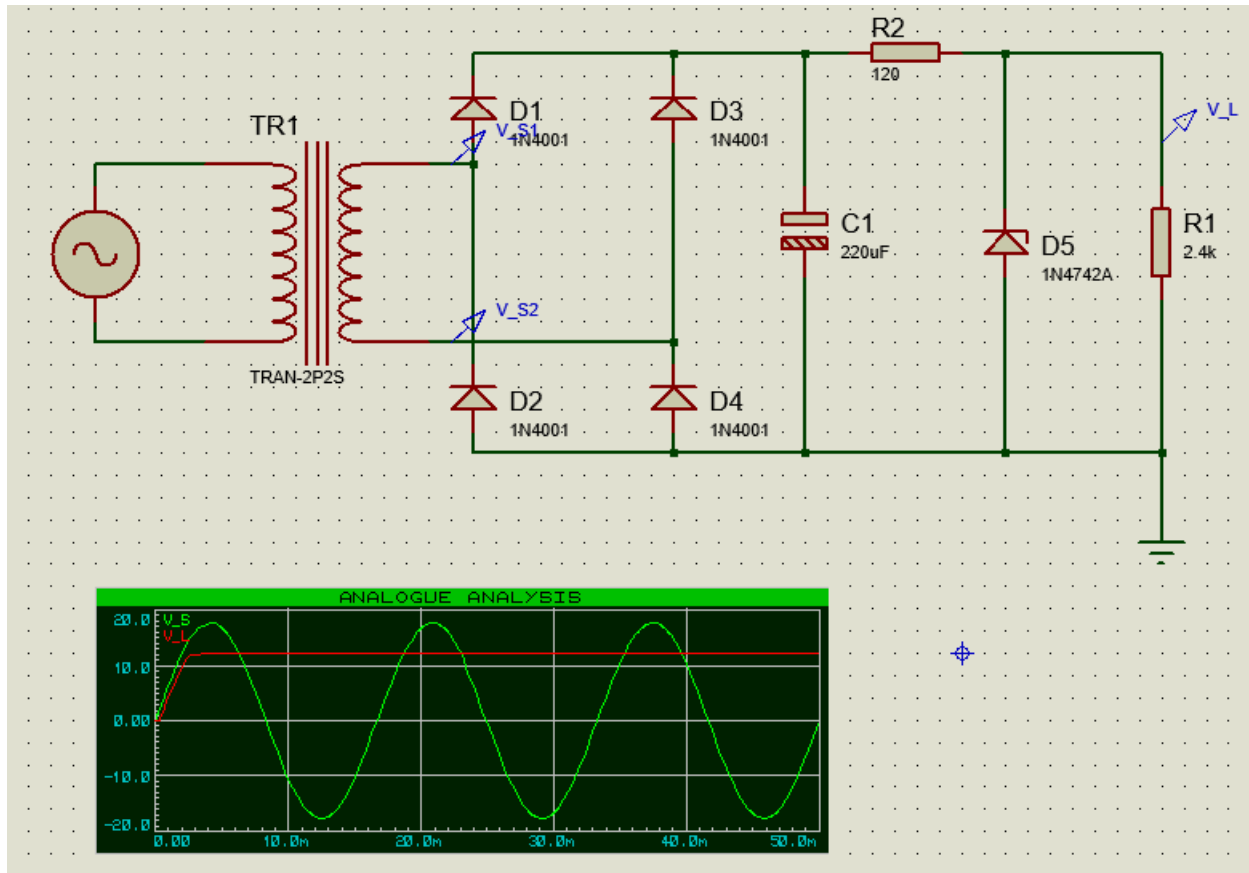


Figura 34: Circuito Retificador Completo

a) A tensão máxima da carga:

$$\begin{aligned} V_{max} &= V_{rms} \\ v_{max} &= 12 \cdot \sqrt{2} \\ V_{max} &= 16,97V \end{aligned} \quad (65)$$

