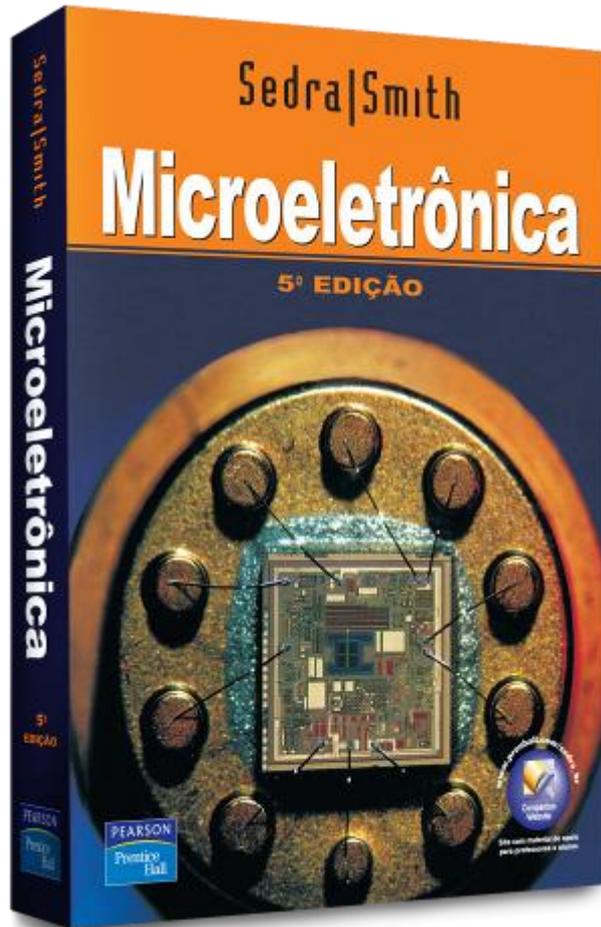
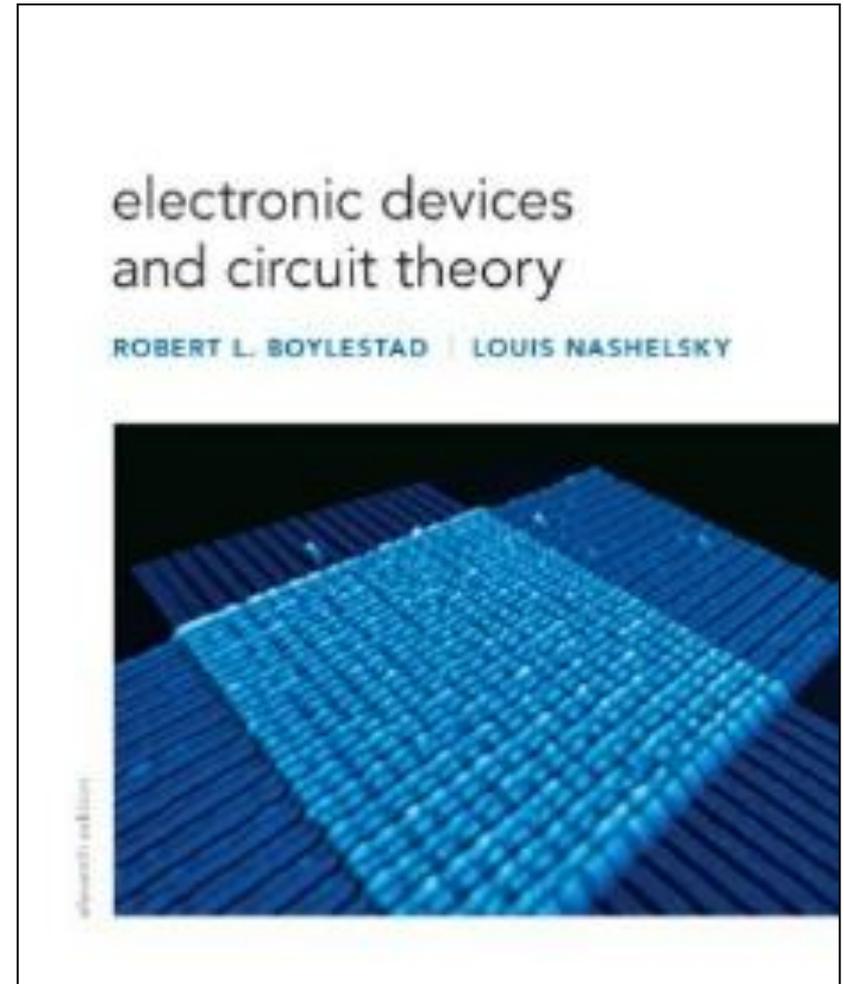


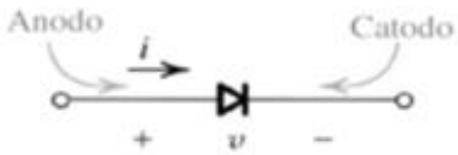
Referências Bibliográficas



Capítulo 3 Diodos



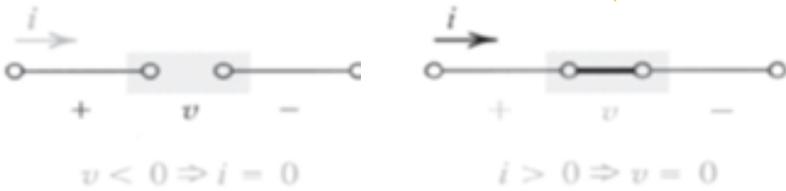
Chapter 2 Diode Applications



(a)



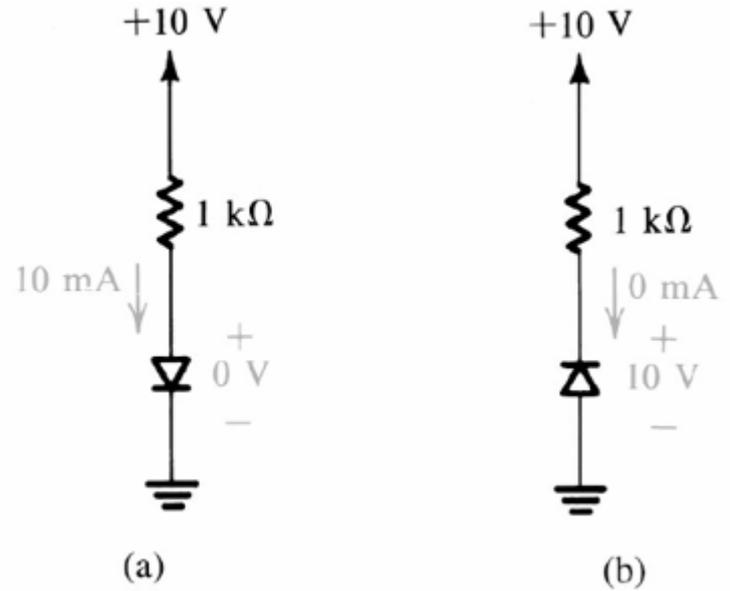
(b)



(c)

(d)

Diodo Ideal



**Diodo Ideal
(com limitador de corrente)**

Modelos Matemáticos para a Curva Característica

Modelo Exponencial

$$i = I_S(e^{v/V_T} - 1)$$

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

$$V_T = 0.0862T, \text{ mV}$$

k = Boltzmann's constant = 8.62×10^{-5} eV/K = 1.38×10^{-23} joules/kelvin

T = the absolute temperature in kelvins = 273 + temperature in °C

q = the magnitude of electronic charge = 1.60×10^{-19} coulomb

$$i = I_S e^{v/V_T}$$

$$v = V_T \ln \frac{i}{I_S}$$

$$i = I_S e^{v/V_T}$$

$$I_1 = I_S e^{V_1/V_T}$$

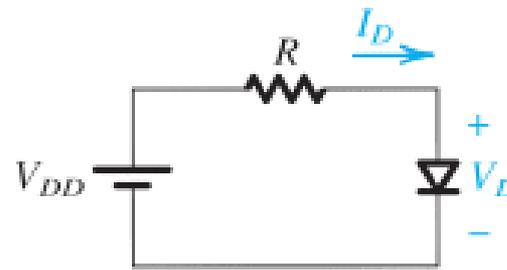
$$I_2 = I_S e^{V_2/V_T}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{(V_2 - V_1)/V_T}$$

$$V_2 - V_1 = V_T \ln \frac{I_2}{I_1}$$

$$V_2 - V_1 = 2.3 V_T \log \frac{I_2}{I_1}$$

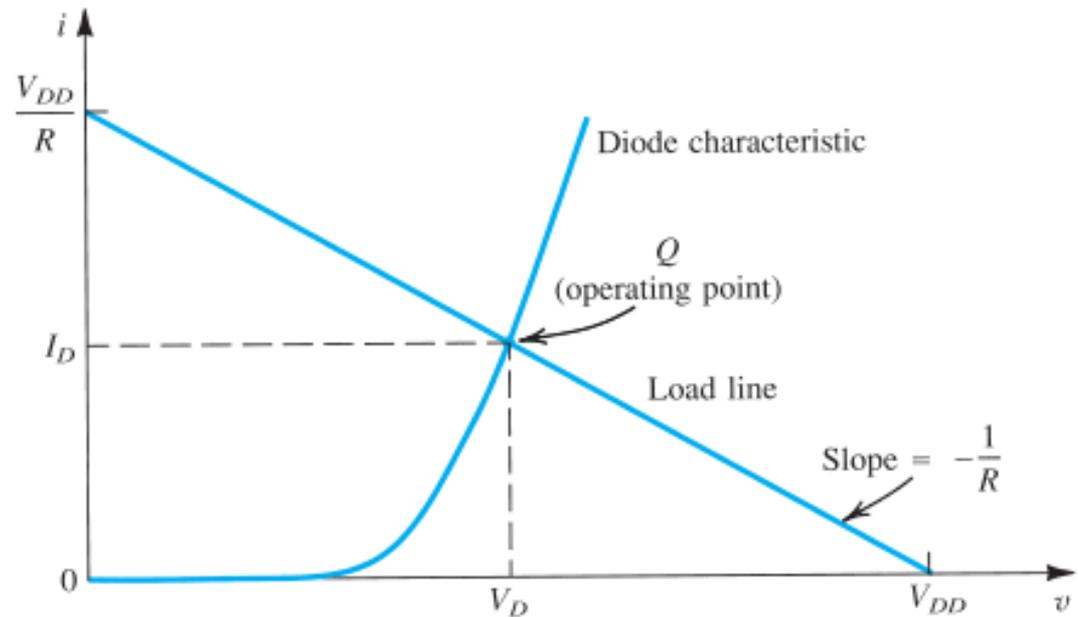
Modelo Exponencial



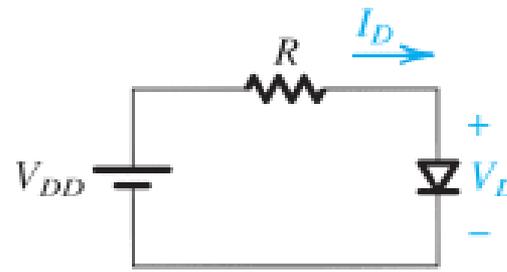
Solução Gráfica:

$$I_D = I_S e^{V_D/V_T}$$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R}$$



Modelo Exponencial



Solução Analítica Interativa

Exemplo: Determine os valores da corrente I_D e da tensão V_D para o circuito acima com $V_{DD} = 5V$ e $R = 1k\Omega$. Suponha que a corrente do diodo seja de $1mA$ para uma tensão de $0.7V$ e que a queda de tensão varia de $0.1V$ para cada década de variação na corrente.

