

Modelo Linearizado de Diodo Retificador

Referência

Veronese, PR – Apostila “Modelos Lineares de Diodos”, EESC-USP.

Polarização Direta

$$(V_D \geq 0)$$

A **equação de Shockley é ideal**, isto é, não leva em conta as perdas resistivas do cristal de Si e das resistências ôhmicas dos terminais do diodo, englobadas em uma **resistência R_S** , que é um parâmetro de modelagem do diodo real e, portanto, deve ser acrescentado na equação de Shockley. Na equação idealizada de Shockley, $R_S = 0$ e V_D é a tensão total entre ânodo e cátodo.

**Equação de Shockley
(Ideal)**

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{NV_t}} - 1 \right)$$

**Equação de Shockley
(Real)**

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D - R_S I_D}{NV_t}} - 1 \right)$$

A equação real representa os resultados experimentais de $I_D \times V_D$!

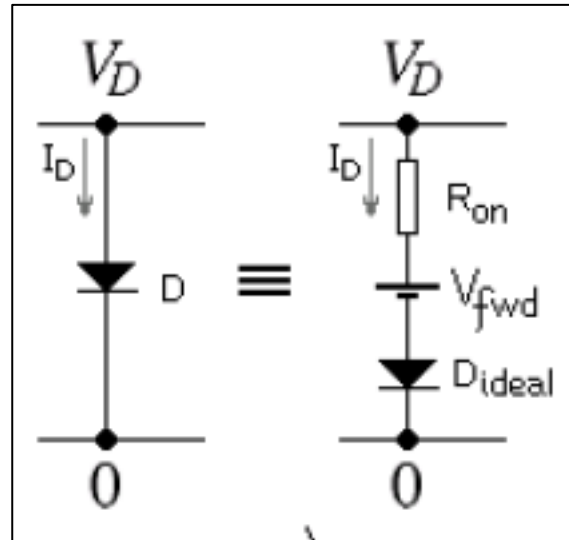
**Equação de Shockley
(Real)**

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D - R_S I_D}{N V_t}} - 1 \right)$$

$$\rightarrow e^{\frac{V_D}{N V_t}} = \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right) e^{\frac{R_S I_D}{N V_t}} \rightarrow \frac{V_D}{N V_t} = \frac{R_S I_D}{N V_t} + \ln \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right)$$

$$R_{on} = \frac{\delta V_D}{\delta I_D} \rightarrow R_{on} = R_S + \frac{N V_t}{I_D + I_S}$$

$$\rightarrow V_{fwd} = V_D - R_{on} I_D$$

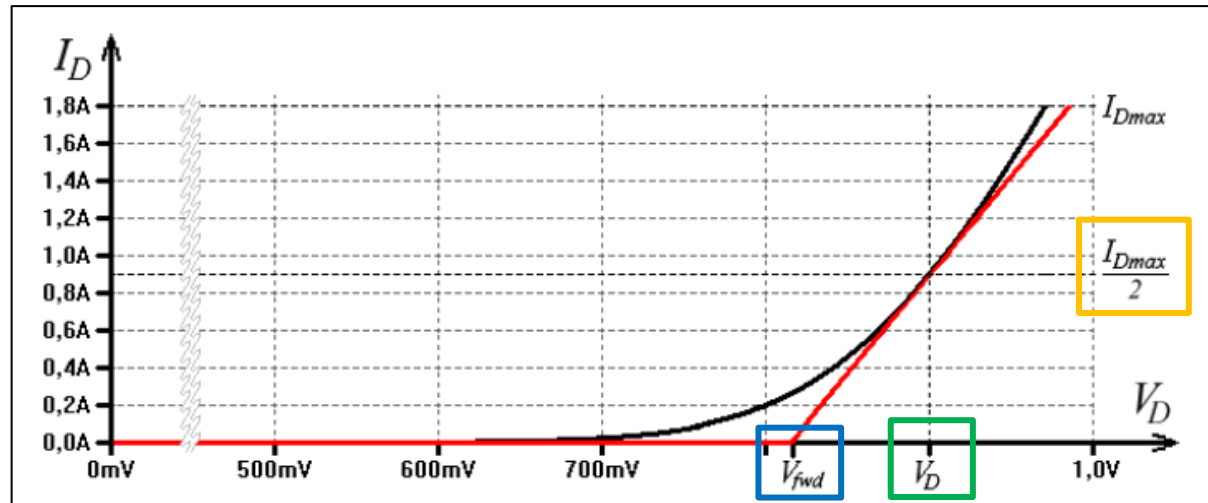


**Modelo Linear
do Diodo
na Polarização
Direta
($V_D \geq 0$)**

R_S é a resistência de perdas do diodo real

R_{on} é a resistência de perdas do modelo linearizado.

Diferente de R_S é calculada pela derivada $\partial V_D / \partial I_D$ para estabelecer a tangência da reta no ponto da curva do diodo real, correspondente ao valor de I_D escolhido, geralmente igual a $I_{Dmax}/2$.

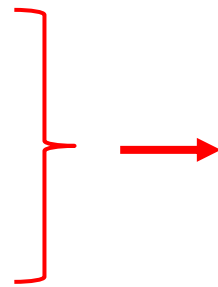


A figura mostra as curvas real e linearizada de um diodo em polarização direta.

O ponto de tangência entre elas deve ficar aproximadamente em torno de $I_{Dmax} / 2$.

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D - R_S I_D}{N V_t}} - 1 \right)$$

$$R_{on} = R_S + \frac{N V_t}{I_D + I_S}$$



$$R_{on} = \frac{[N V_t + R_S (I_D + I_S)] \exp\left(\frac{R_S I_D}{N V_t}\right)}{I_D \exp\left(\frac{V_D}{N V_t}\right)}$$

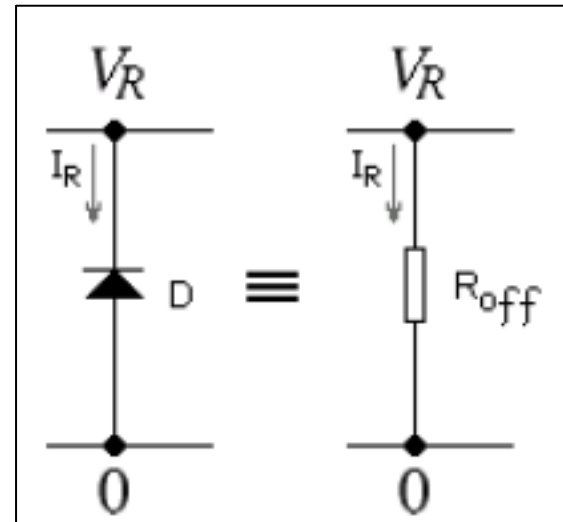
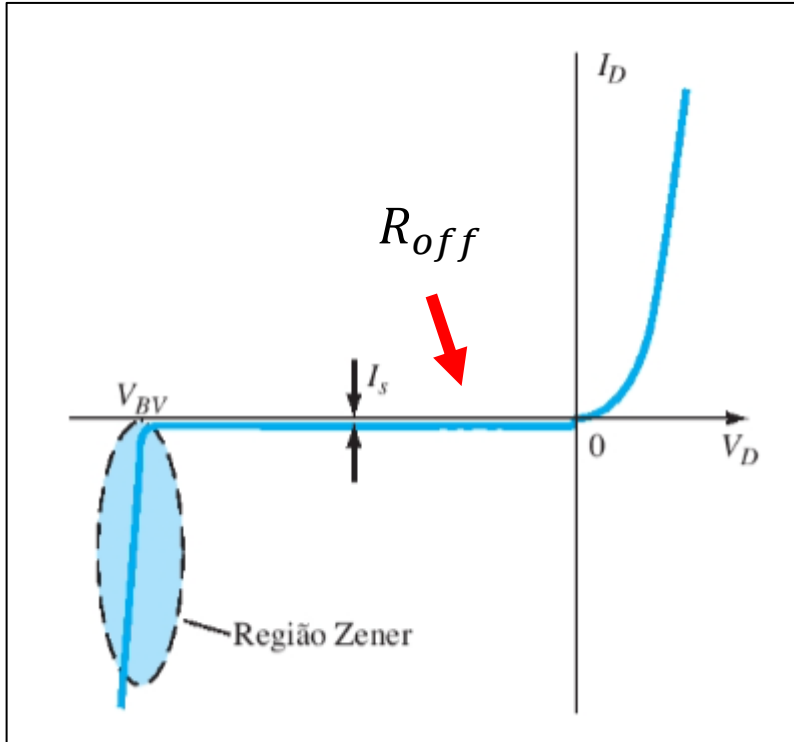
$$V_{fwd} = V_D - R_{on} I_D$$

$$V_D = N V_t \ln \left(\frac{I_D}{I_S} - 1 \right) + R_S I_D$$

Polarização Reversa

$$(-B_V \leq V_R \leq 0)$$

Polarização reversa antes da ruptura ($-B_V \leq V_R \leq 0$)



$$R_{off} = \frac{V_R}{I_R}$$

**Exercício de Modelo
Linearizado de
Diodo Retificador**

Exercício 1

Dois diodos de silício possuem os seguintes parâmetros de modelagem a 27°C:

Diodos	I_S [A]	R_S [Ω]	N	B_V [V]	I_{BV} [A]
<i>Zener</i>	1,9917 f	17,6246	1,0104	4,4	229,14 f
<i>Retificador</i>	3,9 n	0,457	1,6923	1000	62,25 μ

Calcular um modelo linearizado para o diodo retificador usando correntes no intervalo $300\text{mA} \leq I_D \leq 1\text{A}$. $V_t = 25,8642\text{mV}$ a 27°C.

Diodos	I_S [A]	R_S [Ω]	N	B_V [V]	I_{BV} [A]
Zener	1,9917 f	17,6246	1,0104	4,4	229,14 f
Retificador	3,9 n	0,457	1,6923	1000	62,25 μ

1 Equações de modelagem do diodo retificador:

$$I_D = I_S \left[\exp \left(\frac{V_D - R_S I_D}{N V_t} \right) - 1 \right] \longrightarrow \begin{cases} I_D = I_S \left[\exp \left(\frac{V_{Di}}{N V_t} \right) - 1 \right] & [1] \\ V_D = V_{Di} + R_S I_D & [2] \end{cases}$$

2 Na equação de I_D calcula-se V_{Di} para $I_D = 1A$ e $\Theta = 27^\circ C$

$$[1] \longrightarrow 1 = 3,9 \times 10^{-9} \left[\exp \left(\frac{V_{Di}}{1,6923 \times 25,8642 \times 10^{-3}} \right) - 1 \right] \longrightarrow V_{Di} = 0,8475V$$

$$[2] \longrightarrow V_D = V_{Di} + R_S I_D \longrightarrow V_D = 0,8475 + 0,457 \times 1 = 1,304V$$

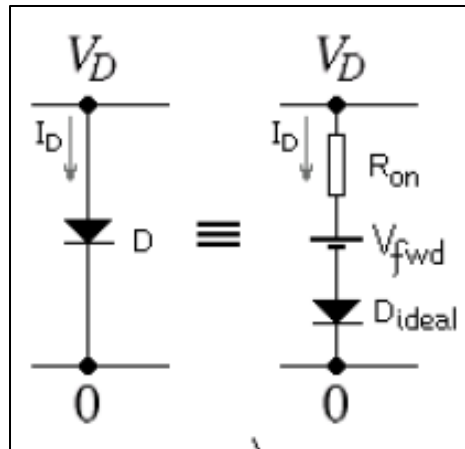
$$\longrightarrow V_D = 1,304V$$

3 Na equação de I_D calcula-se V_{Di} para $I_D = 300mA$ e $\Theta = 27^\circ C$

$$[1] \longrightarrow 0,3 = 3,9 \times 10^{-9} \left[\exp \left(\frac{V_{Di}}{1,6923 \times 25,8642 \times 10^{-3}} \right) - 1 \right] \longrightarrow V_{Di} = 0,79485V$$

$$[2] \longrightarrow V_D = V_{Di} + R_S I_D \longrightarrow V_D = 0,7948 + 0,457 \times 0,3 = 0,9319V$$

$$\longrightarrow V_D = 0,9319V$$



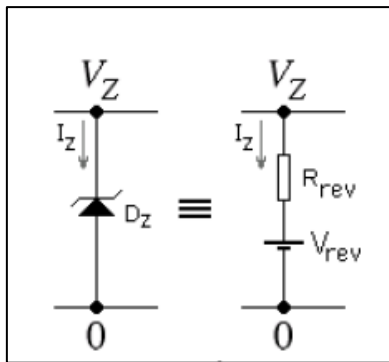
$$V_D = V_{fwd} + R_{on} I_D \longrightarrow \begin{cases} 1,304 = V_{fwd} + R_{on} \times 1 \\ 0,9319 = V_{fwd} + R_{on} \times 0,3 \end{cases}$$