b) A tensão média na carga:

$$\begin{aligned} V_{med} &= \frac{2V_{max}}{\pi} \\ V_{med} &= \frac{2 \cdot 16,97}{\pi} \\ V_{med} &= 10,80V \end{aligned} \quad (66)$$

c) A corrente máxima na carga:

$$\begin{aligned}
 i_{max} &= \frac{V_{max}}{R} \\
 i_{max} &= \frac{16,97}{2400} \\
 i_{max} &= 7,07mA
 \end{aligned}
 \tag{67}$$

d) A corrente média na carga:

$$\begin{aligned}
 i_{med} &= \frac{2I_{max}}{\pi} \\
 i_{med} &= \frac{2 \cdot 7,07mA}{\pi} \\
 i_{med} &= 4,5mA
 \end{aligned}
 \tag{68}$$

e) A corrente RMS na carga:

$$\begin{aligned}
 i_{rms} &= \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \\
 i_{rms} &= \frac{7,07mA}{\sqrt{2}} \\
 i_{rms} &= 5mA
 \end{aligned}
 \tag{69}$$

f) A potência média na saída (Potência DC):

$$\begin{aligned}
 P_{med} &= V_{med} \cdot i_{med} \\
 P_{med} &= 10,80V \cdot 4,5mA \\
 P_{med} &= 0,049W
 \end{aligned}
 \tag{70}$$

g) A potência de entrada (Potência AC após o transformador):

$$\begin{aligned}
 P_{AC} &= V_{rms} \cdot i_{rms} \\
 P_{AC} &= 12V \cdot 5mA \\
 P_{AC} &= 0,060W
 \end{aligned}
 \tag{71}$$

h) A eficiência do retificador até este estágio:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_{med}}{P_{AC}} \\ \eta &= \frac{0,049}{0,060} \\ \eta &= 0,8166 \\ \eta &= 81,66\%\end{aligned}\tag{72}$$

- 17) (Extra) Deduza, com base no conceito de corrente e tensão média, a equação que define tais grandezas para o segundo estágio do circuito retificador. Faça isso utilizando a forma de onda de saída e cálculo integral.
- 18) (Extra) Modifique o circuito projetado anteriormente para transformá-lo em uma fonte simétrica de  $\pm 15V$ .

**Resposta:**

- Projeto Circuito Retificador de fonte Simétrica:

1. Determinando o valor da fonte e retirando os dados do enunciado:

O valor de entrada, dada pelo enunciado, é de 120V, para encontrar o valor de pico, basta multiplicar essa tensão por  $\sqrt{2}$ , sendo assim:

$$V_{pico} = 120 \cdot \sqrt{2}\tag{73}$$

$$V_{pico} = 169,706V\tag{74}$$

A fonte irá atuar em uma frequência de 60Hz. A corrente mínima da carga é de 5mA e a corrente máxima é de 20mA.

2. Transformador:

O transformador utilizado será o TRAN-2P3S, que terá a função de transformar 120V em 15V. Para isso, será necessário alterar o valor de indutância da entrada do transformador, para tanto, utiliza-se a seguinte equação:

$$L_1 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 \cdot L_2\tag{75}$$

sendo  $V_1$  a tensão de entrada da fonte,  $V_2$  a tensão desejada na saída com um erro de 0,5 e  $L_2$  a indutância na saída igual a 1H. Substituindo os valores na equação (75), tem-se que:

$$L_1 = \left( \frac{120}{15,5} \right)^2 \cdot 1 \quad (76)$$

$$L_1 = 59,94H$$

Como estamos utilizando fonte simétrica, dividimos este valor para 2 enrolamentos do transformador ou seja:

$$L_1 = \frac{59,94}{2} \quad (77)$$

$$L_1 = 29.97H \quad (78)$$

### 3. Diodo:

Os diodos escolhidos para a montagem da ponte de diodo foi o 1N4001, uma vez que suas características atendem a demanda solicitada pelo enunciado.