1ª Interação: cálculo de I_D e V_D

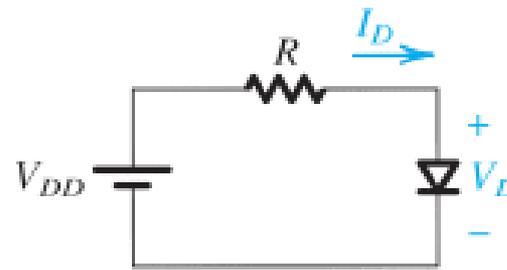
$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0.7}{1} = 4.3 \text{ mA}$$

$$V_2 - V_1 = 2.3 V_T \log \frac{I_2}{I_1}$$

$$2.3 V_T = 0.1$$

$$V_2 = V_1 + 0.1 \log \frac{I_2}{I_1}$$

Modelo Exponencial



Solução Analítica Interativa

Se $V_1 = 0,7V$, $I_1 = 1mA$ e $I_2 = 4.3mA$

$$V_D = V_1 + 0,1 \log \frac{I_2}{I_1} = 0,763V$$

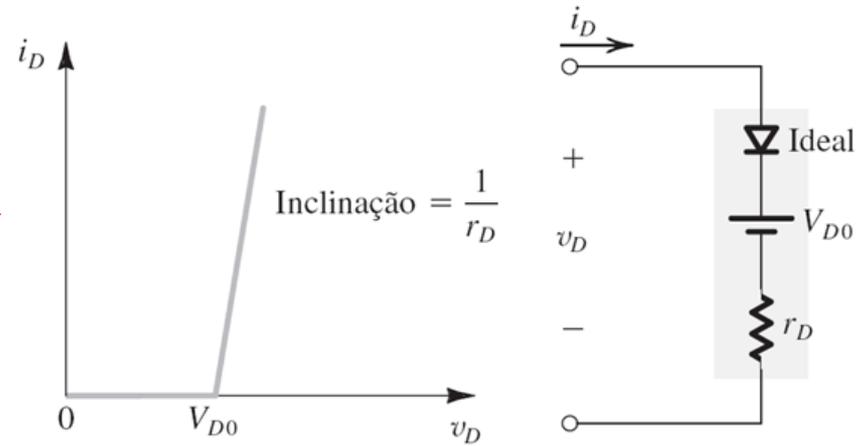
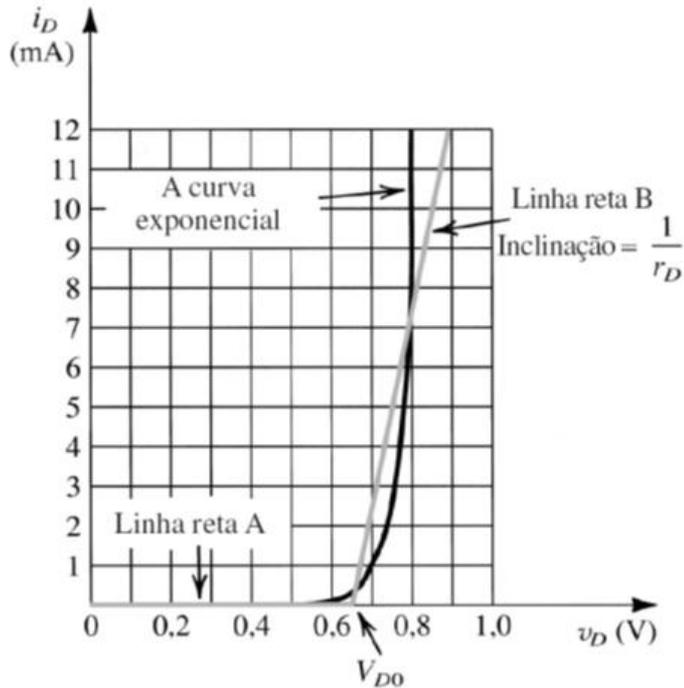
2ª Interação: cálculo de I_D e V_D

$$I_D = \frac{5 - 0,763}{1} = 4,237 \text{ mA}$$

$$V_D = 0,763 + 0,1 \log \frac{4,237}{4,3} = 0,762V$$

Os valores são próximos a 1ª interação !

Modelo de Segmentos Lineares

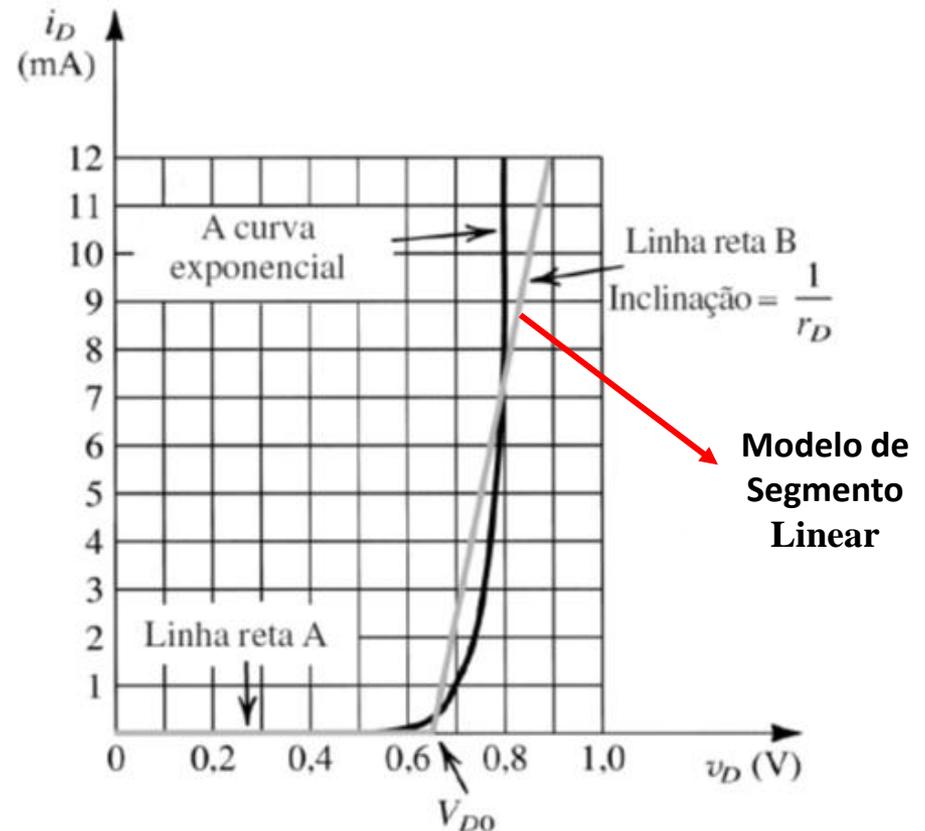
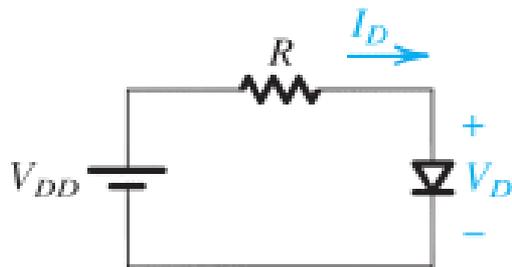


$$i_d = 0 \text{ se } v_D \leq V_{DD}$$

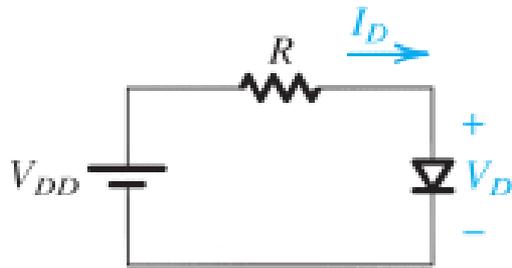
$$i_d = (v_D - V_{D0}) / r_D$$

Modelo de Segmentos Lineares

Exemplo: Repita o exemplo anterior utilizando o modelo de segmentos lineares cujos parâmetros são dados pela figura abaixo: $V_{D0}=0,65V$ e $r_D=20\Omega$. Observar que a corrente do diodo é de 1mA para uma tensão de 0.7V e que a queda de tensão varia de 0.1V para cada década de variação na corrente.

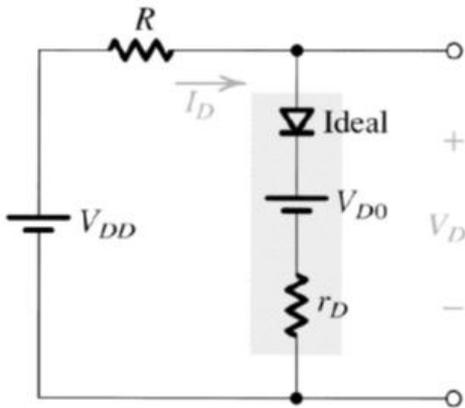


Modelo de Segmentos Lineares

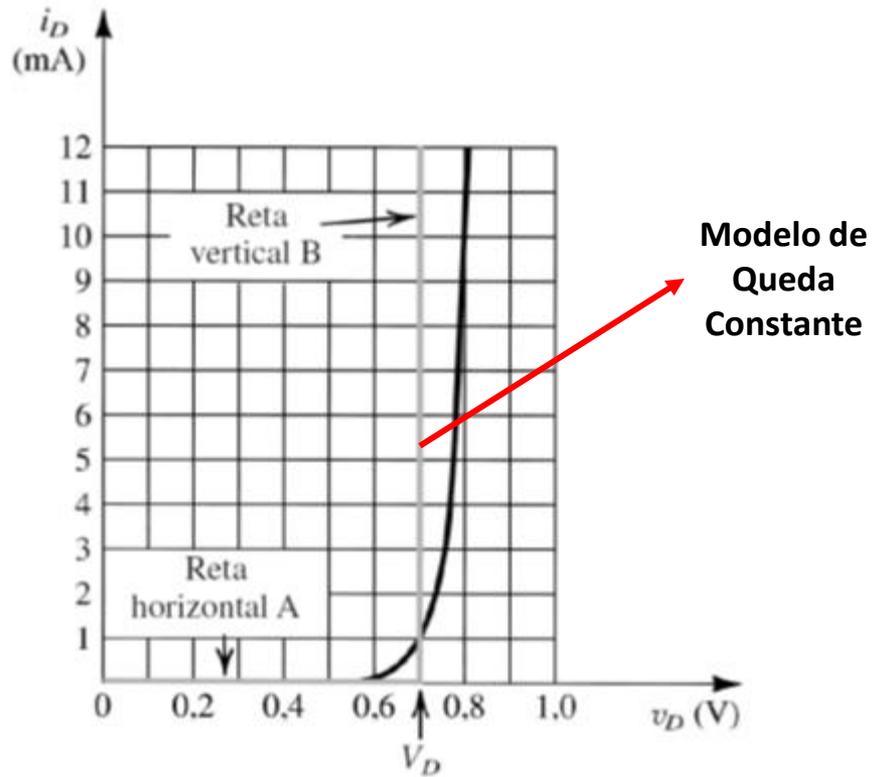
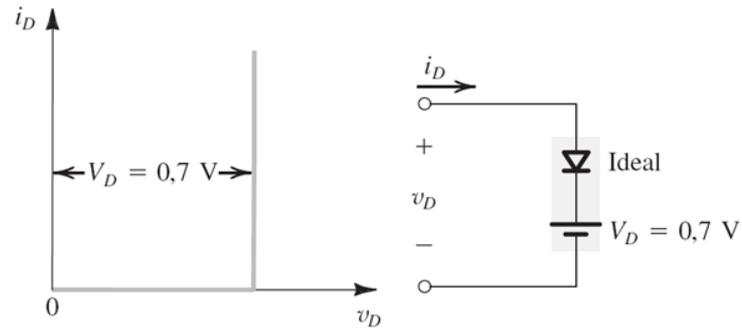


$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{D0}}{R + r_D} = \frac{5 - 0,65}{1 + 0,02} = 4,62mA$$

$$V_D = V_{D0} + I_D r_D = 0,65 + 4,26 \times 0,02 = 0,735V$$



Modelo de Queda de Tensão Constante



Modelo de Queda de Tensão Constante

Exemplo: Repita o exemplo anterior utilizando o modelo de tensão constante.