$$R_{on} = 0,5323\Omega$$

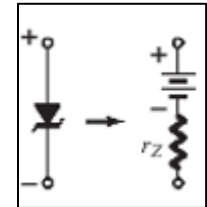
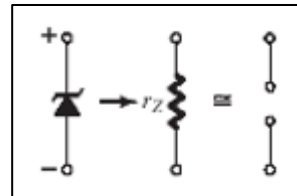
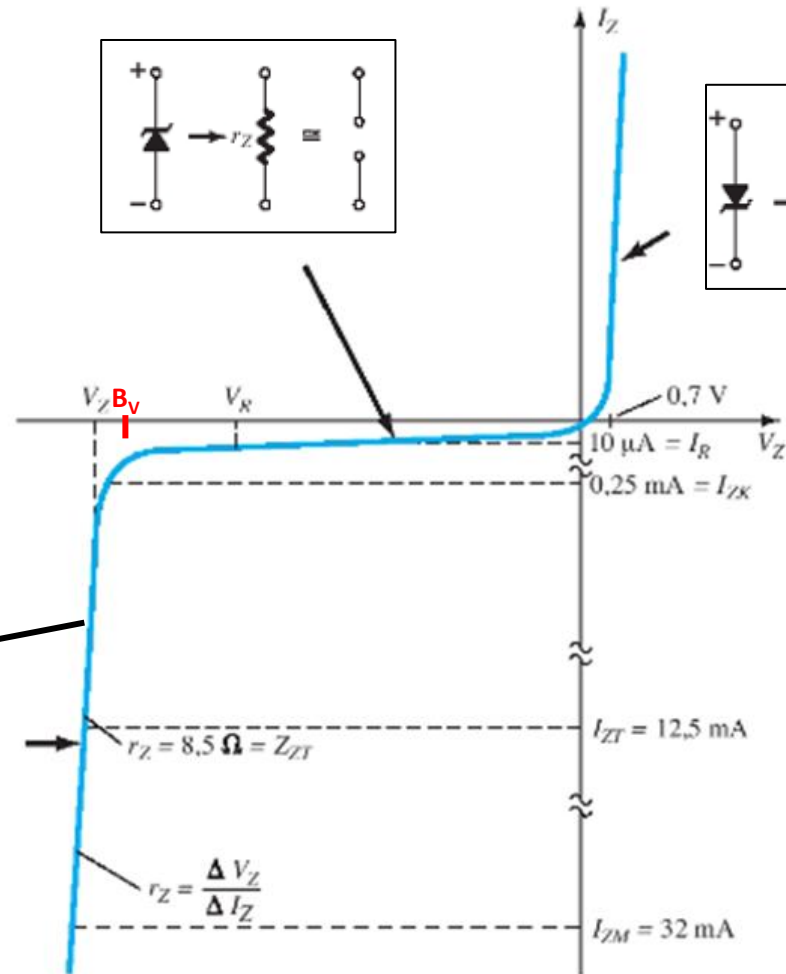
$$V_{fwd} = 0,772V$$

Modelo Linearizado de Diodo Zener

Polarização reversa na ruptura em diodos tipo Zener ($V_Z \leq -B_V$)



$$I_Z = I_{BV} e^{\frac{V_Z - B_V - R_S I_D}{V_t}}$$



$$I_Z = I_{BV} e^{\frac{V_Z - B_V - R_S I_D}{V_t}}$$

Nesta equação, de maneira análoga ao realizado para o diodo, a exponencial é isolada e obtém-se uma equação para $V_{rev} \times I_Z$, sendo:

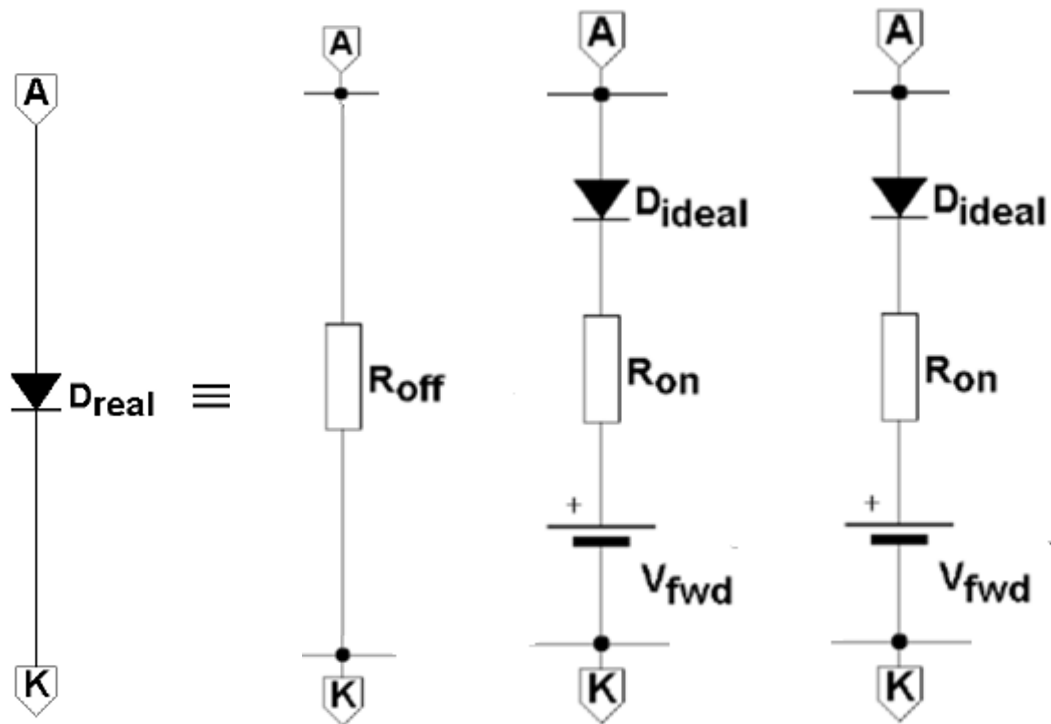
$$R_{rev} = \frac{\delta V_{rev}}{\delta I_Z}$$



$$R_{rev} = \frac{(V_t + R_S i_Z) \exp\left[\frac{R_S I_Z}{V_t}\right]}{I_{BV} \exp\left(\frac{V_Z - B_V}{V_t}\right)}$$

$$V_{rev} = V_Z - R_{rev} I_Z$$

$$V_Z = V_t \ln \frac{I_Z}{I_{BV}} + B_V + R_S I_Z$$



Modelo Linearizado de um Diodo

Exercício de Modelo Linearizado de Diodo Zener

Exercício 2

Dois diodos de silício possuem os seguintes parâmetros de modelagem a 27°C:

Diodos	I_S [A]	R_S [Ω]	N	B_V [V]	I_{BV} [A]
<i>Zener</i>	1,9917 f	17,6246	1,0104	4,4	229,14 f
<i>Retificador</i>	3,9 n	0,457	1,6923	1000	62,25 μ

Calcular um modelo linearizado para o diodo zener usando correntes no intervalo $I_z = 1\text{mA}$ e $I_z = 50\text{mA}$. $V_t = 25,8642\text{mV}$ a 27°C.

Diodos	I_S [A]	R_S [Ω]	N	B_V [V]	I_{BV} [A]
Zener	1,9917 f	17,6246	1,0104	4,4	229,14 f
Retificador	3,9 n	0,457	1,6923	1000	62,25 μ

1 Equações de modelagem do diodo zener:

$$I_Z = I_{BV} e^{\frac{V_Z - B_V - R_S I_D}{V_t}} \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_Z = I_{BV} \exp\left(\frac{V_{Zi} - B_V}{V_t}\right) \quad [3] \\ V_Z = V_{Zi} + R_S I_D \quad [4] \end{array} \right.$$

2 Na equação de I_Z calcula-se V_{Zi} para $I_Z = 50\text{mA}$ e $\Theta = 27^\circ\text{C}$

$$[3] \longrightarrow 0,05 = 229,14 \times 10^{-15} \exp\left(\frac{V_{Zi} - 4,4}{25,8642 \times 10^{-3}}\right) \longrightarrow V_{Zi} = 5,7528\text{V}$$

$$[4] \longrightarrow V_Z = V_{Zi} + R_S I_D \longrightarrow V_Z = 5,07528 + 17,6245 \times 0,05 = 5,95651\text{V}$$

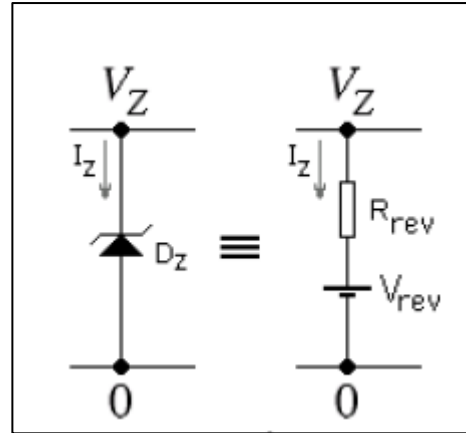
$$\longrightarrow V_Z = 5,95651\text{V}$$

3 Na equação de I_Z calcula-se V_{Zi} para $I_Z = 1\text{mA}$ e $\Theta = 27^\circ\text{C}$

$$[3] \longrightarrow 0,001 = 229,14 \times 10^{-15} \exp\left(\frac{V_{Zi} - 4,4}{25,8642 \times 10^{-3}}\right) \longrightarrow V_{Zi} = 4,9741\text{V}$$

$$[4] \longrightarrow V_Z = V_{Zi} + R_S I_D \longrightarrow V_Z = 4,9741 + 17,6245 \times 0,001 = 4,99172\text{V}$$

$$\longrightarrow V_Z = 4,99172\text{V}$$



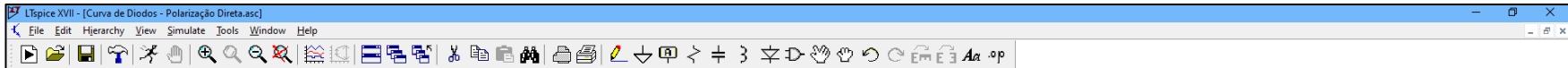
$$V_Z = V_{rev} + I_Z R_{rev} \rightarrow \begin{cases} 5,95651 = V_{rev} + R_{rev} \times 0,05 \\ 4,99172 = V_{rev} + R_{rev} \times 0,001 \end{cases}$$

$$R_{rev} = 19,6895 \Omega$$

$$V_{rev} = 4,972 \text{ V}$$

Simulação em LTSPice

Efeito de modelos linearizados
na curva $I_D \times V_D$



Exemplo de linearização de diodos

O diodo 1N4004 suporta:

1A de corrente contínua direta máxima

30A de corrente de pico não repetitivo.

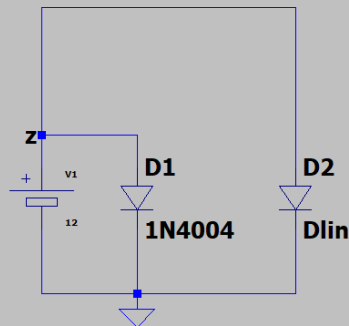
A tensão de ruptura reversa é igual a 400V.

O LTSpice aceita parâmetros de modelos linearizados, como mostra o .model Dlin abaixo.

Para simular a ruptura reversa, plotar I(D1) e I(D2) com .dc V1 -400.8 -397 1m

Para simular a polarização direta, plotar I(D1) e I(D2) com .dc V1 0 1 1m

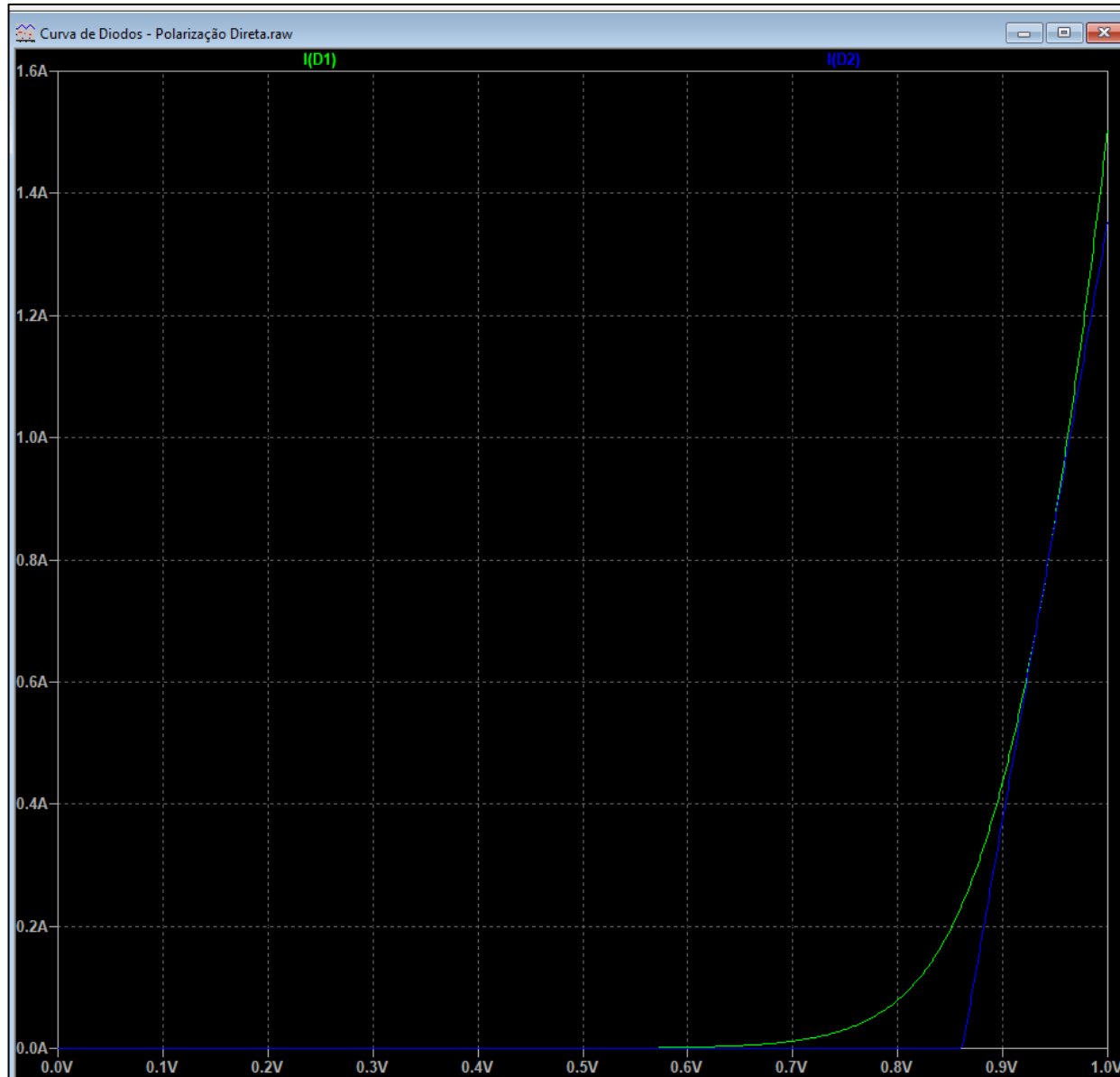
Para simular a polarização reversa, plotar I(D1) e I(D2) com .dc V1 -399 0 1m