O diodo 1N4001 apresenta tensão de ruptura de 50V e corrente máxima direta de 1A.

### 4. Carga resistiva:

Para determinar a resistência da carga resistiva, utiliza-se a 1ª lei de ohm:

$$V_L = R_L \cdot I_L \quad (79)$$

Isolando  $R_L$  e considerando  $V_L$  igual a 15V, tem-se que:

$$R_{Lmin} = \frac{15V}{5mA} \quad (80)$$

$$R_{Lmin} = 3k\Omega$$

$$R_{Lmax} = \frac{15V}{20mA} \quad (81)$$

$$R_{Lmax} = 750\Omega$$

Utilizaremos o resistor de maior valor, ou seja 3kΩ.

### 5. Filtro Capacitivo:

O valor da tensão máxima obtida foi de 14,8V, é possível calcular a tensão de Ripple, pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} V_R &= V_{max} \cdot 10\% \\ V_R &= 1,48V \end{aligned} \quad (82)$$

Para determinar o valor de capacitância a ser utilizado, utiliza-se a equação:

$$V_R = \frac{I_o}{fC} \quad (83)$$

Sendo  $I_o$ :

$$\begin{aligned} I_o &= \frac{0,636 \cdot V_m}{R_L} \\ I_o &= \frac{0,636 \cdot 14,8}{3000} \\ I_o &= 3,13mA \end{aligned} \quad (84)$$

Isolando C e substituindo as variáveis na equação (82):

$$\begin{aligned} C &= \frac{I_o}{fV_R} \\ C &= \frac{3,13mA}{120Hz \cdot 1,48V} \\ C &= 17,62\mu F \end{aligned} \quad (85)$$

O capacitor comercial a ser utilizado é o de  $18\mu F$ .

O filtro capacitivo é utilizado com a finalidade de reduzir variações de tensão e corrente. No circuito, servem para eliminar uma tensão alternada pulsativa e transformá-la em uma (tensão contínua) que varia menos.

#### 6. Regulador de tensão:

Para a montagem do regulador de tensão é necessário a utilização de um resistor, cuja resistência deve ser calculada, e um diodo Zener, o diodo utilizado foi o 1N4744A.

Para calcular a resistência, temos que a tensão mínima Ripple é de  $18,2V$ , e a tensão que desejamos na carga é de  $1V$ .

A resistência pode ser obtida a partir da seguinte equação:

$$R_{Smax} = \frac{V_{Smin} - V_z}{I_{Lmax}} \quad (86)$$



Substituindo os valores na equação, temos que:

$$\begin{aligned} R_{Smax} &= \frac{18,2 - 12}{20mA} \\ R_{Smax} &= 160\Omega \end{aligned} \quad (87)$$

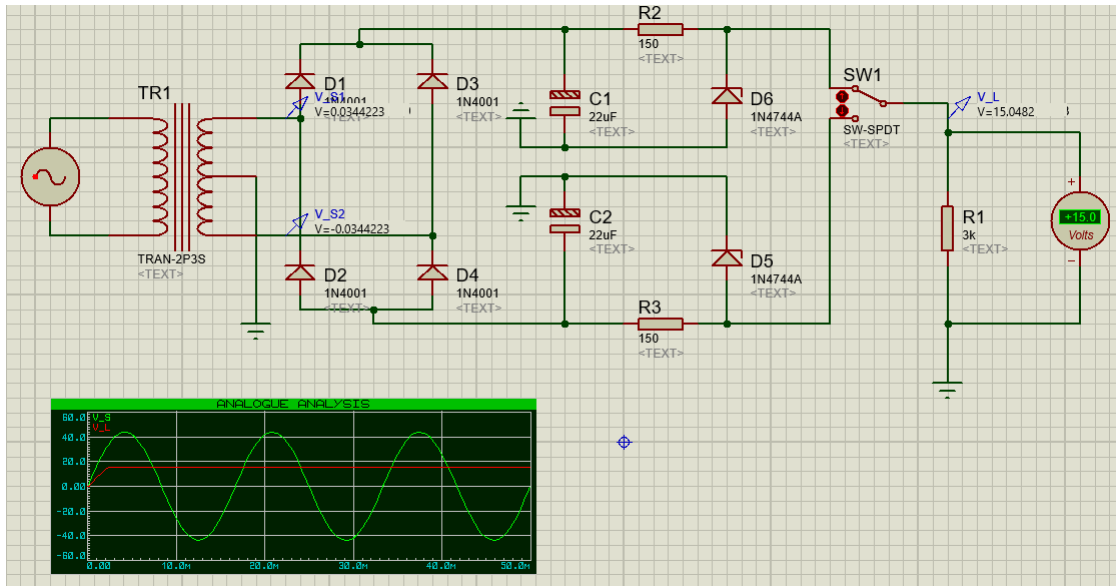
O resistor comercial a ser utilizado é o de 150Ω.