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{DO}}{R} = \frac{5 - 0,7}{1} = 4,3mA$$

$$V_D = 0,7V$$

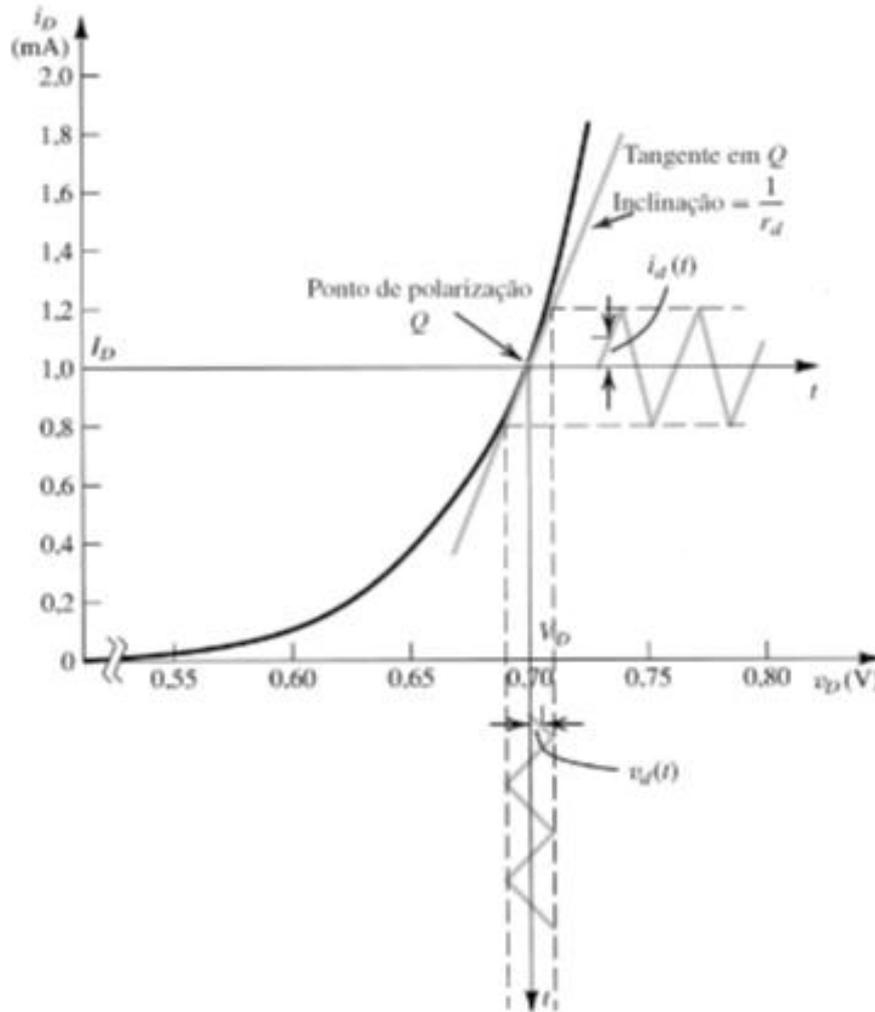
Modelo de Diodo Ideal

$$V_D = 0$$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{DO}}{R} = \frac{5 - 0}{1} = 5mA$$

Modelo para Pequenos Sinais para Diodos

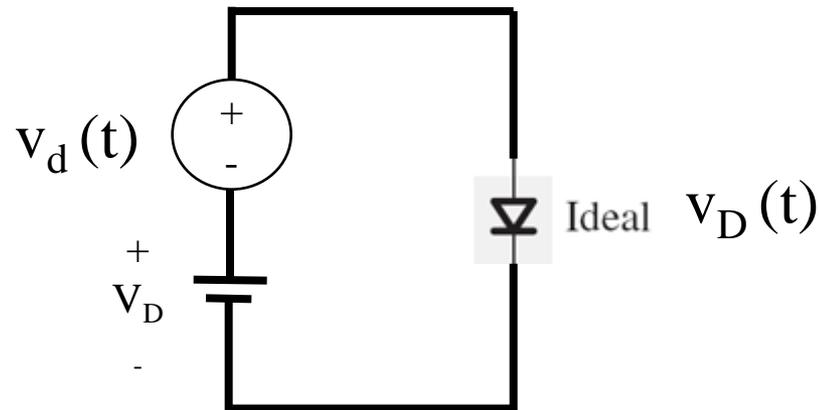
Há aplicações em que o diodo é polarizado para operar sobre a característica direta i_D e um pequeno sinal, como mostrado na figura, é sobreposto aos valores cc.



**Aproximação por
pequeno sinal !**

Deve-se primeiramente determinar o ponto de operação do diodo (V_D e I_D) empregando algum dos modelos de diodos, como o mostrado abaixo.

Modelo de diodo escolhido



No modelo acima uma **tensão CC**, V_D , representada por uma bateria, é aplicada ao diodo. Um **sinal variável no tempo** $v_d(t)$, como uma forma de onda triangular, é sobreposto à tensão CC. Na ausência do sinal $v_d(t)$ a tensão no diodo é igual à V_D e ele conduzirá uma corrente CC, I_D , dada por:

$$I_D = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} \quad [1]$$

Quando o sinal $v_d(t)$ for aplicado a tensão total instantânea, $V_D(t)$ será dada por:

$$V_D(t) = V_D + v_d(t) \quad [2]$$

A corrente total instantânea será:

$$i_D(t) = I_S e^{\frac{v_D(t)}{nV_T}} \quad \longrightarrow \quad i_D(t) = I_S e^{(V_D + v_d)/nV_T}$$
$$\longrightarrow \quad i_D(t) = I_S e^{V_D/nV_T} e^{v_d/nV_T} \quad \longrightarrow \quad i_D(t) = I_D e^{v_d/nV_T} \quad [3]$$


Se a amplitude do sinal $v_d(t)$ for mantida suficientemente pequena tal que

$$v_d/nV_T \ll 1$$

então, a equação [3], expressa por série, pode ser truncada após os dois primeiros termos para se obter uma expressão aproximada:

$$\longrightarrow \quad i_D(t) \approx I_D \left(1 + \frac{v_d}{nV_T} \right) \quad [4]$$

$$V_T \approx 25\text{mv}$$

**EQUAÇÕES PARA
PEQUENOS SINAIS !**

■ $i_D(t) \approx I_D \left(1 + \frac{v_d}{nV_T}\right)$ [4]

- Se $n=2$, a equação para pequenos sinais é válida para sinais cujas amplitudes são menores que 10 mV.
- Se $n=1$, a equação para pequenos sinais é válida para sinais cujas amplitudes são menores que 5 mV.

■ A equação [4] pode ser reescrita:

$$i_D(t) = I_D + \frac{I_D}{nV_T} v_d$$

■ Portanto, superposta à corrente CC, I_D , tem-se um componente de sinal da corrente diretamente proporcional ao sinal de tensão v_d , isto é:

$$i_D = I_D + i_d(t)$$

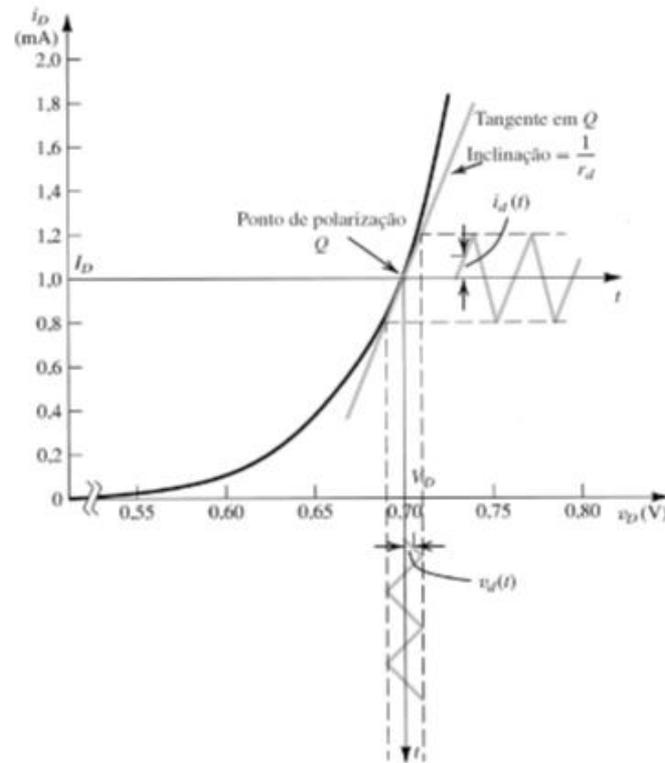
sendo $i_d(t) = \frac{I_D}{nV_T} v_d(t)$ \longrightarrow $r_d = \frac{nV_T}{I_D}$

**Resistência do diodo para
pequenos sinais ou
resistência incremental**

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D}$$

Observa-se que o valor de r_d é inversamente proporcional à corrente de polarização I_D .

A aproximação por pequeno sinal é equivalente a supor que a amplitude do sinal seja suficientemente pequena de modo que a excursão ao longo da curva i-v é limitada a um pequeno segmento, quase linear.



■ A inclinação desse segmento, que é igual a inclinação da tangente da curva i - v no ponto Q , é igual à condutância para pequenos sinais.

Em $i = I_D$ a inclinação da i - v é $I_D / nV_D = 1/r_d$, isto é,

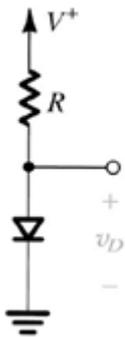
$$r_d = \frac{1}{\left[\frac{\partial i_D}{\partial v_D} \right]}$$

CONCLUSÃO

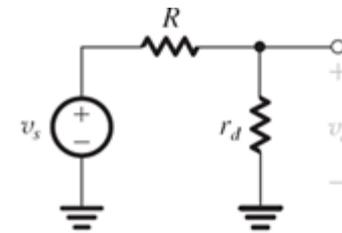
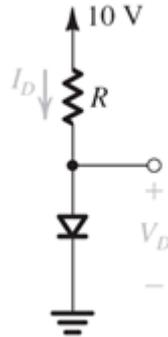
- Superpostos aos valores das grandezas V_D e I_D que definem o ponto de polarização, tem-se as grandezas $v_d(t)$ e $i_d(t)$ que estão relacionadas com a resistência para pequenos sinais (r_d) determinada pelo ponto Q.
- Depois da realização da análise CC, o circuito para pequenos sinais é obtido eliminando-se todas as fontes CC (isto é, curto-circuitando as fontes de tensão CC e abrindo as fontes de corrente CC) e substituindo-se o diodo por sua resistência equivalente para pequenos sinais.
- Assim, a análise para pequenos sinais pode ser realizada separadamente da análise de polarização CC, uma grande conveniência que resulta da linearização inerente à aproximação para pequenos sinais da curva característica do diodo.

Exemplo 1:

No circuito (a) abaixo $R=10\text{k}\Omega$. A fonte de alimentação V^+ tem um valor CC de 10V o qual tem superposta uma senóide de 60Hz com amplitude de 1V de pico. Essa componente do sinal da fonte de alimentação é devido a uma imperfeição no projeto da fonte de alimentação (**ripple**). Calcular os valores da tensão CC e do sinal senoidal sobre o diodo. Supor que o diodo tem 0.7V de queda e 1mA de corrente e $n=2$.



circuito para calcular o ponto de operação CC



circuito equivalente para pequenos sinais.

■ Cálculo de I_D

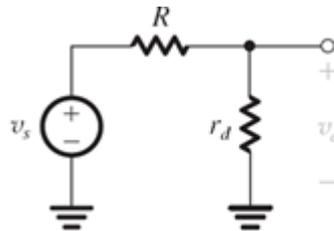
$$I_D = (10 - 0.7)/10 = 0.93 \text{ mA}$$

Como esse valor é muito próximo de 1mA, a tensão no diodo será muito próxima de 0,7V, o valor adotado.

 Cálculo de v_d

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D} = \frac{2 \times 25}{0,93} = 53,8 \Omega$$

A tensão de pico do sinal sobre o diodo pode ser obtido do circuito equivalente para pequenos sinais (c). Nessa figura, v_s é a componente senoidal de V^+ (1V de pico, 60Hz) e v_d é o sinal correspondente sobre o diodo.



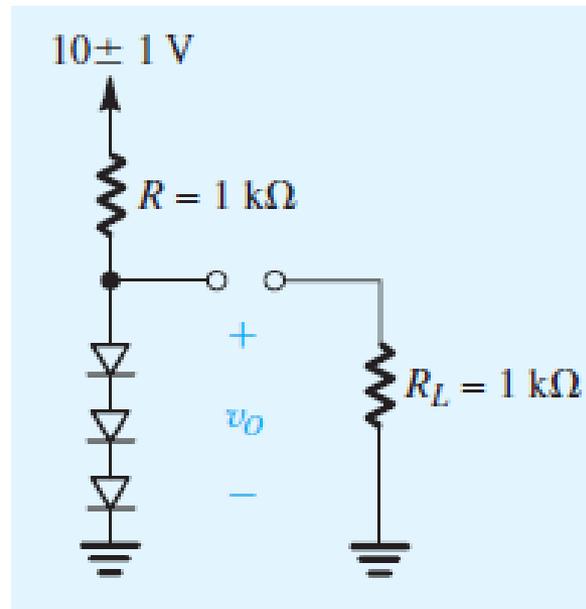
$$v_d(\text{pico}) = v_s \frac{r_d}{R+r_d} = 1 \frac{0,0538}{10+0,00538} = 5,35 \text{mV}$$

Esse valor é relativamente pequeno, como previsto pelo modelo de pequenos sinais.

Exemplo 2: Uso da queda de tensão direta no diodo para regulação de tensão

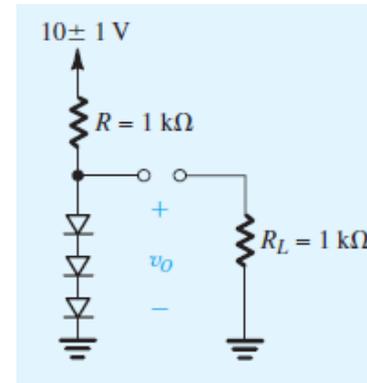
Um diodo diretamente polarizado pode servir como um regulador de tensão simples. No exemplo anterior observa-se que enquanto a tensão da fonte de alimentação de 10V tem uma ondulação correspondente ($\approx 10\%$ de variação), a ondulação correspondente na tensão do diodo foi de $\approx 5.4\text{mV}$ (ou $\approx 0.8\%$ de variação). Tensões reguladas acima de 0,7V podem ser obtidas pela conexão de diodos em série.