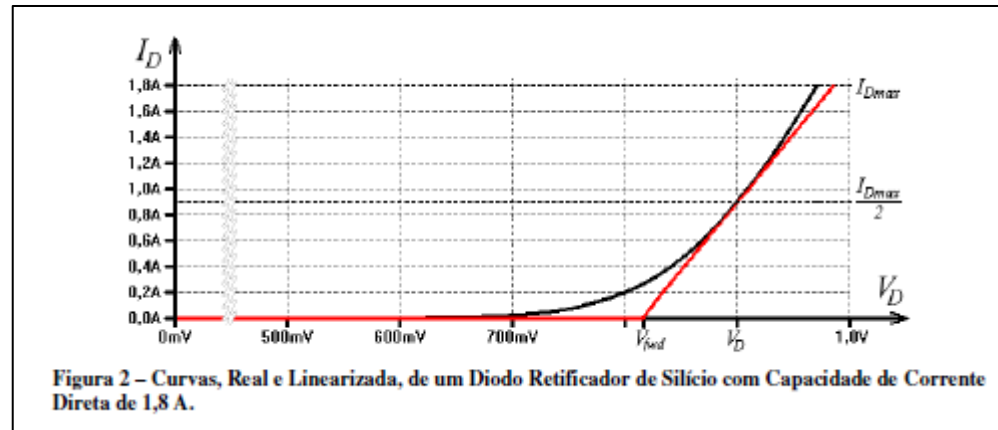
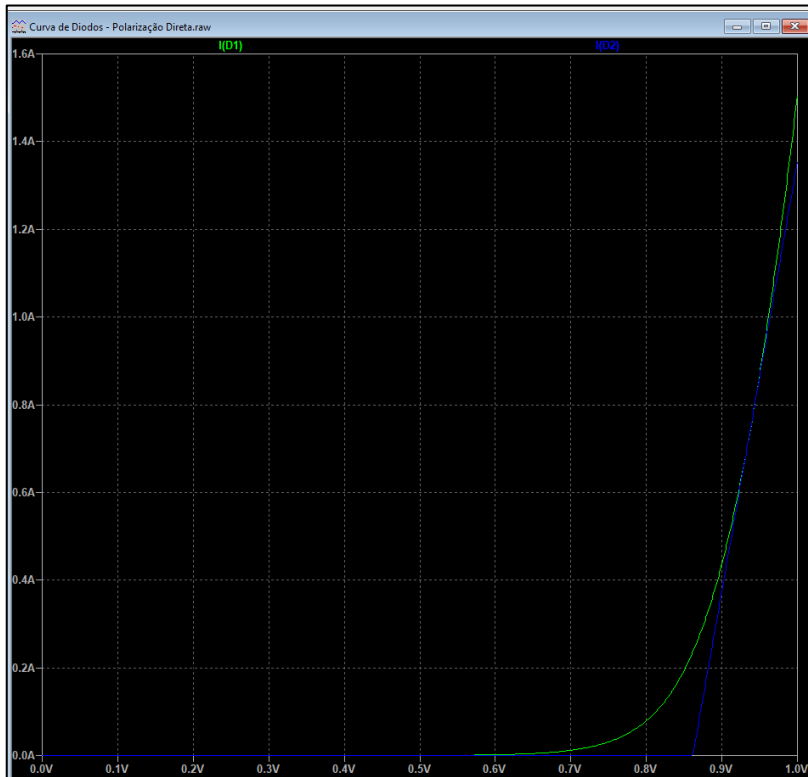
```
.model Dlin D(Vfwd=0.861530034084 Ron=0.102311419647 Vrev=400.4 Rrev=30m Roff=25G)
```

```
;dc V1 0 1 1m  
;dc V1 -0.86 1 1m  
;dc V1 -400.8 -397 1m  
.dc V1 list -399 0 1m
```

Simulação da polarização direta: plotar I(D1) e I(D2)
(.dc V1 0 1 1m)

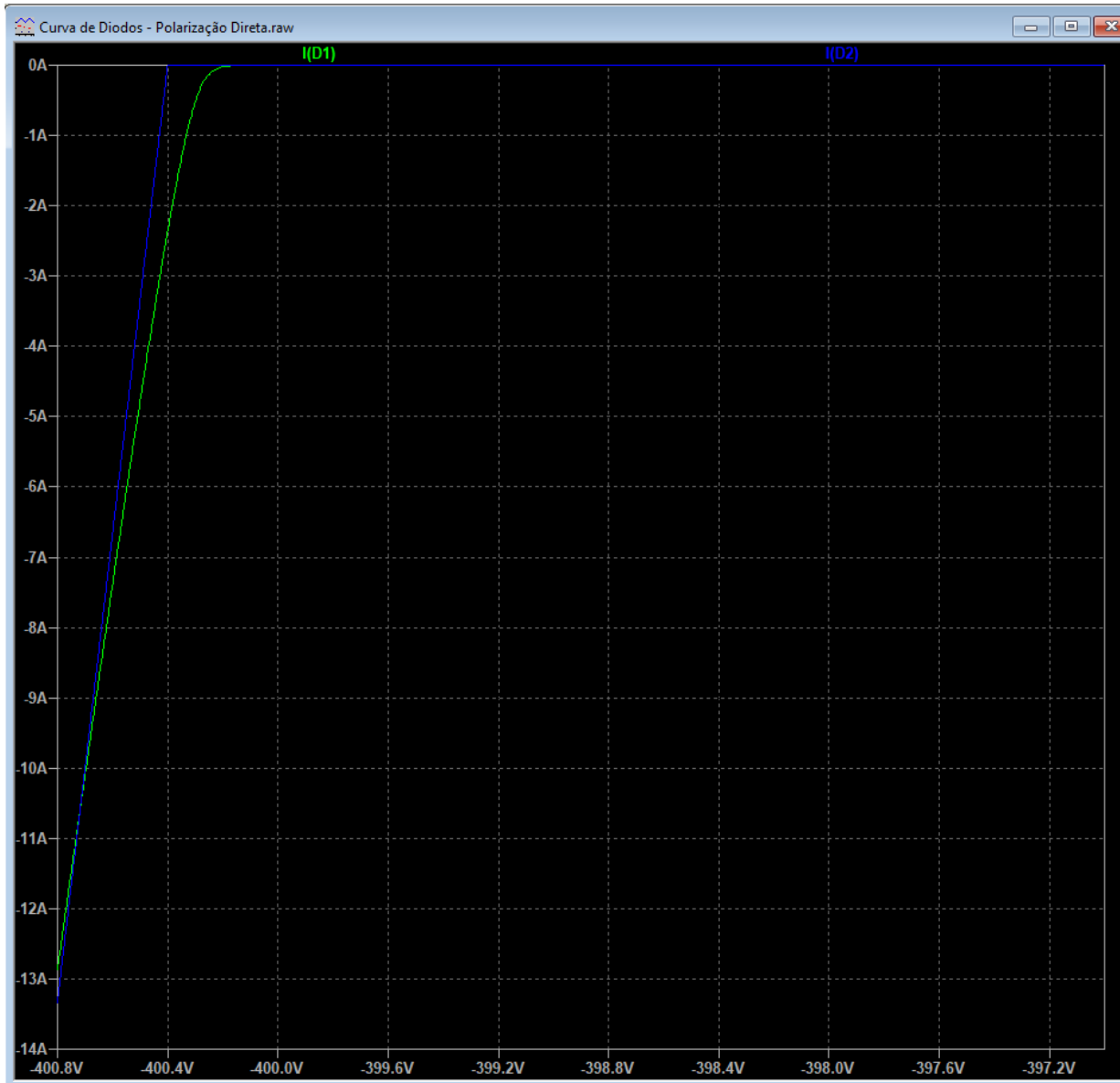


Simulação da polarização direta: plotar I(D1) e I(D2)
(.dc V1 0 1 1m)

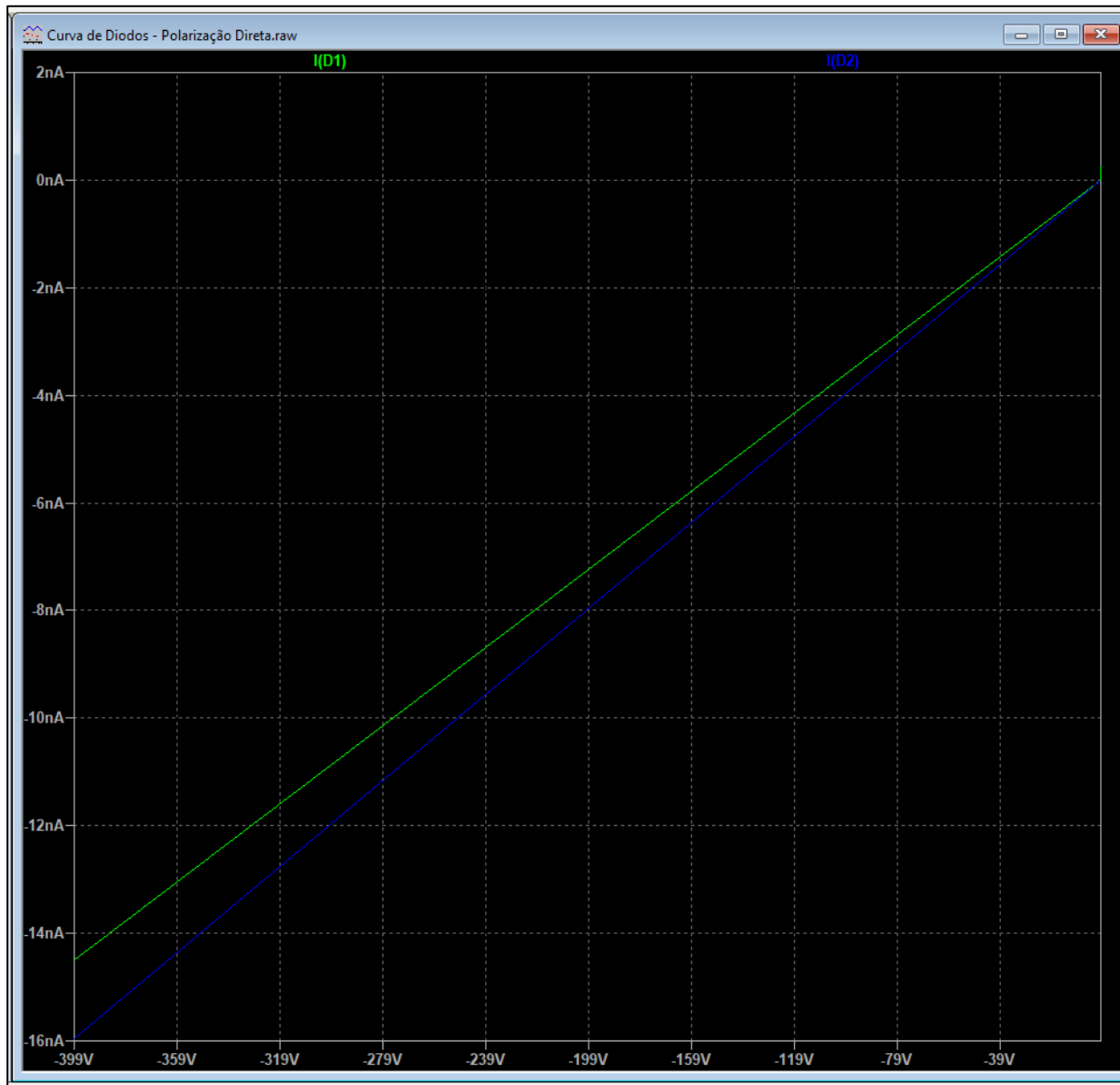


A Figura 2 mostra as curvas, real e linearizada, de um diodo em polarização direta. O ponto de tangência entre elas deve ficar aproximadamente em torno de $I_{Dmax}/2$.

Simulação da ruptura reversa: plotar I(D1) e I(D2) (.dc V1 -400.8 -397 1m)



**Simulação da polarização reversa: plotar I(D1) e I(D2)
(.dc V1 -399 0 1m)**



Simulação em LTSPice

Efeito de modelos linearizados em
retificadores com filtro capacitivo

LTspice XVII - [Modelos Linearizados de Diodos - Linearização de diodos - Retificadores com Filtro e Carga.asc]

File Edit Hierarchy View Simulate Tools Window Help

Exemplo de LINEARIZAÇÃO DE DIODOS
Comparação entre diodos em circuitos de fontes de alimentação.
O erro está em torno de 1%, perfeitamente aceitável, portanto,
levando-se em conta que o modelo linearizado é bem mais simples
do que o modelo completo.
O LTSpice aceita parâmetros de modelos linearizados, como mostra o .model Dlin abaixo.