Para verificar se o circuito está funcionando na região de ruptura, deve-se calcular a tensão de Thevenan.

$$\begin{aligned} V_{Th} &= \frac{R_L}{R_S + R_L} \cdot V_S \\ V_{Th} &= \frac{3000}{150 + 3000} \cdot 18,2 \\ V_{Th} &= 17,33V \end{aligned} \quad (88)$$

Como  $V_{Th} > 15$ , pode-se afirmar que o circuito opera na região de ruptura.

O circuito final pode ser observado na imagem abaixo, juntamente com a forma de onda:



**Figura 35:** Circuito com fonte simétrica com saída +15V

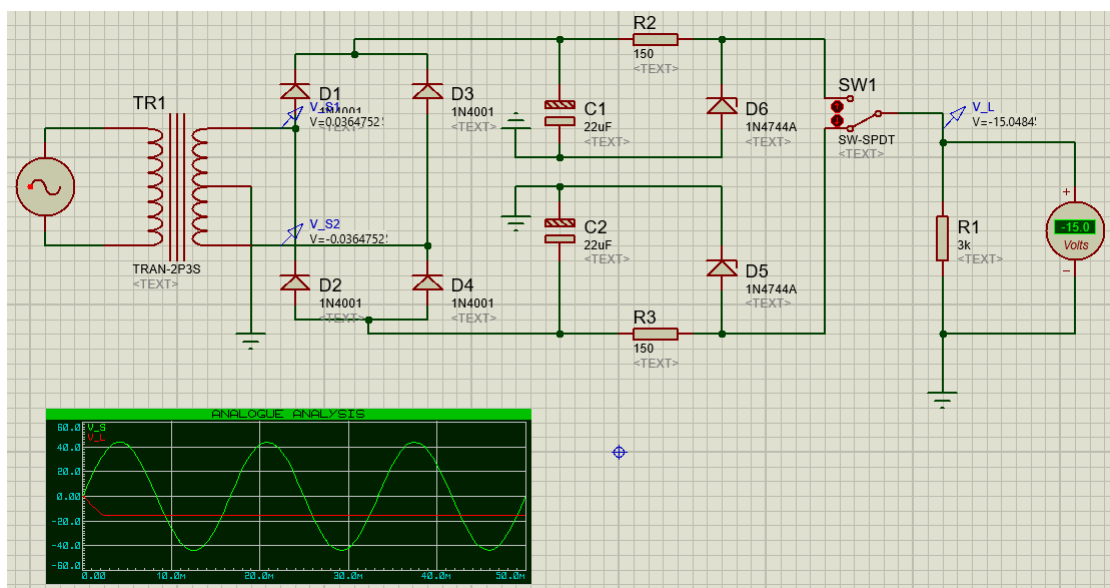


Figura 36: Circuito com fonte simétrica com saída -15V