No circuito abaixo uma série de diodos é usada para proporcionar uma tensão constante de 2.1V. Calcule, usando o modelo de pequenos sinais, a porcentagem de variação pico a pico nesse regulador de tensão se ocorrer uma variação de $\approx 10\%$ na tensão da fonte de alimentação.



■ Cálculo de I_D

$$I = \frac{10 - 2.1}{1} = 7.9 \text{ mA}$$



■ Cálculo de r_d

$$r_d = \frac{V_T}{I} \longrightarrow r_d = \frac{25}{7.9} = 3.2 \Omega$$

Os três diodos em série apresentam uma resistência total $r=9.6\Omega$. Essa resistência com junto com a resistência R forma um divisor de tensão que pode ser utilizado para calcular a variação na tensão de saída (Δv_o) devido a variação de $\pm 1V$ da fonte de alimentação:

$$\Delta v_o = 2 \frac{r}{r+R} = 2 \frac{0.0096}{0.0096 + 1} = 19 \text{ mV peak-to-peak}$$

2V (pico a pico)



Isto é, para $\pm 1V$ ($\pm 10\%$) de variação na tensão da fonte de alimentação haverá uma alimentação de $\pm 9,5mV$ de pico ou $0,5\%$. Isto implica em uma variação de $\pm 9,5mV/3 = \pm 3.2mV$ por diodo, o que justifica o uso do modelo de pequenos sinais.

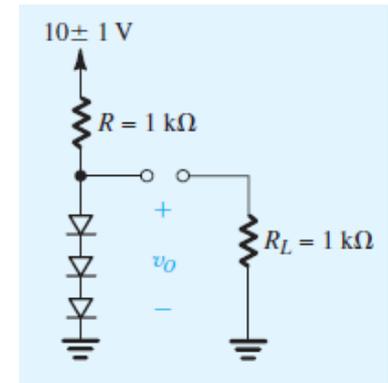
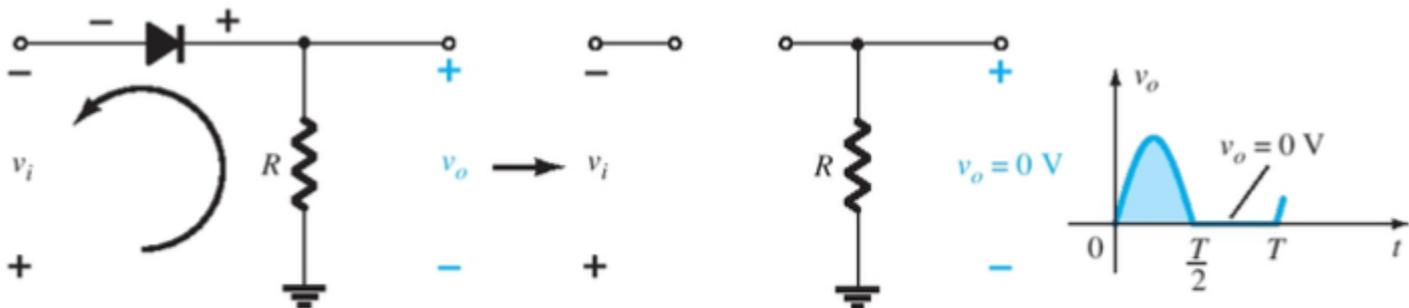
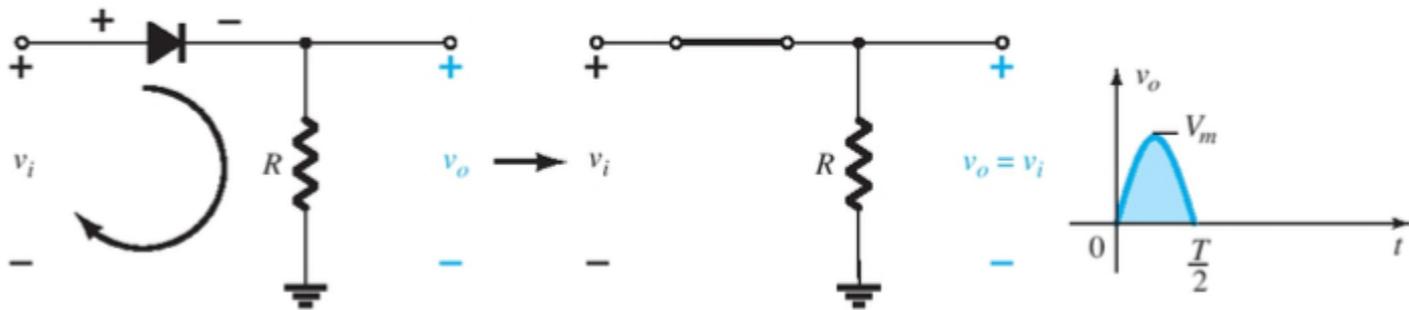
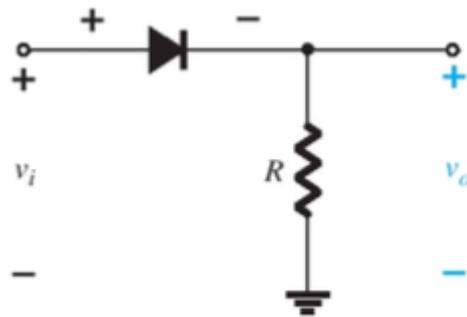
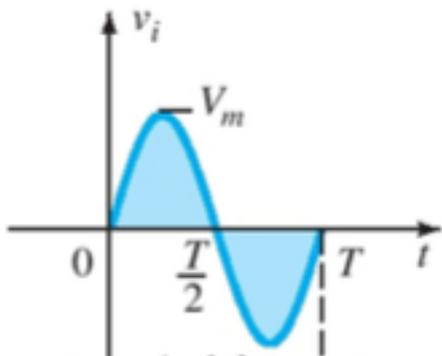


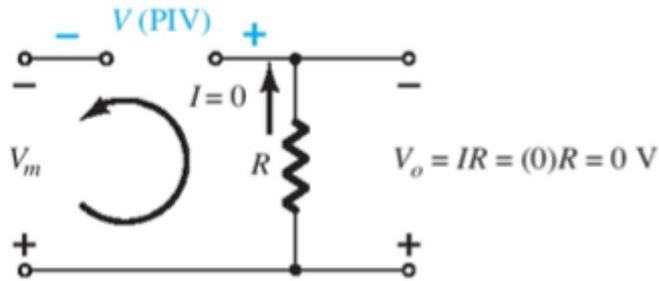
Tabela 3.1 Modelos para o diodo na região de polarização direta

Modelo	Gráfico	Equações	Circuito	Comentários
Exponencial		$i_D = I_S e^{v_D/nV_T}$ $v_D = 2,3nV_T \log\left(\frac{i_D}{I_S}\right)$ $v_{D2} - V_{D1} = 2,3nV_T \log\left(\frac{i_{D2}}{i_{D1}}\right)$ $2,3nV_T = 60 \text{ mV para } n = 1$ $2,3nV_T = 120 \text{ mV para } n = 2$		$I_S = 10^{-12}$ a 10^{-15} A, dependendo da área da junção. $V_T \cong 25$ mV e $n = 1$ a 2 . Baseado em princípios físicos e extremamente precisos. Útil, quando análises muito precisas são necessárias.
Segmento de reta (bateria mais resistência)		Para $v_D \geq V_{D0}$: $i_D = 0$ Para $v_D < V_{D0}$: $i_D = \frac{1}{r_D} (v_D - V_{D0})$		A escolha de V_{D0} e r_D é determinada pela faixa de correntes para a qual o modelo está sendo empregado. Em função do trabalho necessário, não é tão útil quanto o modelo de tensão constante. Utilizado raramente.
Queda de tensão constante (ou modelo de 0,7 V)		Para $i_D > 0$: $v_D = 0,7 \text{ V}$		Fácil de usar e muito popular para análises manuais rápidas, o que é essencial em projetos de circuitos.
Diodo ideal		Para $i_D > 0$: $v_D = 0$		Bom para determinar quais diodos estão conduzindo e quais não estão em circuitos com vários diodos. Bom para obter valores aproximados de correntes em diodos, especialmente quando as tensões do circuito são muito maiores que V_D .
Pequenos sinais		Para pequenos sinais superpostos a V_D e I_D : $i_d = v_d/r_d$ $r_d = nV_T/I_D$ (Para $n = 1$, v_d é limitado a 5 mV; para $n = 2$, 10 mV)		Útil para determinar a componente de sinal na tensão do diodo (por exemplo, em reguladores de tensão). Serve como base para a modelagem para pequenos sinais de transistores (capítulos 4 e 5).

Circuitos Retificadores

Retificador de Meia Onda

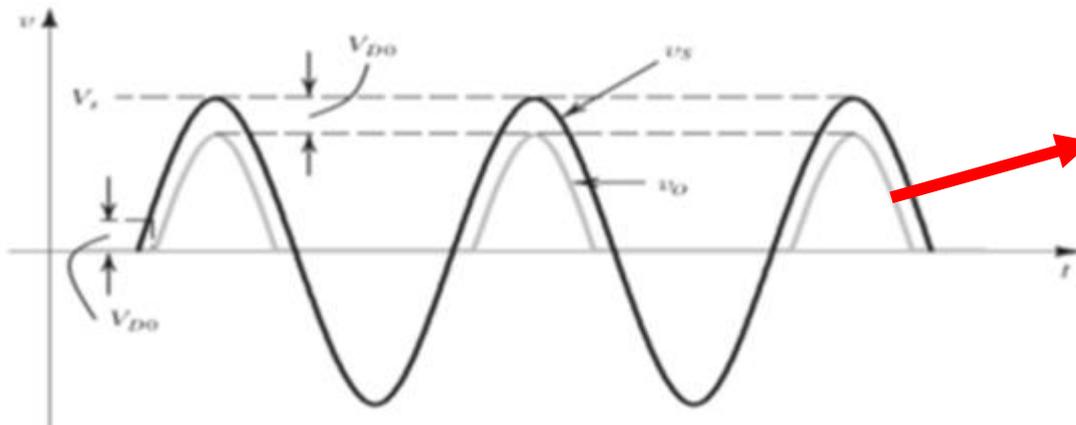




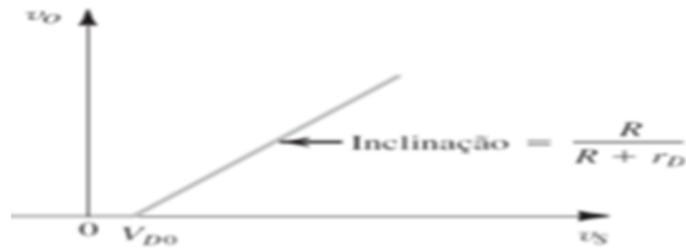
PIV = PRV > V_m

- PIV** = Peak inverse voltage
- PRV** = Peak reverse voltage
- V_m** = Peak AC voltage

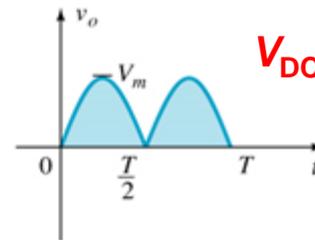
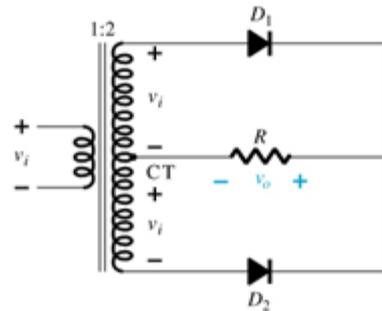
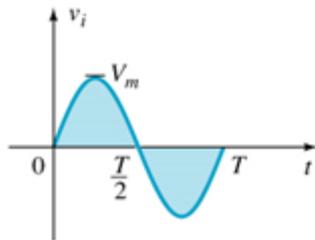
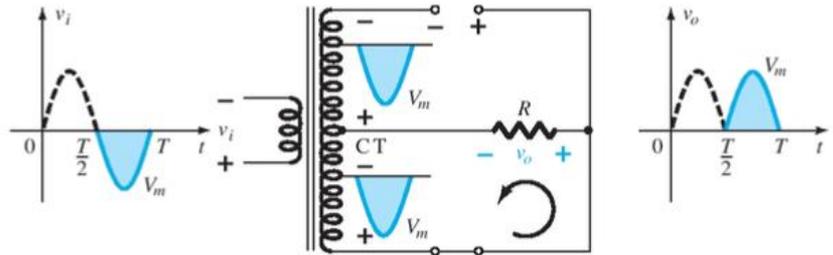
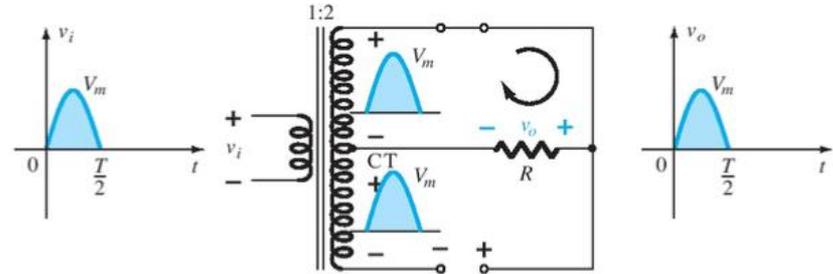
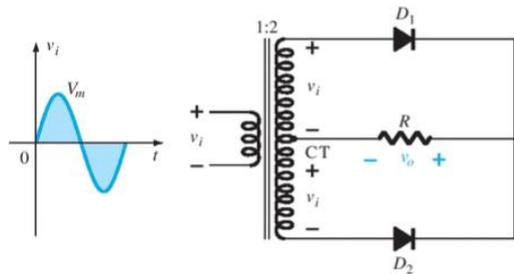
The reverse breakdown voltage rating of the diode must be high enough to withstand the peak (V_m) reverse-biasing AC voltage