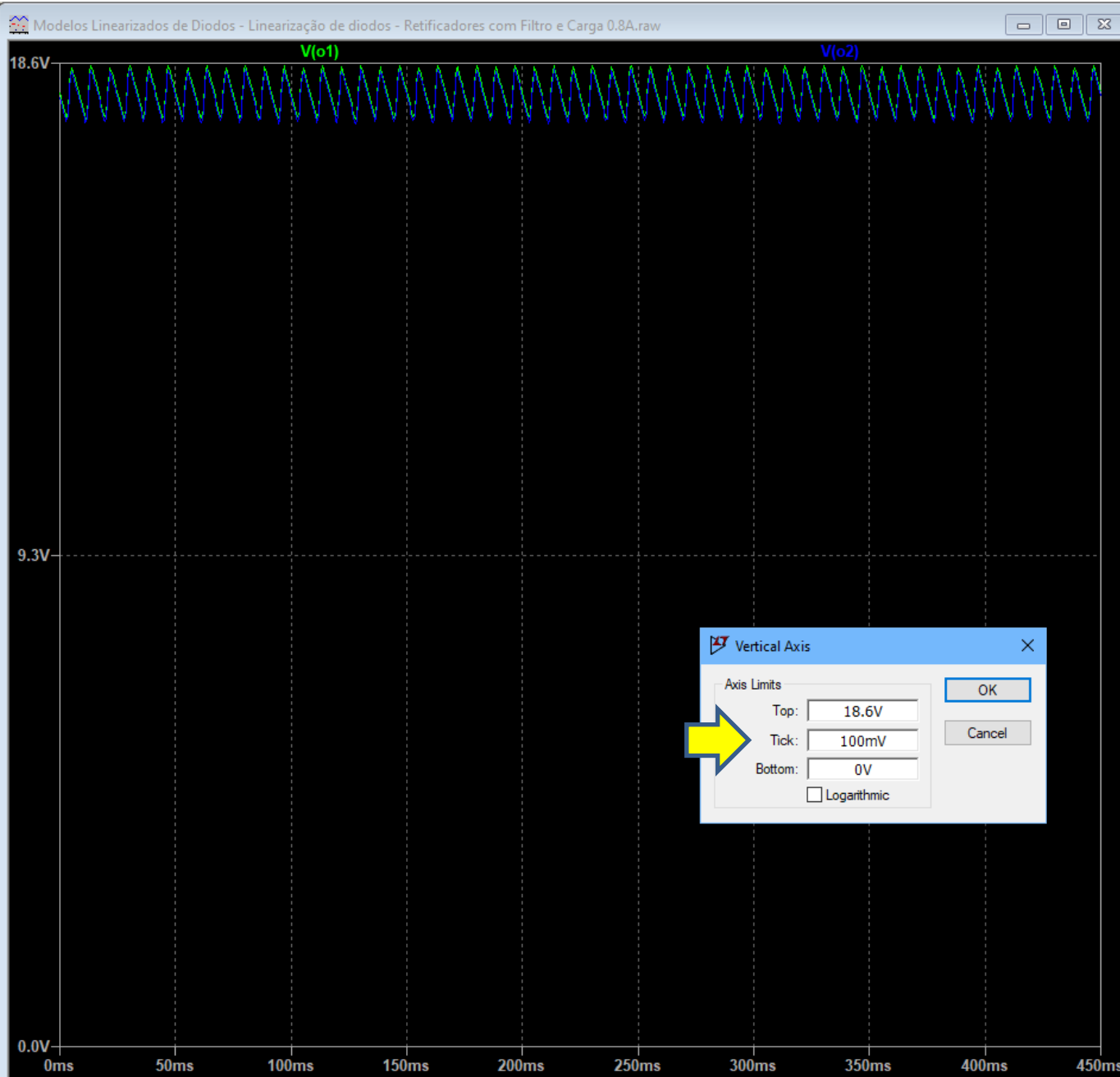
O diodo 1N4004 suporta:
1A de corrente contínua direta máxima
30A de corrente de pico não repetitivo.
A tensão de ruptura reversa é igual a 400V.

com carga **com carga**

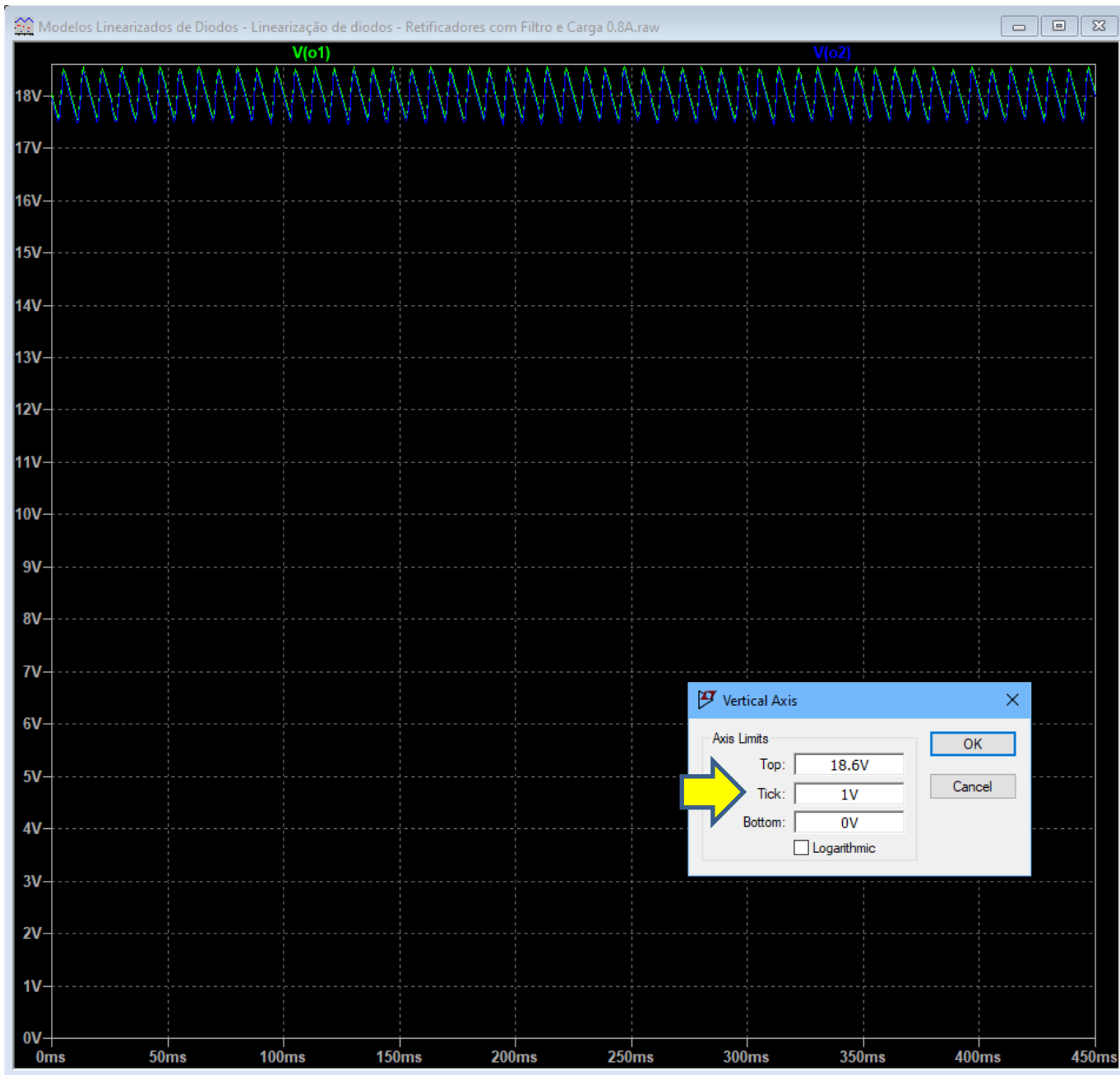
`.model Dlin D(Vfwd=0.861530034084 Ron=0.102311419647 Vrev=400.4 Rrev=30m Roff=25G)`
`.tran 0 500m 50m`

OBS: Uso dos capacitores de 100nF

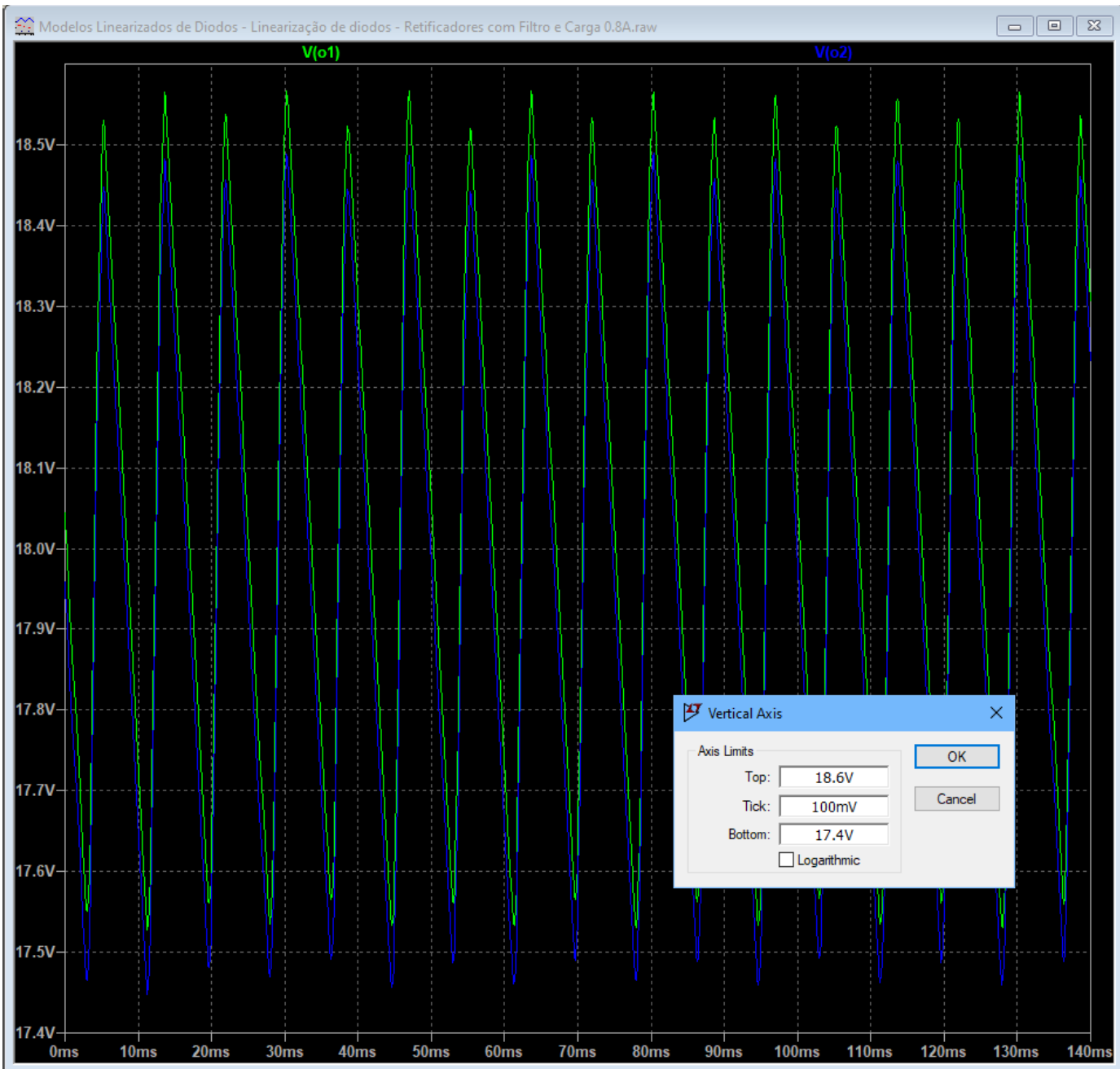
Quando a tensão senoidal que está sendo retificada está passando pelo "zero", no cruzamento entre o semiciclo negativo e o positivo, os diodos estão todos cortados e o simulador não sabe bem o que fazer. No entanto, os capacitores com baixa capacitância, em paralelo com as junções, armazenam uma pequena carga elétrica, permitem passagem de correntes nesses pontos e cancelam esse efeito de circuito aberto. A simulação, então, roda lisa !



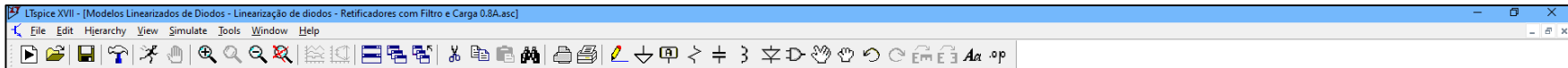
Ripple
 $V(o1)$ | com carga
e
 $V(o2)$ | com carga



Ripple
V(o1) | com carga
e
V(o2) | com carga



Ripple
 $V(o1)$ | com carga
e
 $V(o2)$ | com carga



Exemplo de LINEARIZAÇÃO DE DIODOS

Comparação entre diodos em circuitos de fontes de alimentação.

O erro está em torno de 1%, perfeitamente aceitável, portanto, levando-se em conta que o modelo linearizado é bem mais simples do que o modelo completo.

O LTSpice aceita parâmetros de modelos linearizados, como mostra o `.model Dlin` abaixo.