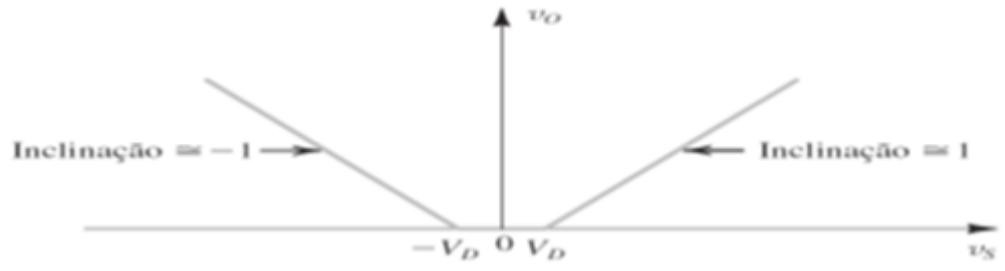
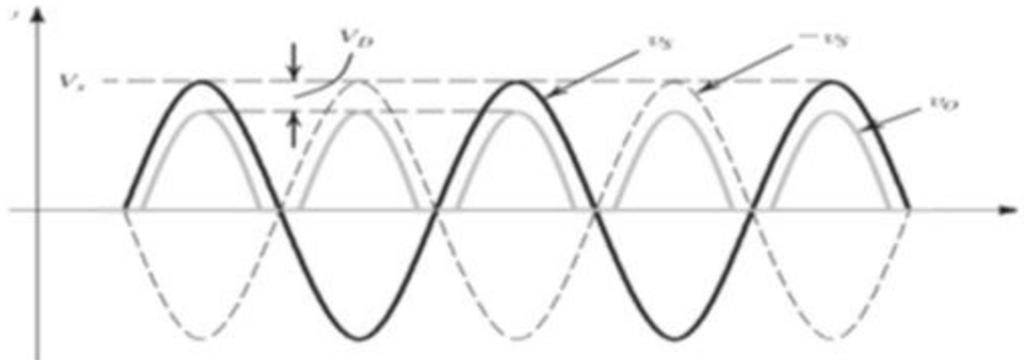
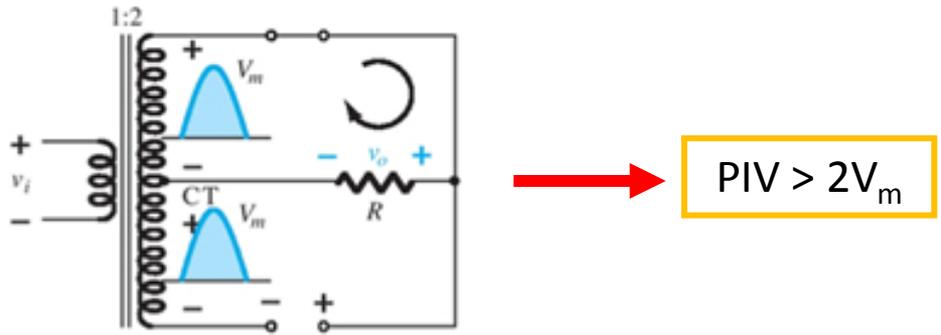
Half-wave: $V_{dc} = 0.318V_m$



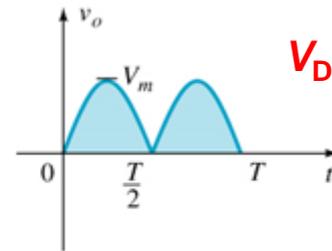
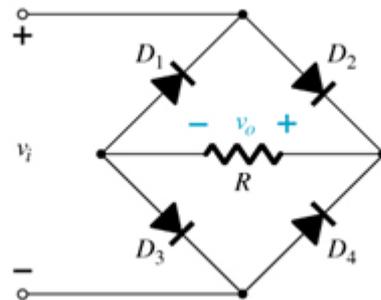
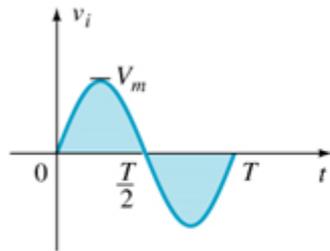
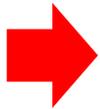
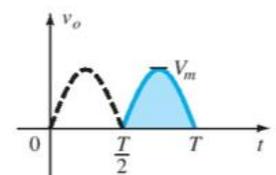
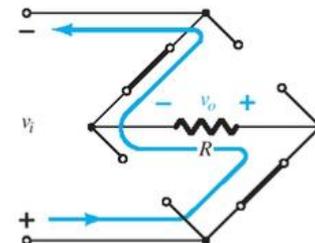
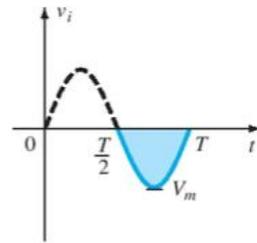
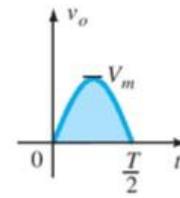
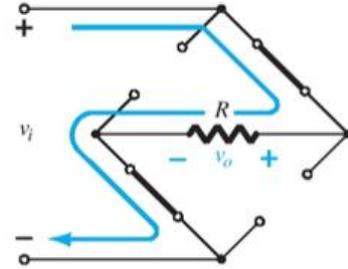
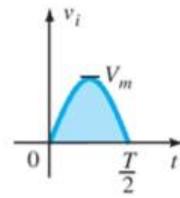
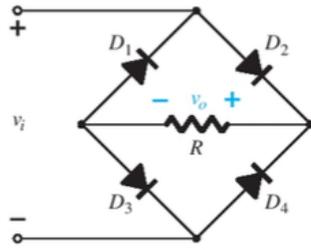
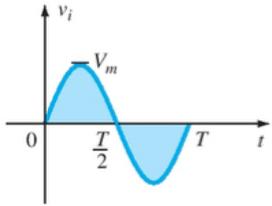
Retificador de Onda Completa Com Center-Tap



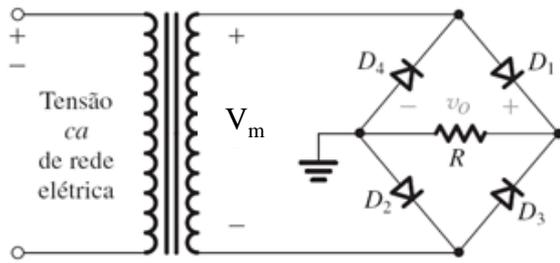
$$V_{DC} = 0.636 V_m$$



Retificador de Onda Completa com Ponte de Diodos



$V_{DC} = 0.636 V_m$

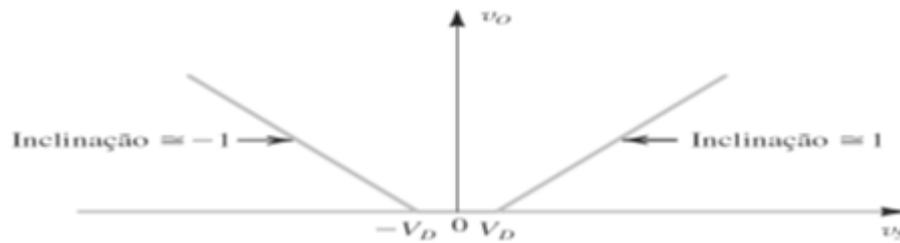
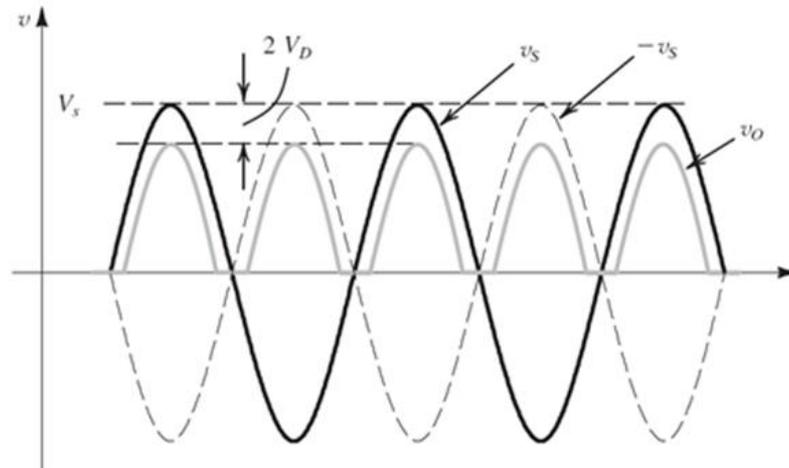


$$PIV = v_{D3 \text{ (reverso)}} = v_o + v_{D2 \text{ (direto)}} = (V_m - 2V_D) + V_D$$



$$PIV > V_m \text{ (se } V_D = 0 \text{)}$$

(a)



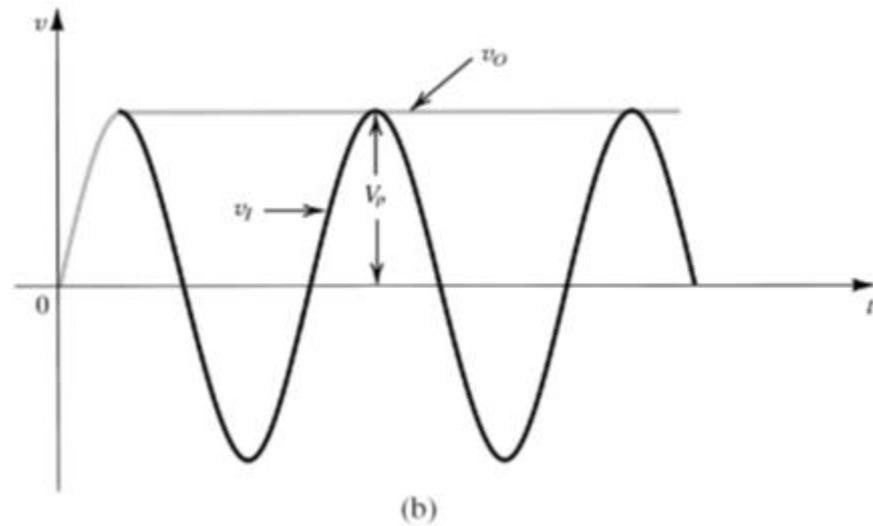
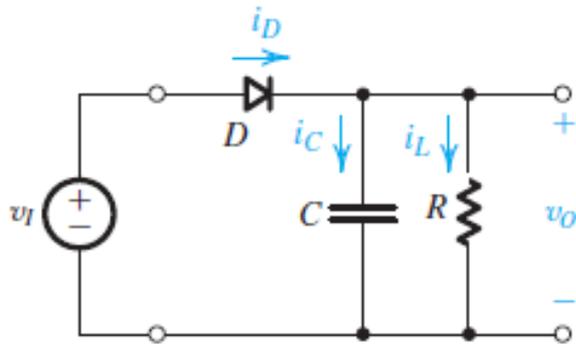
Summary of Rectifier Circuits

In the center tapped transformer rectifier circuit, the peak AC voltage is the transformer secondary voltage to the tap.

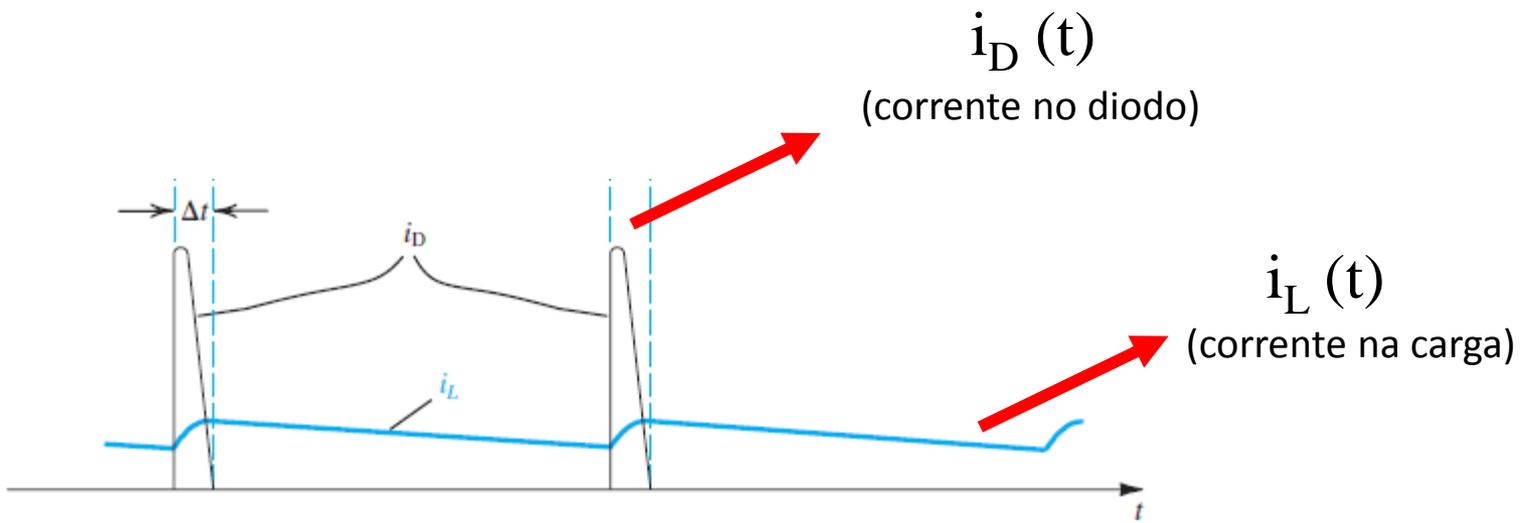
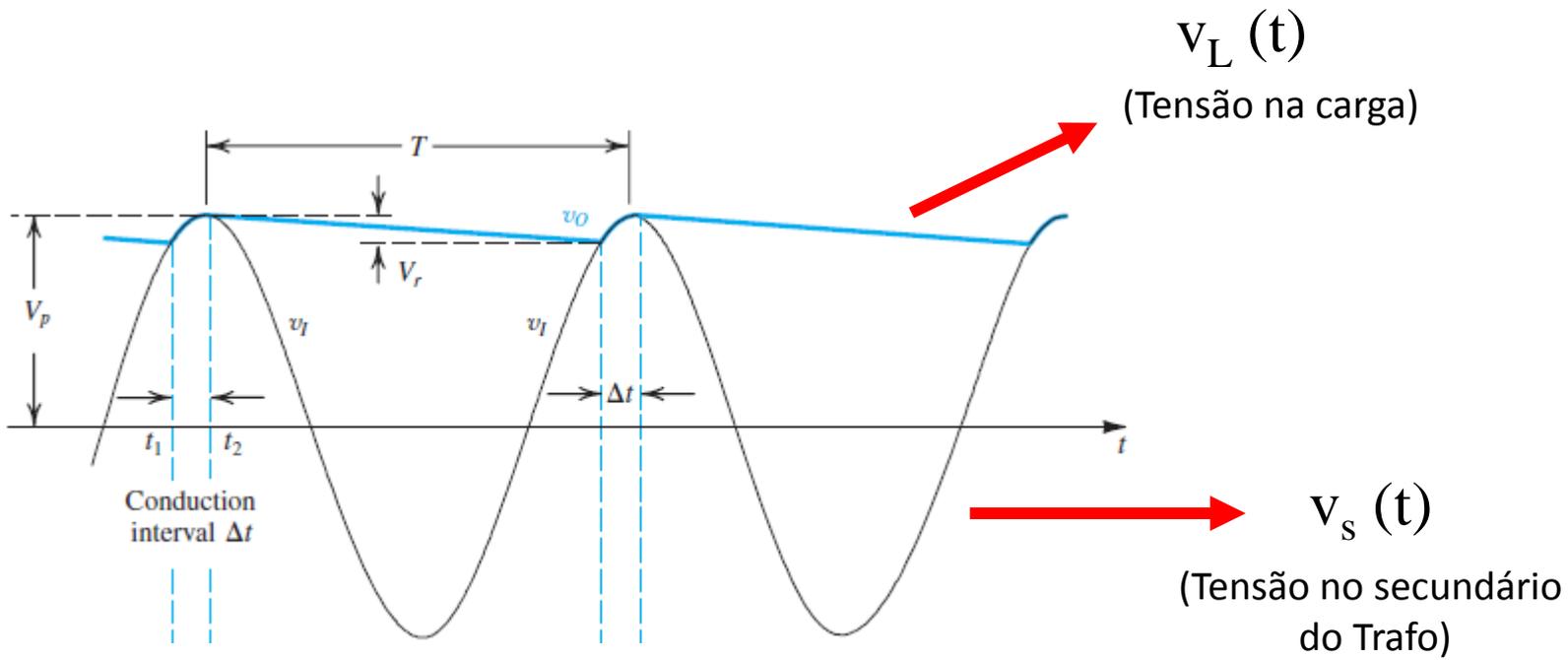
Rectifier	Ideal V_{DC}	Realistic V_{DC}
Half Wave Rectifier	$V_{DC} = 0.318 V_m$	$V_{DC} = 0.318 V_m - 0.7$
Bridge Rectifier	$V_{DC} = 0.636 V_m$	$V_{DC} = 0.636 V_m - 2(0.7 \text{ V})$
Center-Tapped Transformer Rectifier	$V_{DC} = 0.636 V_m$	$V_{DC} = 0.636 V_m - 0.7 \text{ V}$

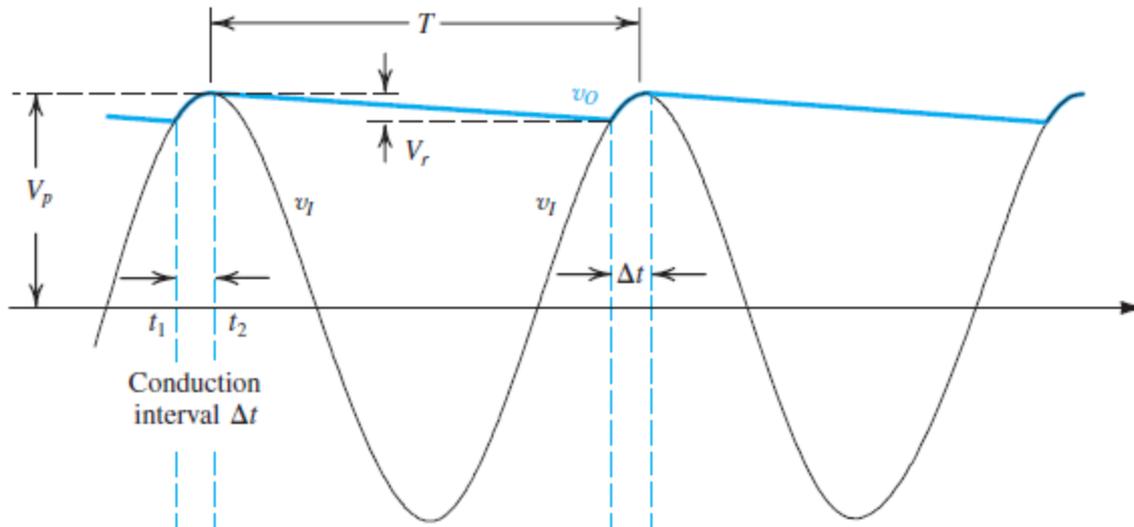
V_m = the peak AC voltage

Retificador de Meia Onda com Capacitor de Filtro



- Para uma entrada senoidal o capacitor carrega até o valor de pico (V_p).
- No ciclo negativo o diodo corta e o capacitor descarrega através de R . A descarga do capacitor continuará por quase todo o ciclo até o instante em que a **tensão de entrada (v_I)**. Em seguida o diodo conduz novamente, carrega o capacitor até o valor de pico de v_I e o processo se repete.



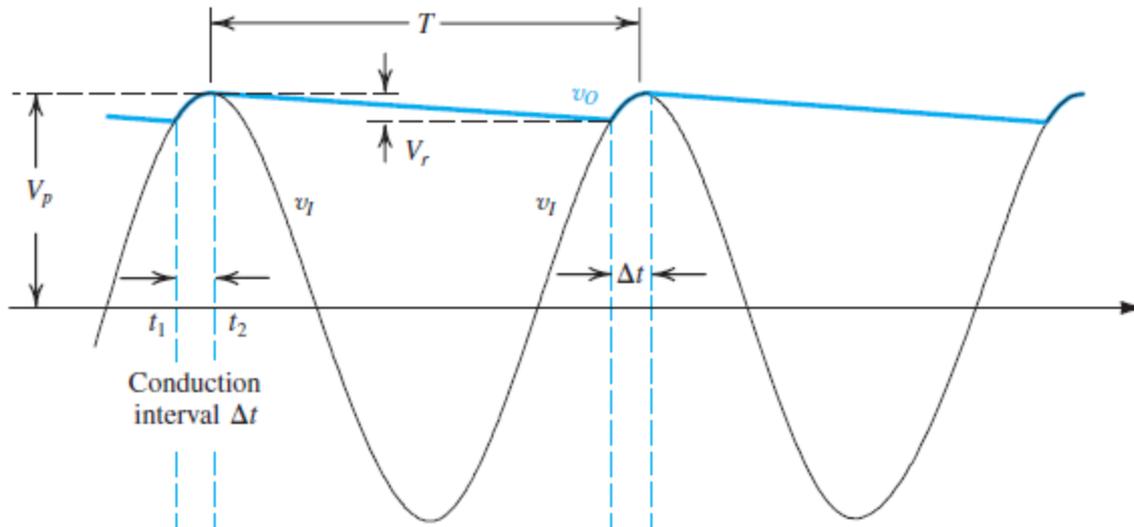


Para manter a tensão de saída, sem que esta diminua significativamente durante a descarga do capacitor, escolhe-se o valor de C de modo que a constante de tempo ($\tau = RC$) seja muito maior que o intervalo de tempo de descarga.

A figura mostra o regime permanente das formas de onda de entrada e de saída pela suposição que $RC \gg T$, sendo T o período da senóide.

$$i_L = \frac{v_o}{R}$$

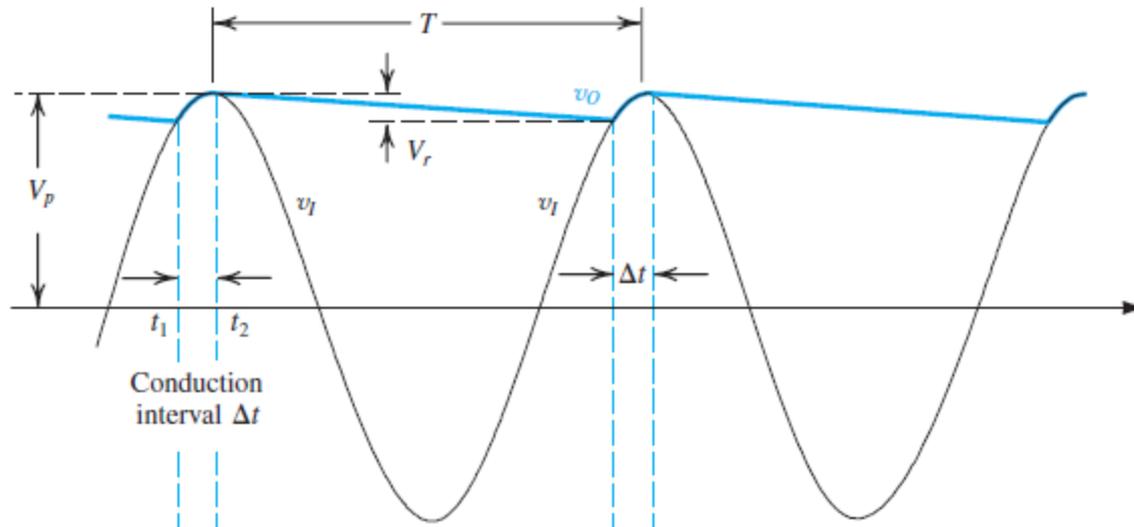
$$i_D = i_c + i_L = C \frac{dv_I}{dt} + i_L \quad [6]$$



O diodo conduz por um breve intervalo (Δt), próximo do pico da senóide de entrada, e alimenta o capacitor com carga igual à perda durante o longo intervalo de descarga. Esse último intervalo é aproximadamente igual à T .