O diodo 1N4004 suporta:

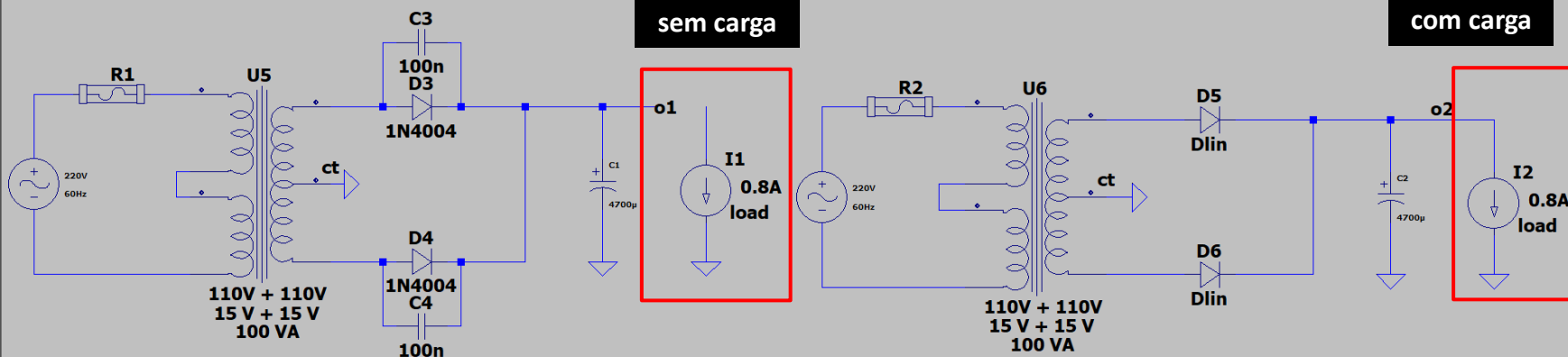
1A de corrente contínua direta máxima

30A de corrente de pico não repetitivo.

A tensão de ruptura reversa é igual a 400V.

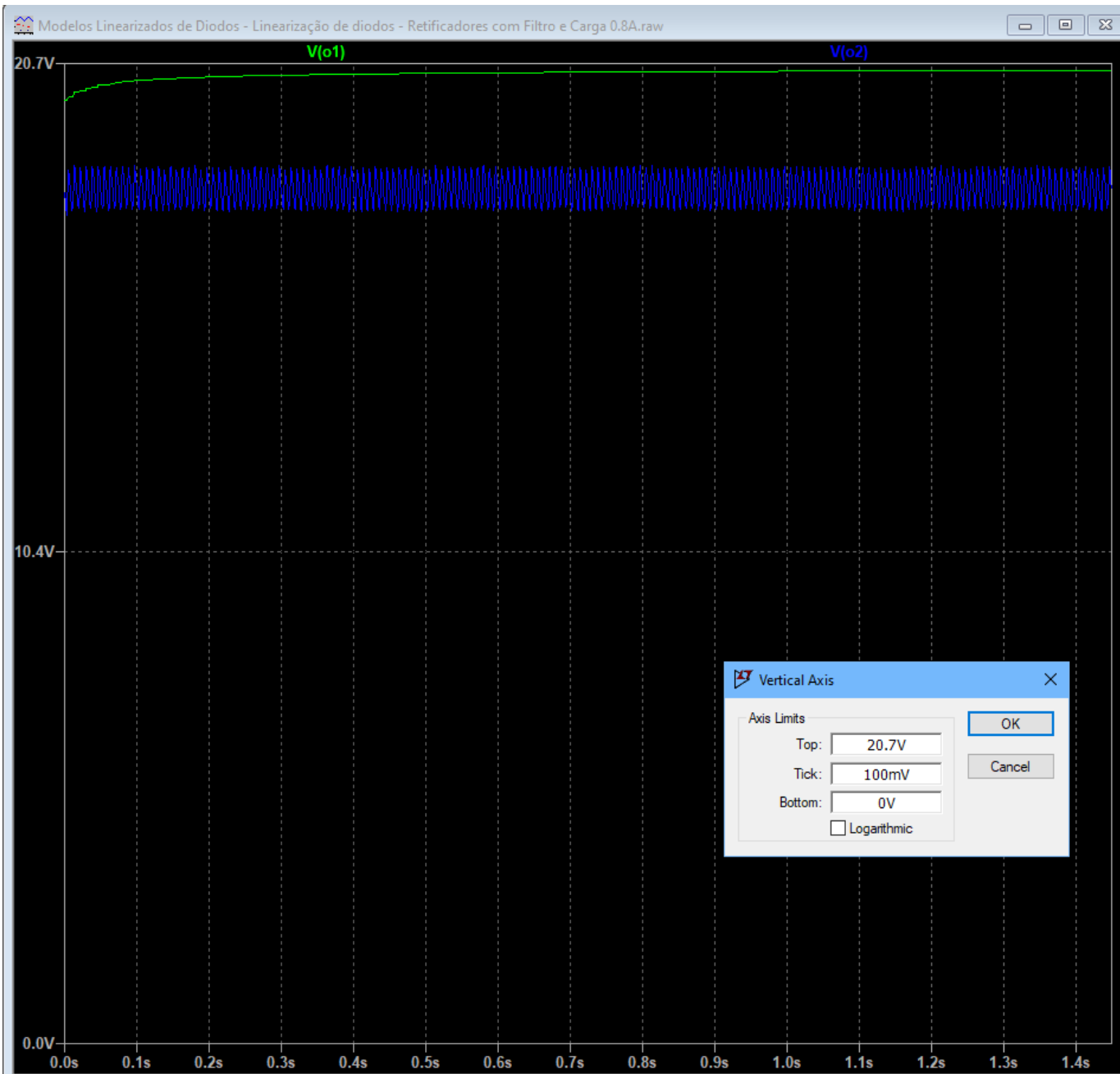
sem carga

com carga



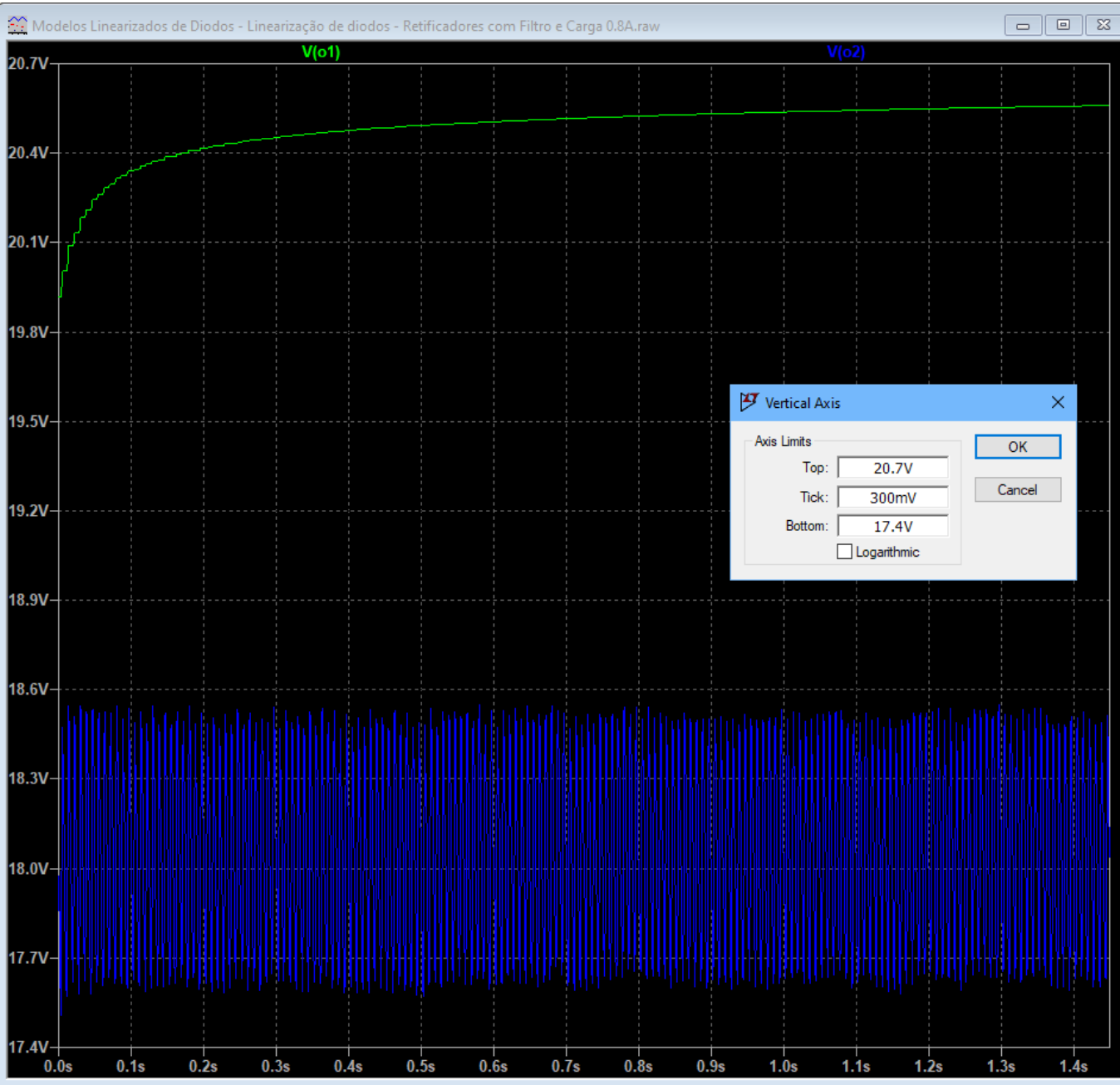
```
.model Dlin D(Vfwd=0.861530034084 Ron=0.102311419647 Vrev=400.4 Rrev=30m Roff=25G)
```

```
.tran 0 500m 50m
```

} sinal DC
V(o1) | sem carga

} Ripple
V(o2) | com carga



sinal DC
V(o1) | sem carga

Ripple
V(o2) | com carga

Exemplo de LINEARIZAÇÃO DE DIODOS

Comparação entre diodos em circuitos de fontes de alimentação.

O erro está em torno de 1%, perfeitamente aceitável, portanto, levando-se em conta que o modelo linearizado é bem mais simples do que o modelo completo.

O LTSpice aceita parâmetros de modelos linearizados, como mostra o .model Dlin abaixo.

O diodo 1N4004 suporta:

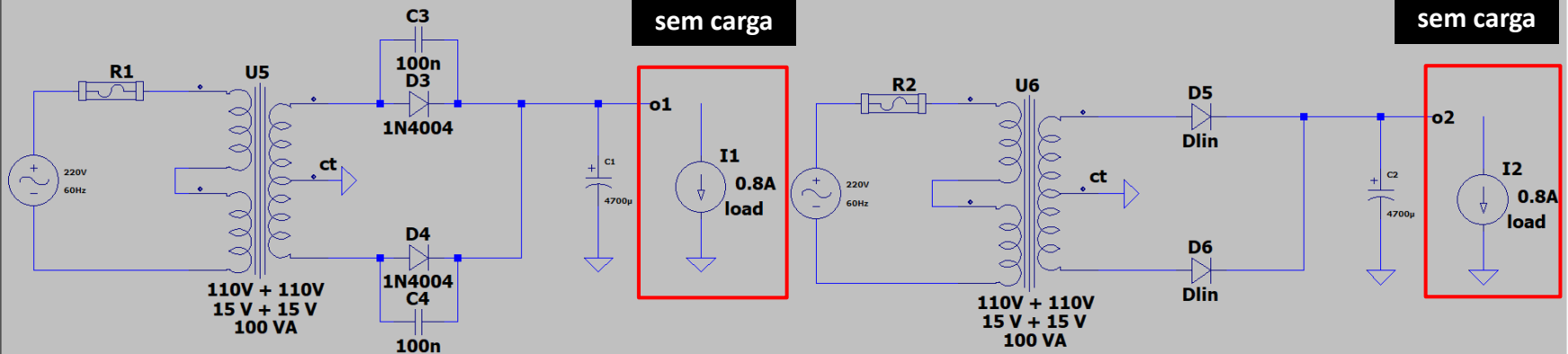
1A de corrente contínua direta máxima

30A de corrente de pico não repetitivo.

A tensão de ruptura reversa é igual a 400V.