Supondo um diodo ideal, ele começa a conduzir no instante t_1 , no qual a entrada v_i se iguala ao valor da queda exponencial da saída v_o . A condução cessa em t_2 imediatamente após o pico de v_i . O valor exato de t_2 pode ser determinado fazendo $i_D = 0$ na equação [6] abaixo.

$$i_D = C \frac{dv_I}{dt} + i_L \quad [6]$$



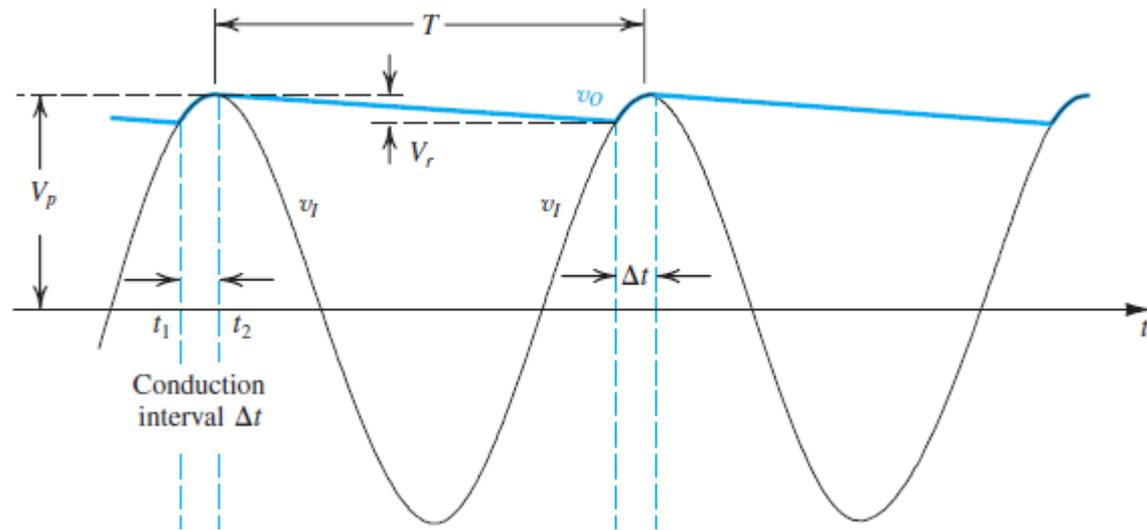
■ Durante o intervalo de corte do diodo o capacitor C descarrega através de R e então v_o cai exponencialmente com um constante $\tau = RC$. O intervalo de descarga começa próximo do pico de v_i . Ao final do intervalo de descarga, o qual dura quase todo o período T , $v_o = V_p - V_r$, em que V_r é a tensão pico à pico de ondulação. Se $RC \gg T$ o valor de V_r é pequeno.

■ Quando V_r é pequeno, v_o é quase constante e igual ao valor de pico de v_i , (V_p).

■ De modo similar, a corrente i_L é quase constante e sua componente CC é dada por:

$$I_L = \frac{V_p}{R} \quad [7]$$

Cálculo de V_r



A equação 8 é uma expressão mais precisa para a tensão CC de saída (V_o):

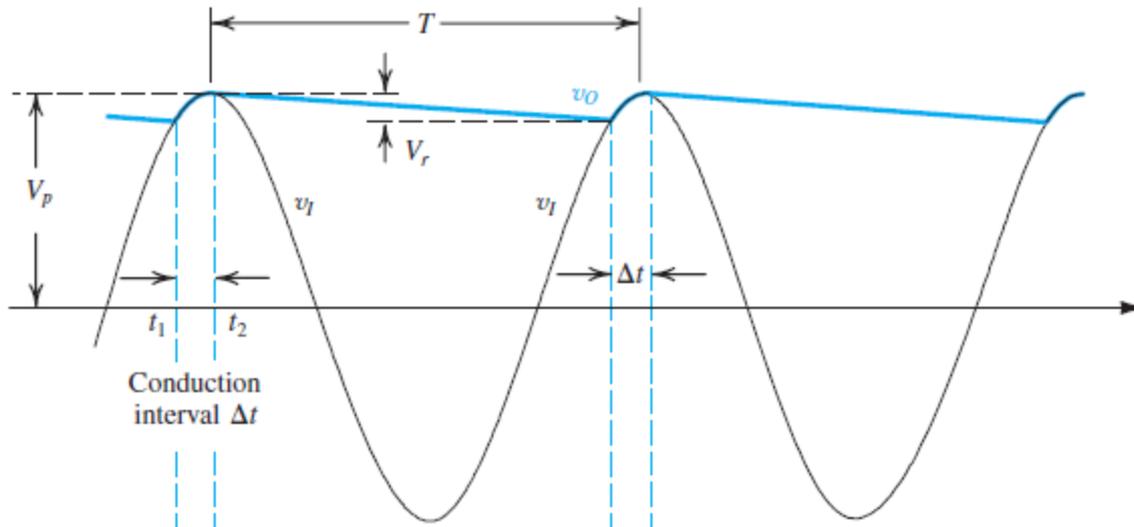
$$v_o = V_P - \frac{1}{2} V_r \quad [8]$$

Durante o intervalo de corte do diodo, v_o pode ser expressa como:

$$v_o = V_p e^{-t/RC} \quad [9]$$

Ao final do intervalo de descarga, tem-se:

$$V_P - V_r = V_p e^{-T/RC} \quad [10]$$

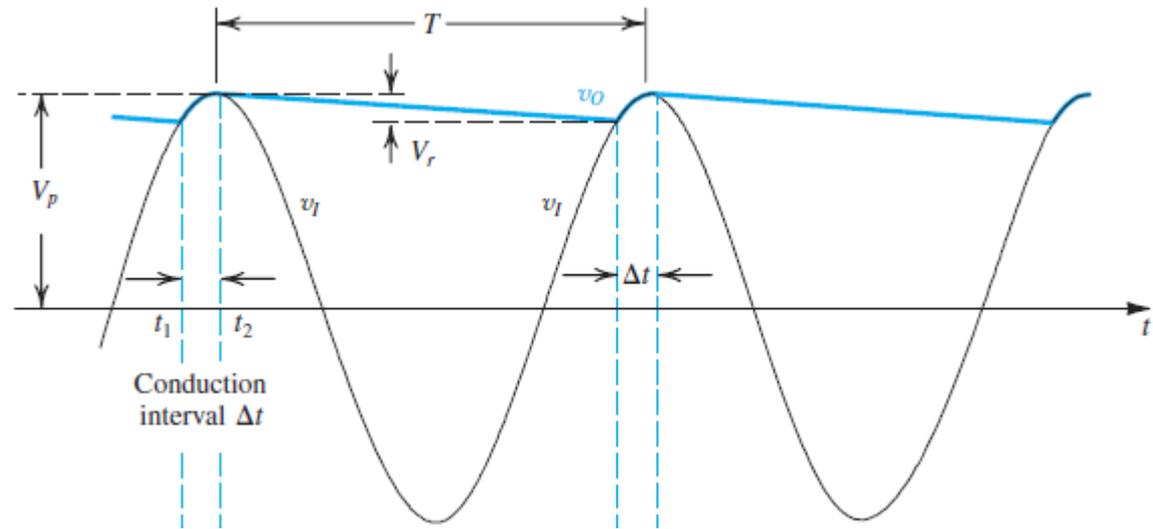


■ Sendo $RC \gg T$, pode-se usar a aproximação:

$e^{-T/RC} \approx 1 - T/RC$ para se obter:

$$V_r \approx V_P \frac{T}{CR} \longrightarrow V_r = \frac{V_P}{fCR} \longrightarrow \boxed{V_r = \frac{I_L}{fC}}$$

Cálculo de Δt



O **intervalo de condução (Δt)** pode ser determinado a partir da relação:

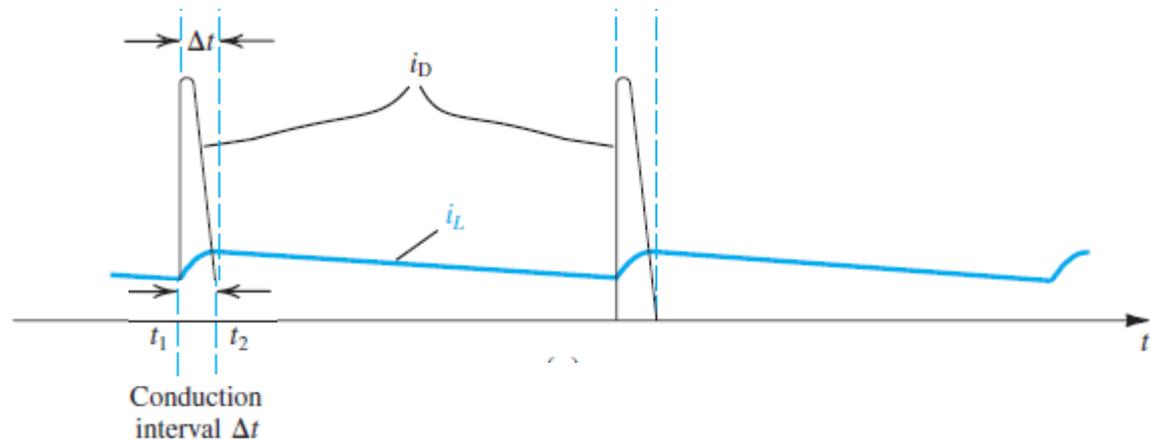
$$V_p \cos(\omega \Delta t) = V_p - V_r$$

Sendo ω a frequência angular de v_l , visto que $\omega \Delta t$ é um ângulo pequeno, pode-se usar a aproximação:

$$\cos(\omega \Delta t) \approx 1 - \frac{1}{2} (\omega \Delta t)^2 \longrightarrow \boxed{\Delta t \approx \frac{\sqrt{2V_r V_p}}{\omega}}$$

Observa-se que quando V_r for muito pequeno o ângulo $\omega \Delta t$ será pequeno.

Cálculo de $I_{Dméd}$



Para se determinar a **corrente média no diodo ($I_{dméd}$)** durante a condução iguala-se a carga que o diodo fornece ao capacitor à carga que o capacitor perde durante o intervalo de descarga.

$$Q_{fornecida} = i_{Cméd} \Delta t$$

$$i_D = i_C + i_L$$

$$\rightarrow i_{Cméd} = i_{Dméd} - i_L$$

$$Q_{perdida} = C V_r$$

$$\Delta t \approx \frac{\sqrt{2V_r V_p}}{w}$$

$$V_r = \frac{V_p}{CR}$$

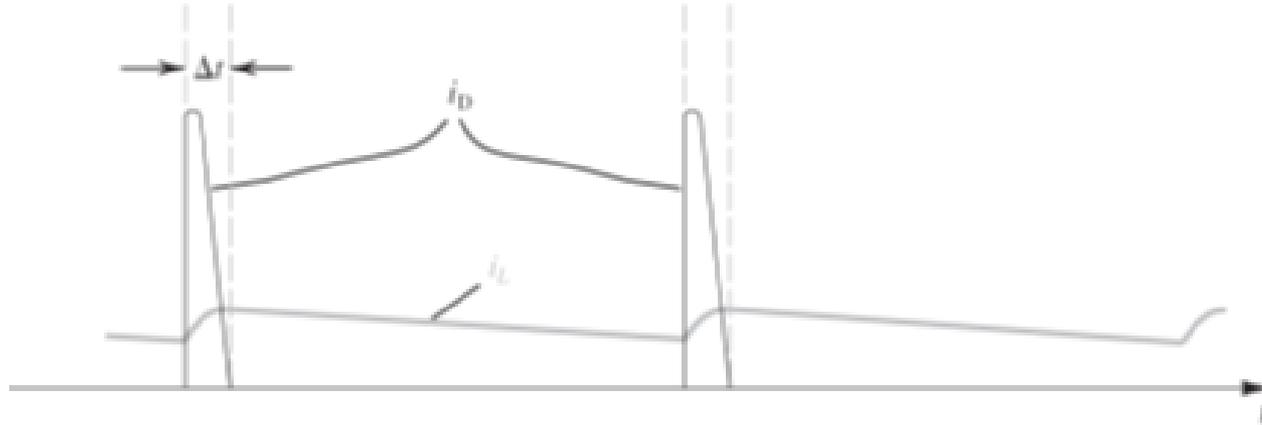
$$i_{Dméd} = I_L (1 + \pi \sqrt{2V_p / V_r})$$

Cálculo de $I_{Dméd}$

$$i_{Dméd} = I_L (1 + \pi \sqrt{2V_p/V_r})$$

Observa-se que quando $V_r \ll V_p$ a corrente média do diodo na condução é muito maior que a corrente CC na carga. Isso não surpreende visto que **o diodo conduz por um intervalo de tempo muito pequeno e deve repor a carga perdida pelo capacitor durante o longo intervalo no qual ele é descarregado.**