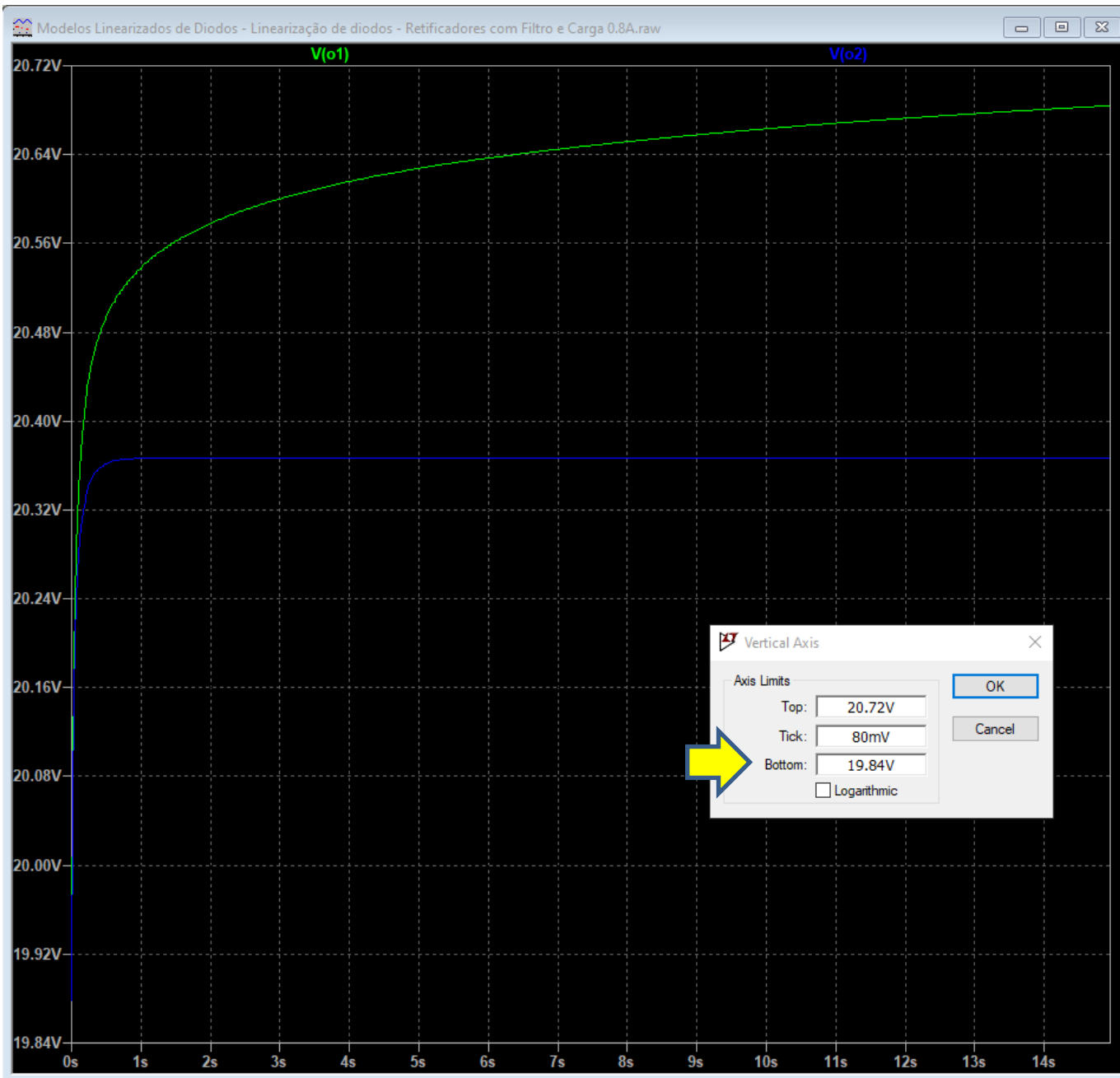
sem carga

sem carga



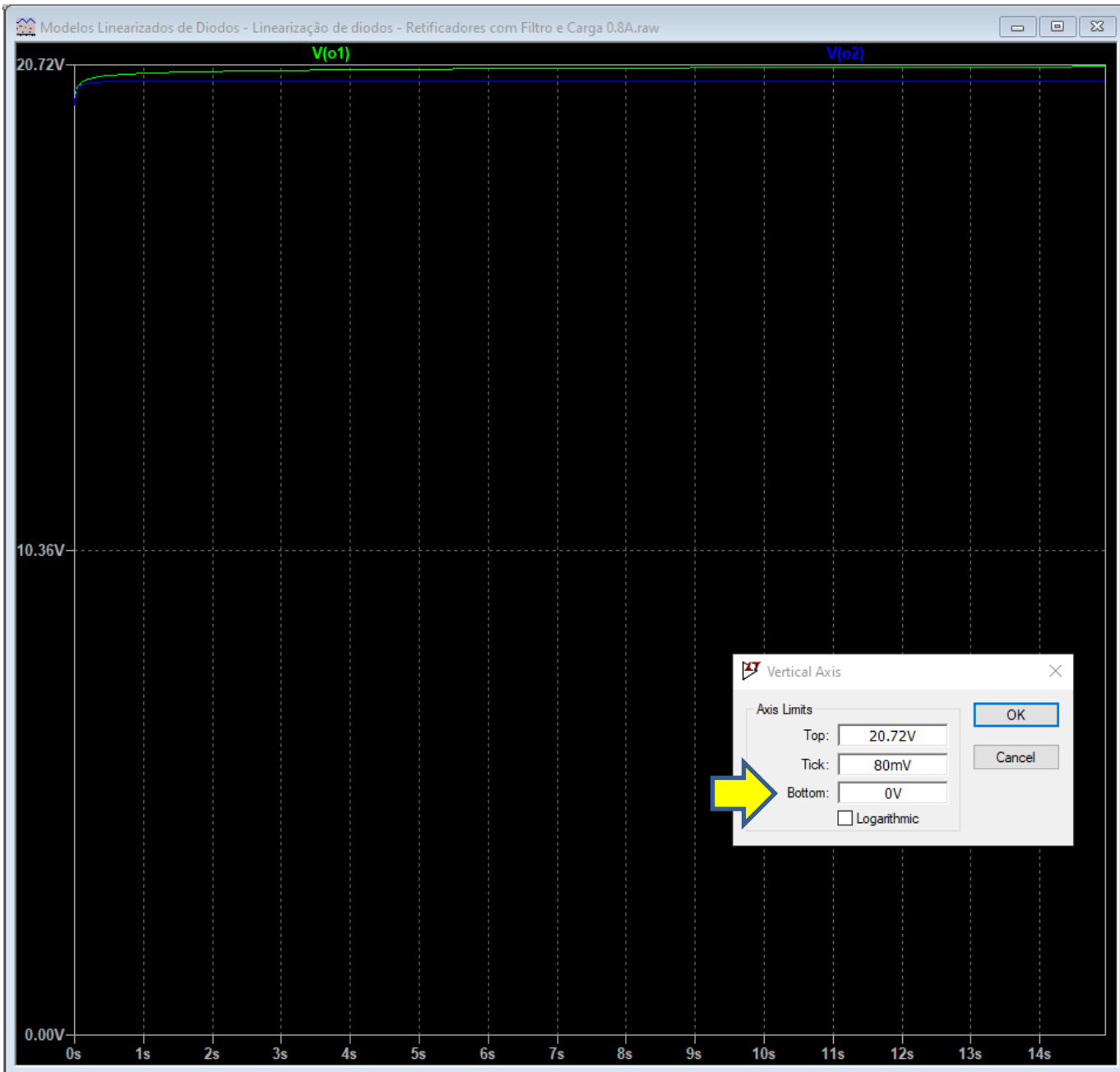
```
.model Dlin D(Vfwd=0.861530034084 Ron=0.102311419647 Vrev=400.4 Rrev=30m Roff=25G)
```

```
.tran 0 500m 50m
```



sinal DC
V(o1) | sem carga

Ripple
V(o2) | sem carga



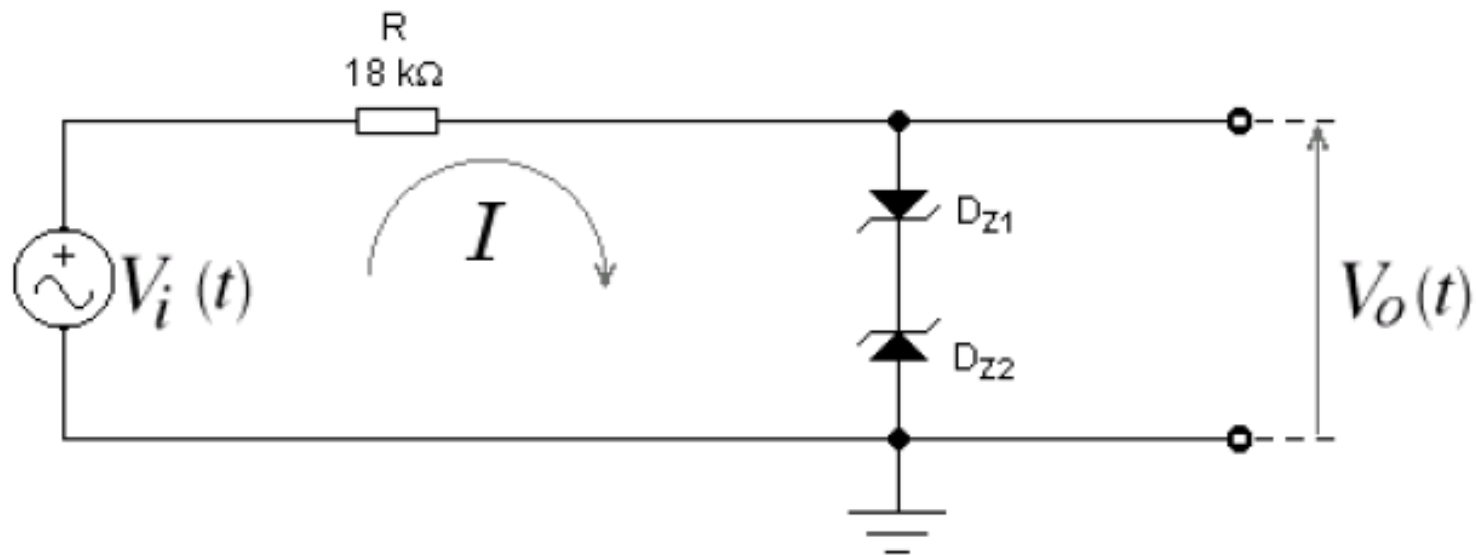
sinal DC
 $V(o1)$ | sem carga

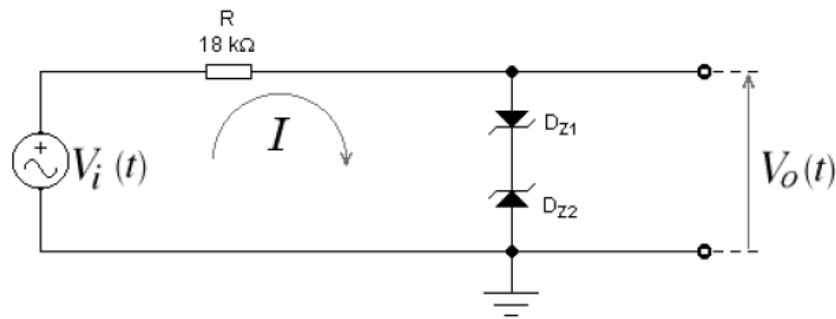
Ripple
 $V(o2)$ | sem carga

Exercício 1

(aplicação de modelos linearizados de zener)

No circuito abaixo esboçar a forma de onda de $V_o(t) \times t$. Os diodos Zener são os mesmos do exercício anterior e $V_i(t) = 1000\cos(120\pi t)$ [V].





No semiciclo positivo da senóide de entrada, o diodo D_{Z2} fica reversamente polarizado e funciona como um diodo Zener. O diodo D_{Z1} , no entanto, fica diretamente polarizado e funciona como um diodo retificador.

O modelo linearizado do diodo funcionando como Zener já foi estabelecido no exercício anterior (recordação) e apresenta: $V_{rev} = 4,972\text{ V}$ e $R_{rev} = 19,69\ \Omega$. Em polarização direta o modelo ainda precisa ser determinado.

Diodos	I_S [A]	R_S [Ω]	N	B_V [V]	I_{BV} [A]
<i>Zener</i>	1,9917 f	17,6246	1,0104	4,4	229,14 f
<i>Retificador</i>	3,9 n	0,457	1,6923	1000	62,25 μ

Diodos	I_S [A]	R_S [Ω]	N	B_V [V]	I_{BV} [A]
Zener	1,9917 f	17,6246	1,0104	4,4	229,14 f
Retificador	3,9 n	0,457	1,6923	1000	62,25 μ

1 Equações de modelagem do diodo retificador:

$$I_D = I_S \left[\exp \left(\frac{V_D - R_S I_D}{N V_t} \right) - 1 \right] \longrightarrow \begin{cases} I_D = I_S \left[\exp \left(\frac{V_{Di}}{N V_t} \right) - 1 \right] \\ V_D = V_{Di} + R_S I_D \end{cases}$$

2 Na equação de I_D calcula-se V_{Di} para $I_D = 50\text{mA}$ e $\Theta = 27^\circ\text{C}$

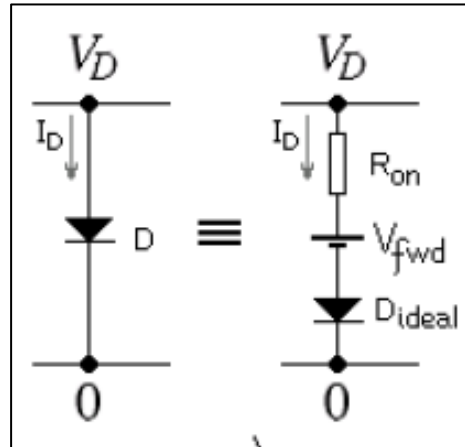
$$0.05 = 1,9917 \times 10^{-15} \left[\exp \left(\frac{V_{Di}}{1,0104 \times 25,8642 \times 10^{-3}} \right) - 1 \right] \longrightarrow V_{Di} = 0,806\text{V}$$

$$V_D = V_{Di} + R_S I_D \longrightarrow V_D = 0,806 + 17,6246 \times 0,05 = 1,6875\text{V} \longrightarrow V_D = 1,6875\text{V}$$

3 Na equação de I_D calcula-se V_{Di} para $I_D = 1\text{mA}$ e $\Theta = 27^\circ\text{C}$

$$0.001 = 1,9917 \times 10^{-15} \left[\exp \left(\frac{V_{Di}}{1,0104 \times 25,8642 \times 10^{-3}} \right) - 1 \right] \longrightarrow V_{Di} = 0,704\text{V}$$

$$V_D = V_{Di} + R_S I_D \longrightarrow V_D = 0,704 + 17,6246 \times 0,001 = 0,7217\text{V} \longrightarrow V_D = 0,7217\text{V}$$

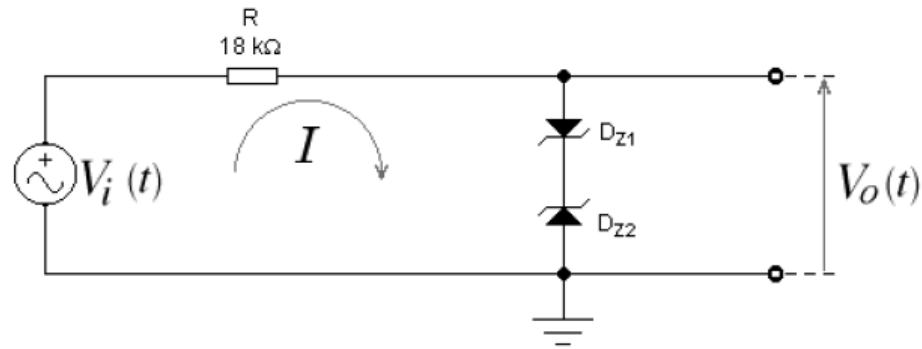


$$V_D = V_{fwd} + R_{on} I_D \longrightarrow \begin{cases} 1,6875 = V_{fwd} + R_{on} \times 0,05 \\ 0,7217 = V_{fwd} + R_{on} \times 0,001 \end{cases}$$

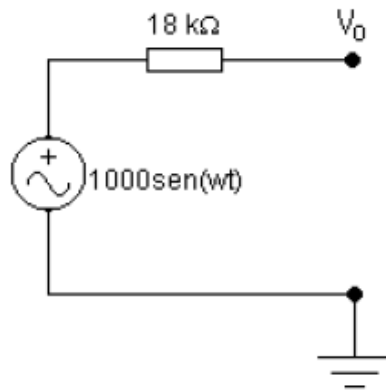
$$R_{on} = 19,711 \Omega$$

$$V_{fwd} = 0,702 \text{ V}$$

4



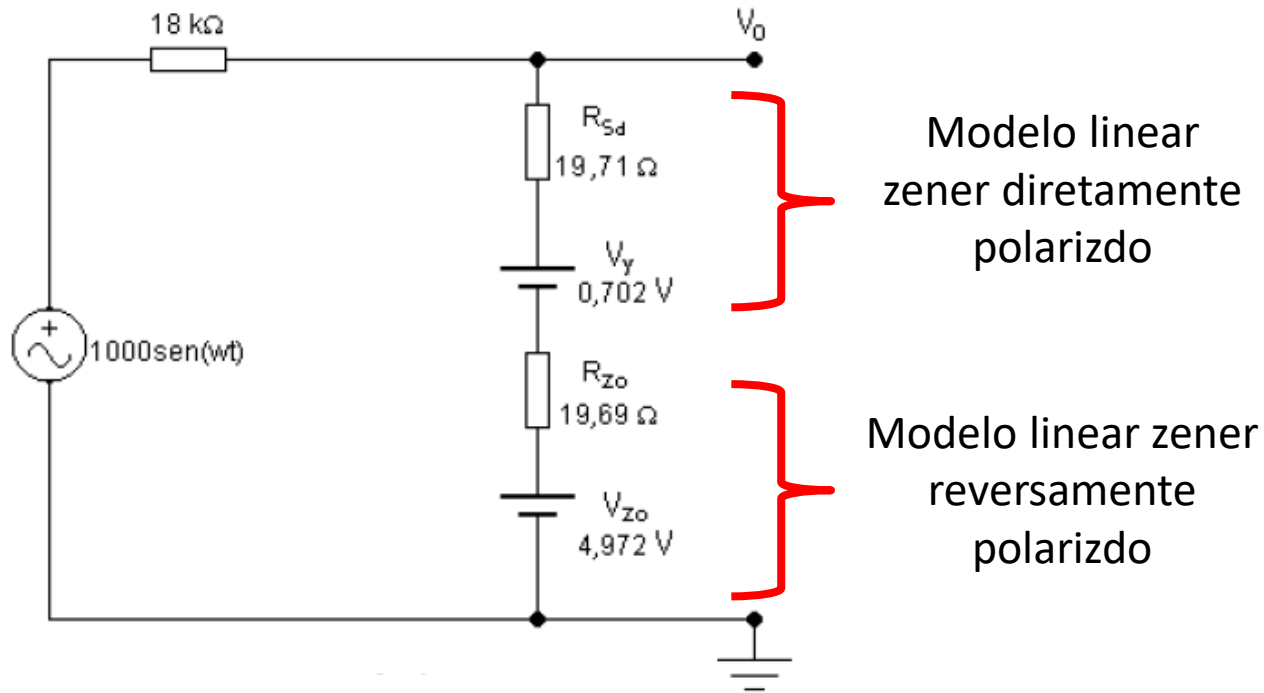
No circuito acima os diodos só entram em condução quando ambas as barreiras de potencial forem vencidas, isto é, quando $v_i(t) \geq (4,972 + 0,702) = 5,674$ V. Antes disso, isto é, para $0 \leq v_i(t) \leq 5,674$ V, os diodos estão cortados e podem ser substituídos por circuitos abertos, como na figura a *abaixo*.



Nesse intervalo, conclui-se que:

$$v_o(t) = v_i(t) \quad \text{para} \quad 0 \leq v_i(t) \leq 5,674 \text{ V}$$

4



Se $v_i(t) \geq 5,674 \text{ V}$, as barreiras são vencidas e os diodos podem ser substituídos pelos respectivos modelos linearizados, como na figura *acima*. Então, para $v_i(t) = 1000 \text{ V}$:

$$v_{o(max)} = \frac{1000 - 0,702 - 4,942}{18000 + 19,711 + 19,69} \times (19,711 + 19,69) + 0,702 + 4,972 = 7,846 \text{ V}$$

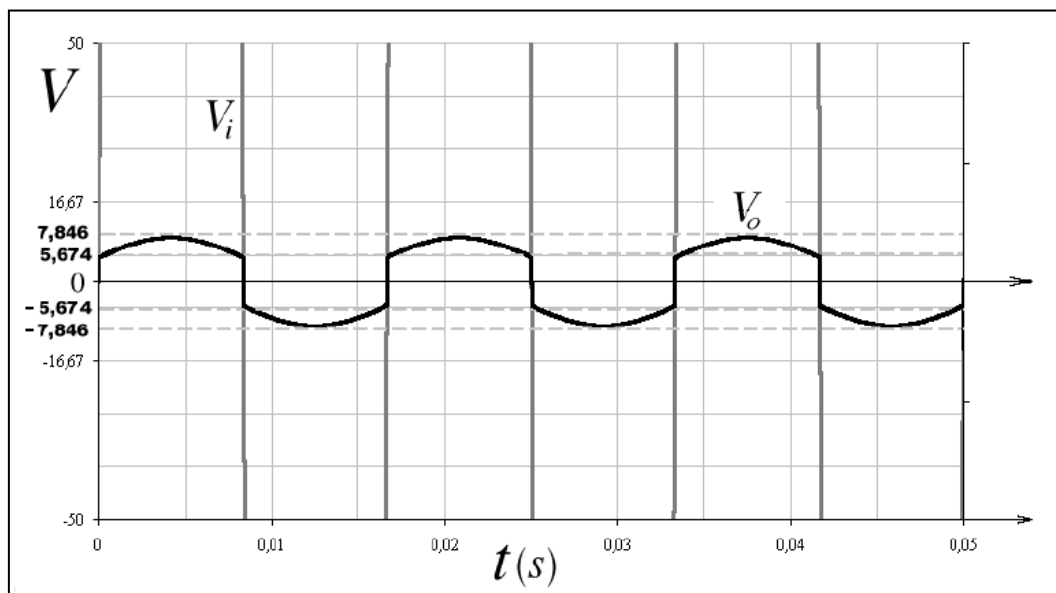
(queda de tensão em $19,711\Omega + 19,69\Omega$)

- 5 O circuito possui comportamento idêntico, em módulo, no semiciclo negativo da senóide. Então:

$$v_o(t) = v_i(t) \quad \text{para} \quad -5,674 \text{ V} \leq v_i(t) \leq 0$$

$$\longrightarrow v_{o(\min)} = -7,846 \text{ [V]}$$

- 6 A figura *abaixo* mostra o esboço de $v_o(t)$.



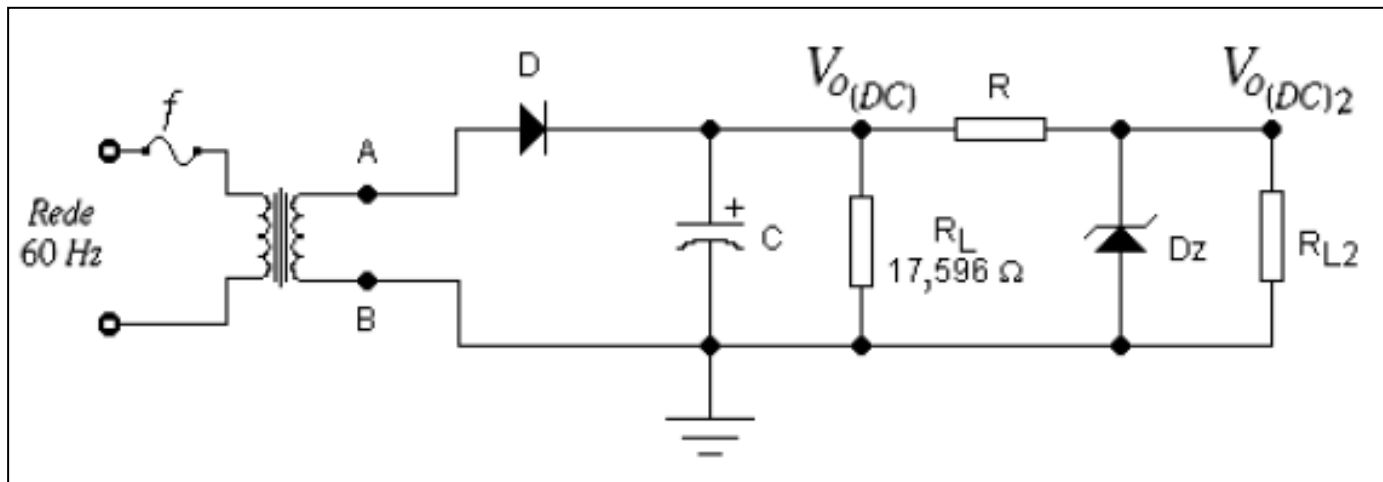
Formas de Onda na Saída do Circuito

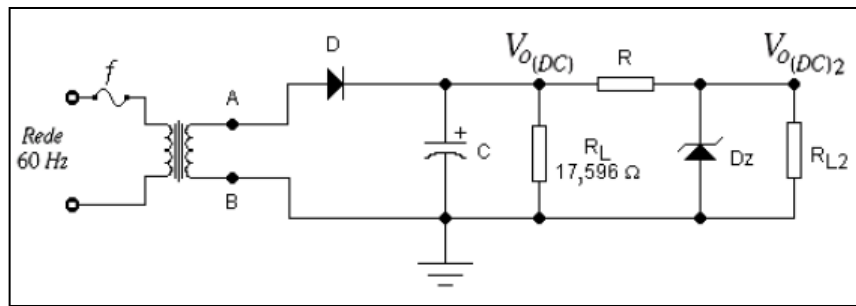
Exercício 2

(aplicação de modelos linearizados de zener)

Um circuito estabilizador de tensão, construído com o mesmo diodo zener, foi acrescentado a um circuito retificador de meia onda, como mostrado abaixo. Sabendo-se que $P_z(\max) = 0,4 \text{ W}$, calcular:

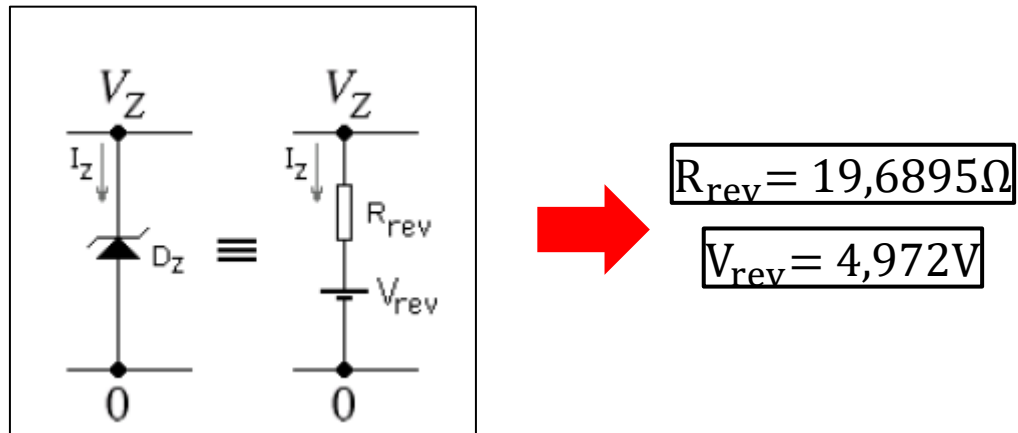
- O valor do resistor R que mantenha a integridade do Zener quando $R_L = \infty$.
- O valor mínimo de R_{L2} para que o circuito permaneça estabilizando a tensão.
- Os valores de $V_{o(DC)2(\max)}$ e $V_{o(DC)2(\min)}$.
- Essa topologia de regulação é eficiente ?





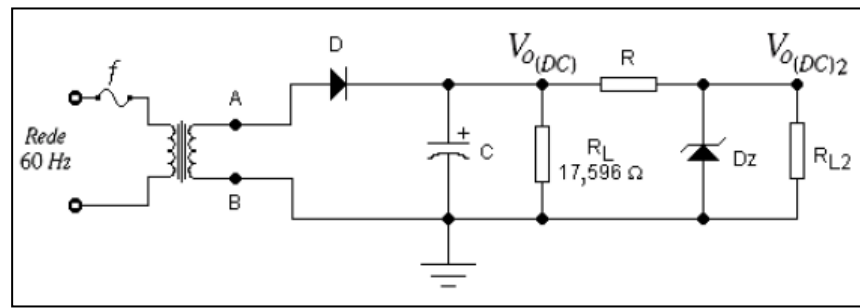
1 **O valor do resistor R que mantenha a integridade do Zener quando $R_L = \infty$**

Demonstrou-se no exercício 4 que o diodo zener tem o seguinte circuito equivalente:



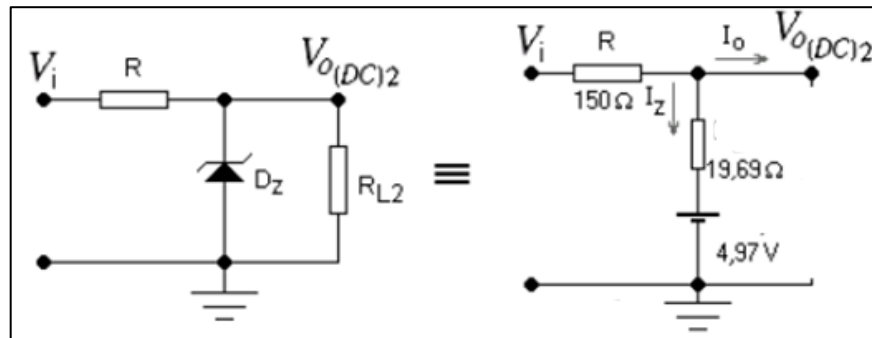
O Zener comercial de valor mais próximo é 5,1 V e, portanto, a máxima corrente nominal permitida é:

$$I_{Z(\max)} = \frac{0,4}{5,1} = 78,43 \text{ [mA]}$$



Demonstrou-se que a tensão de entrada do estabilizador está no intervalo **$11,2V \leq V_{o(DC)} \leq 16,97V$** .

Então, quando $R_{L2} = \infty$ pelo circuito equivalente da figura abaixo, tem-se:

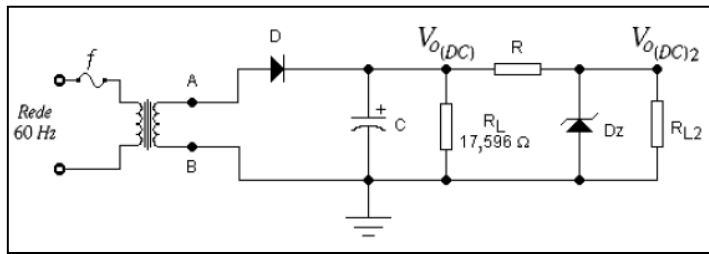


$$\frac{V_{imax} - V_{Zo}}{I_Z} = R + R_o \quad \rightarrow \quad R = \frac{V_{imax} - V_{Zo}}{I_Z} - R_o$$

(O uso de V_{imax} determina um R maior do que o uso de V_{min} , garantindo a integridade do zener)

$$R = \frac{16,97 - 4,972}{78,73 \times 10^{-3}} - 19,6895 = 133,3\Omega \quad \rightarrow \quad \boxed{R=150\Omega}$$

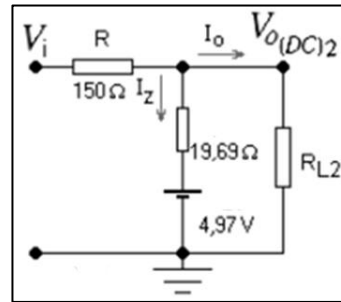
(comercial mais próximo)



2

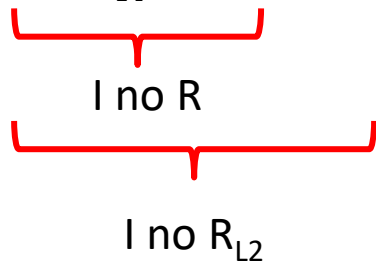
O valor mínimo de R_{L2} para que o circuito permaneça estabilizando a tensão

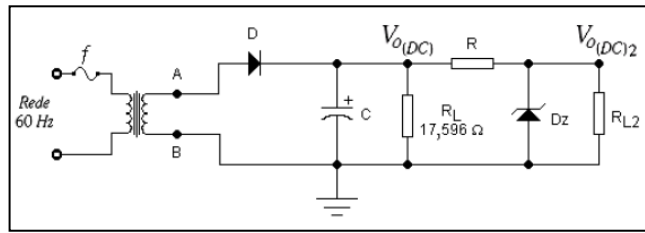
Equacionando-se o circuito anterior o valor mínimo de tensão ($V_{O(DC)min} = 11,2V$) e considerando $I_{Z(min)} = 1 mA$, tem-se:



$$V_Z = 4,97 + 19,6895I_Z \quad \rightarrow \quad V_Z = 4,97 + 19,6895 \times 10^{-3} = 4,992V$$

$$R_{L2(min)} = \frac{V_Z}{\underbrace{\frac{V_{O(DC)min} - V_Z}{R}}_{I \text{ no } R} - I_Z} = \frac{4,992}{\frac{11,2 - 4,992}{150} - 0,001} \quad \rightarrow \quad R_{L2(min)} = 123,6\Omega$$





3 Os valores de $V_{o(DC)(max)}$ e $V_{o(DC)(min)}$

$$V_{o(DC)min} = V_{z(1mA)} \rightarrow V_{o(DC)min} = 4,992V$$

$$V_{o(DC)max} = 4,97 + \frac{16,97 - 4,97}{150 + 19,6895} \times 19,6895$$

$$V_{o(DC)max} = \underbrace{4,97}_{(R_L = \infty)} + \underbrace{\frac{16,97 - 4,97}{150 + 19,6895} \times 19,6895}_{I \text{ no zener}} \rightarrow V_{o(DC)max} = 6,364V$$

4 Essa topologia de regulação é eficiente ?

Conclusão

$V_{o(DC)2min}$ é muito diferente de $V_{o(DC)2max}$.
Essa topologia de regulação de tensão não é eficiente !

Exercício 3

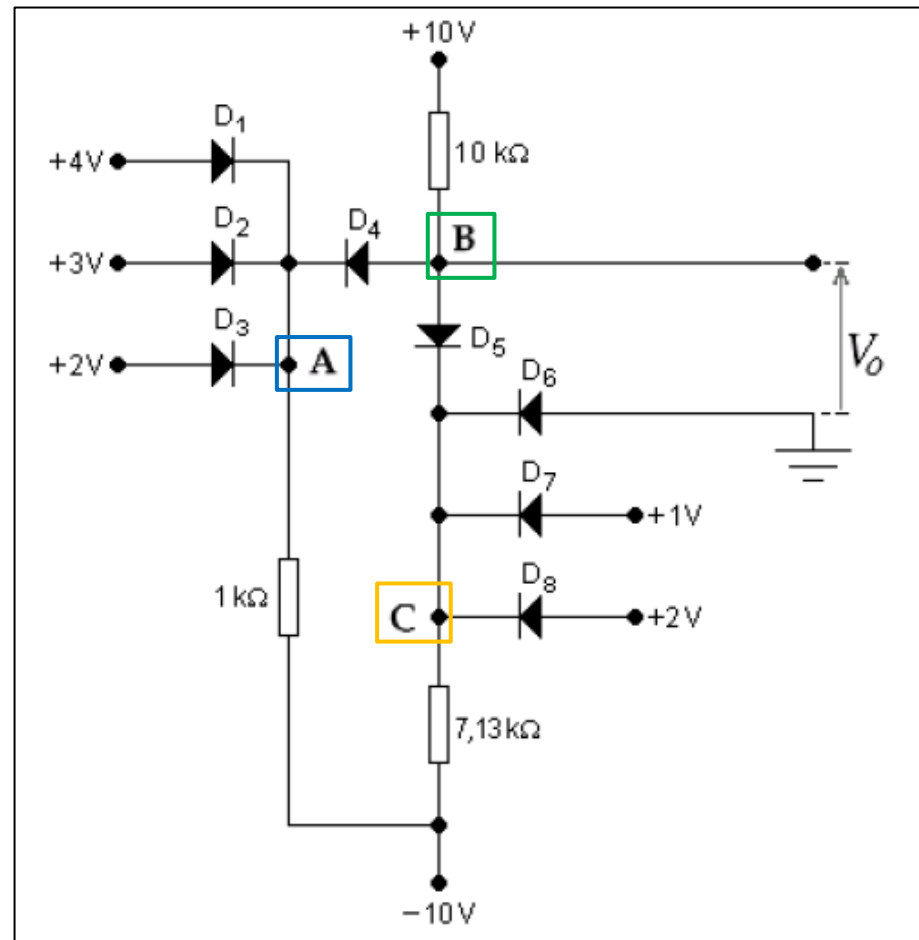
No circuito abaixo determinar:

a) Quais diodos estão conduzindo e quais diodos estão cortados.

b) Calcular a tensão V_o .

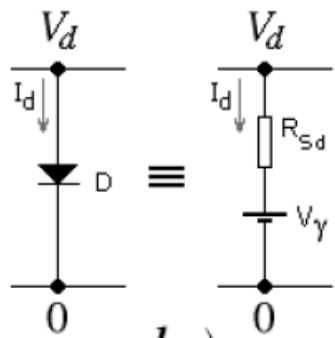
Dados: Os diodos são idênticos e possuem as seguintes características elétricas:

$V_D = 0,593V @ I_D = 800 \text{ mA}$ e $V_D = 0,697 V @ I_D = 10 \text{ mA}$.



a) Quais diodos estão conduzindo e quais diodos estão cortados.

1 Os modelos linearizados dos diodos são calculados da seguinte forma:

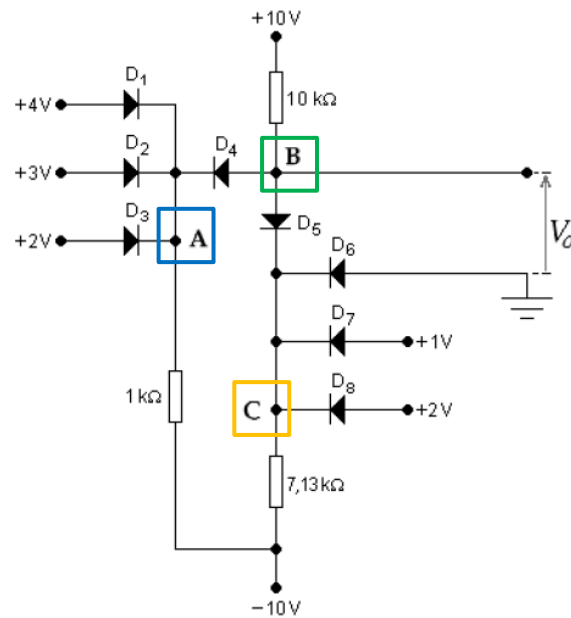


$$0,593 = V_\gamma + 800 \times 10^{-6} \times R_S$$

$$0,697 = V_\gamma + 10 \times 10^{-3} \times R_S$$

$$V_\gamma = 0,584 \text{ [V]}$$

$$R_{Sd} = 11.3 \text{ ohms}$$



2

Quando vários diodos iguais estiverem com os cátodos ligados entre si, aquele que receber a maior tensão de ânodo conduz e os demais permanecem cortados.

- D1 e D8 estão conduzindo
- D2, D3, D6 e D7 estão cortados.

Tensão no ponto B:

$$V_C = 2 - V_Y(D_8)$$

$$V_B = V_C + V_Y(D_5)$$



$$V_B = V_C + V_Y(D_5) = 2 - V_Y(D_8) + V_Y(D_5) = 2 \text{ V}$$

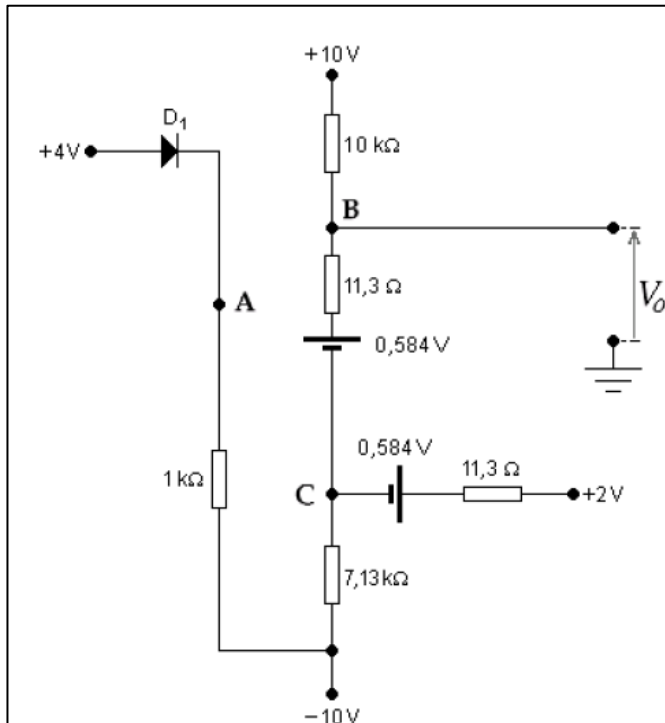
Tensão no ponto A:

$$V_A = 4 - V_Y(D_1) \approx 4 - 0,584 = 3,42 \text{ V.}$$

O diodo D4 também está, portanto, reversamente polarizado e, conseqüentemente, cortado.

b) Cálculo de V_o

A tensão V_C após a substituição de $D5$ e $D8$ pelos respectivos modelos linearizados, conforme figura abaixo.



Correntes no nó C:

$$\frac{10 - 0,584 - V_C}{10011,3} + \frac{2 - 0,584 - V_C}{11,3} = \frac{V_C + 10}{7130}$$

→ $V_C = 1,438625 \text{ [V]}$

Queda de tensão em $R=11,3\Omega$

$$V_o = 1,438625 + 0,584 + \frac{10 - 1,438625 - 0,584}{10011,3} \times 11,3 \quad \rightarrow \quad V_o = 2,032 \text{ [V]}$$