Cálculo de $I_{Dmáx}$



O valor de pico na corrente do diodo ($I_{dmáx}$) pode ser determinado a partir das expressões abaixo na condução do diodo:

$$i_{Dméd} = I_L(1 + \pi \sqrt{2V_p V_r})$$

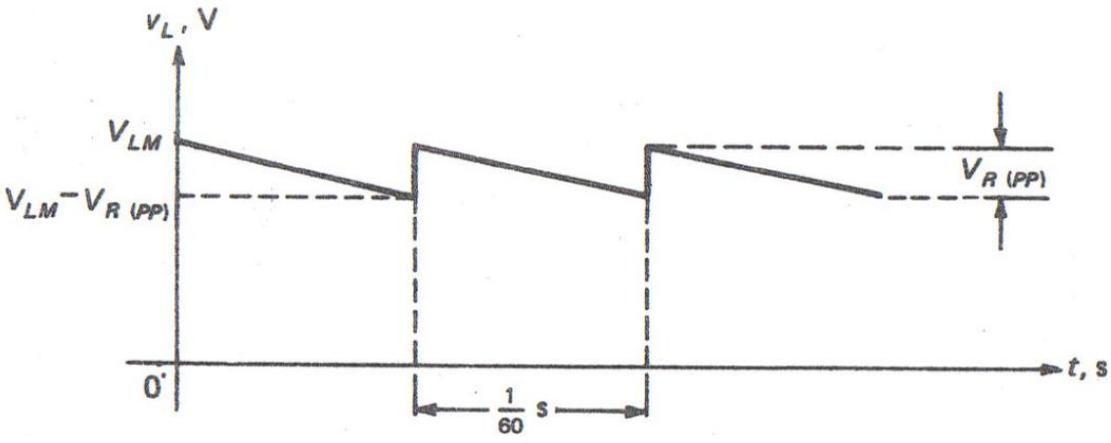
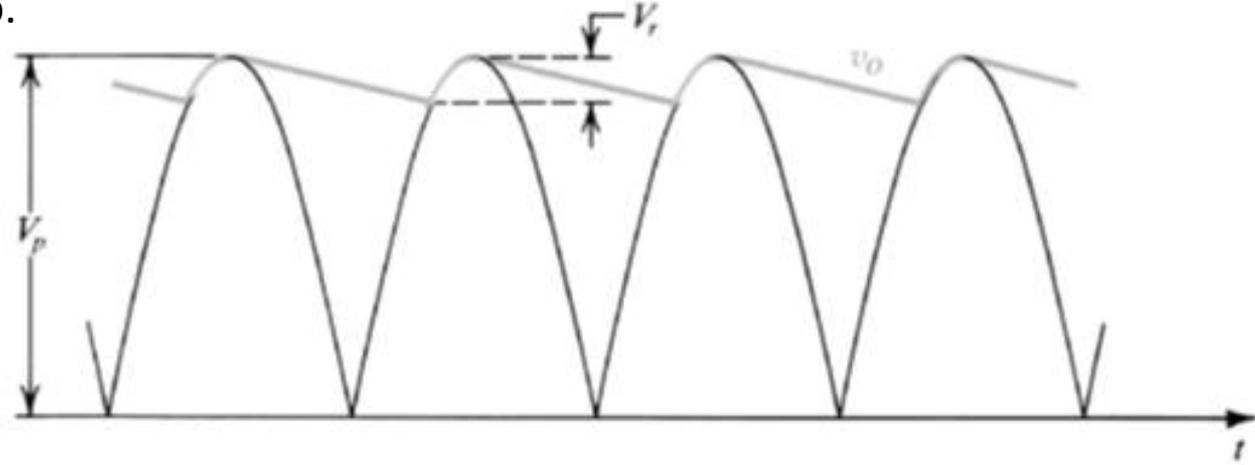
$$i_D = C \frac{dv_I}{dt} + i_L$$

$$I_L = \frac{V_p}{R}$$

$$i_{Dmáx} = I_L(1 + 2\pi \sqrt{2V_p / V_r})$$



Pelas equações de $I_{Dm\acute{a}x}$ e $I_{Dm\acute{e}d}$ conclui-se que para $V_r \ll V_p$, $I_{Dm\acute{a}x} \approx 2 I_{Dm\acute{e}d}$ o que corresponde ao fato que a forma de onda de I_D é quase um triângulo reto, conforme figura abaixo.



Exemplo:

Considere um **retificador de meia onda** com filtro capacitivo alimentado por uma senóide tendo um valor de pico de $V_p = 100V$. Suponha uma resistência de carga $R=10k\Omega$.

- Calcule o valor da capacitância C que resultará em uma ondulação de pico à pico de $2V$.
- Calcule a fração do ciclo durante a qual o diodo conduz.
- Calcule $I_{Dmáx}$ e $I_{Dméd}$.

■ Cálculo de C

$$C = \frac{V_p}{V_r f R} = \frac{100}{2 \times 60 \times 10 \times 10^3} = 83,3 \mu F$$

■ Cálculo da fração do ciclo

$$w\Delta t = \sqrt{2V_r/V_p} = \sqrt{22/100} = 0,2 \text{ rad}$$

Logo, a fração de condução é $0,2/2\pi = 3.18\%$

■ Cálculo de $I_{Dméd}$

$$i_{Dméd} = I_L (1 + \pi \sqrt{2V_p/V_r})$$

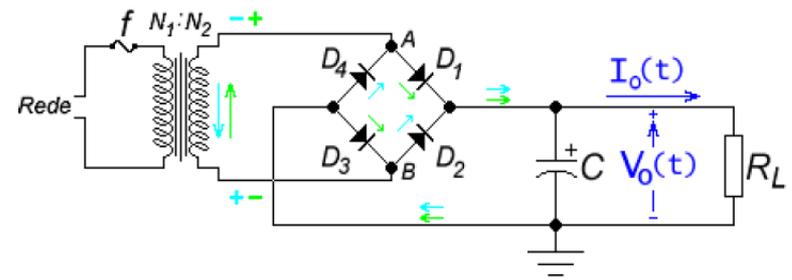
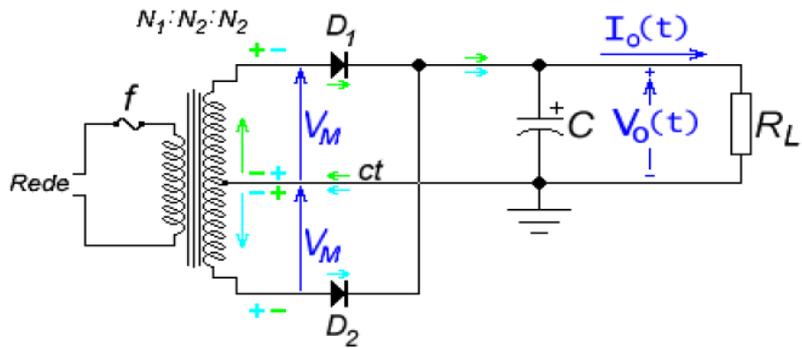
$$I_{dméd} = 324 \text{ mA}$$

■ Cálculo de $I_{Dmáx}$

$$i_{Dmáx} = I_L (1 + 2\pi \sqrt{2V_p/V_r})$$

$$I_{dmáx} = 638 \text{ mA}$$

Retificador de Onda Completa com Capacitor de Filtro



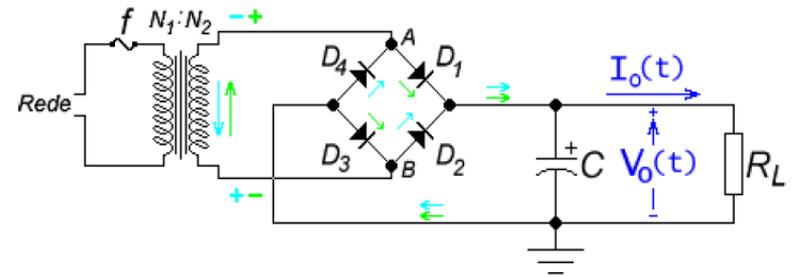
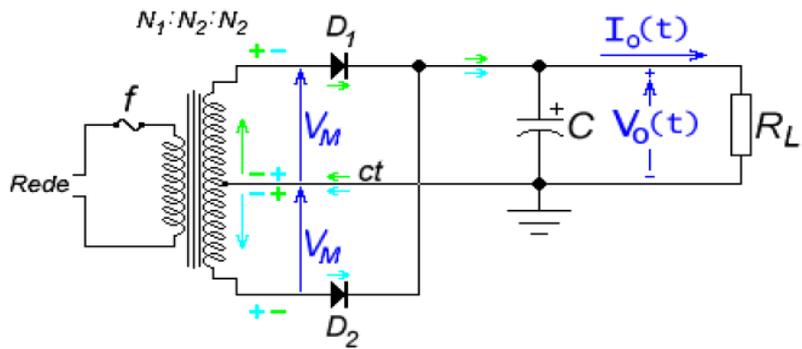
Os retificadores de onda completa podem ser convertidos para **retificadores de pico** incluindo-se um capacitor em paralelo com a carga R_L , isto é, a tensão de saída será quase igual ao valor de pico da entrada senoidal.

Nos retificadores de onda completa a **frequência de ondulação será o dobro** e no cálculo da tensão pico à pico da ondulação o **período de descarga é $T/2$** :

$$V_r = \frac{V_p}{2fCR} \quad R=R_L$$

O intervalo de condução é o mesmo que para o retificador de meia onda:

$$V_r = \frac{I_L}{fC}$$



A correntes $I_{Dméd}$ e $I_{Dmáx}$ são dadas por:

$$i_{Dméd} = I_L (1 + \pi \sqrt{V_p / 2V_r})$$

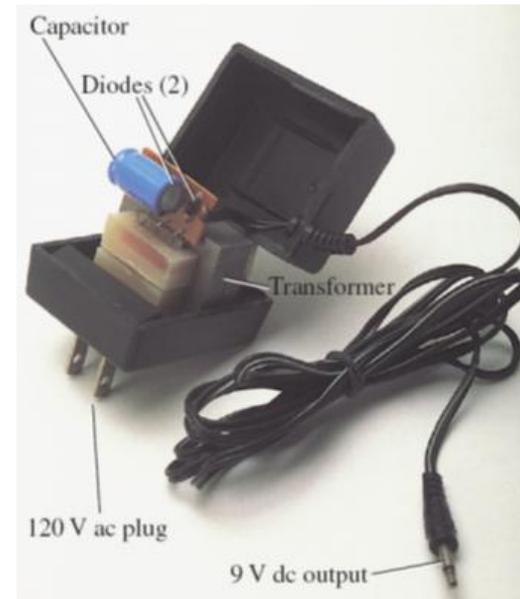
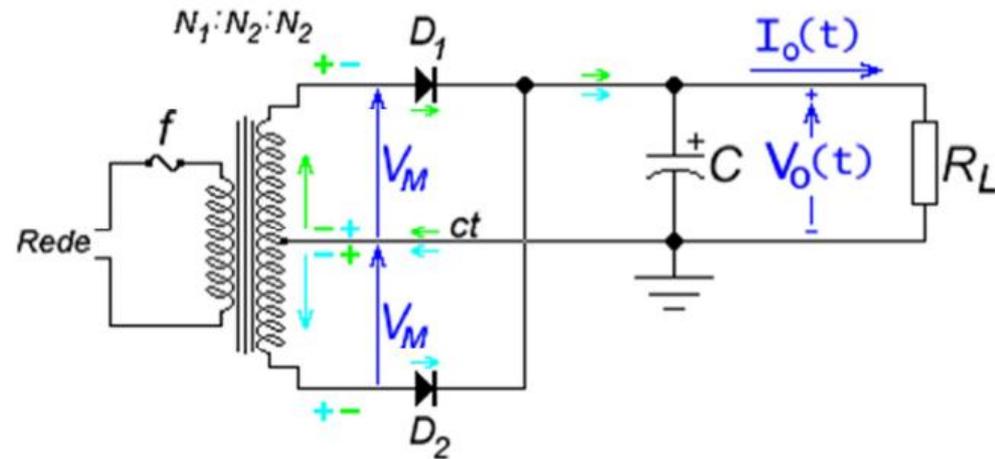
$$i_{Dmáx} = I_L (1 + 2\pi \sqrt{V_p / 2V_r})$$

Para os mesmos valores de V_p , f , R_L e V_r , e, portanto, a mesma I_L , utiliza-se um **capacitor com a metade do valor em relação ao retificador de meia onda.**

A **corrente em cada diodo é aproximadamente a metade do valor em relação ao retificador de meia onda.**

Retificador de Onda Completa com Diodos e Center-Tap

Exemplo de aplicação de um retificador de onda completa com center-tap



Fonte de 9V com retificação de onda completa e center-tap usada em equipamentos eletrônicos

Retificadores de Meia Onda de Precisão (Superdiodo)

Os circuitos retificadores estudados anteriormente possuem uma **limitação** que é a redução de tensão no caminho de sinal de uma ou duas quedas de tensão do diodo.

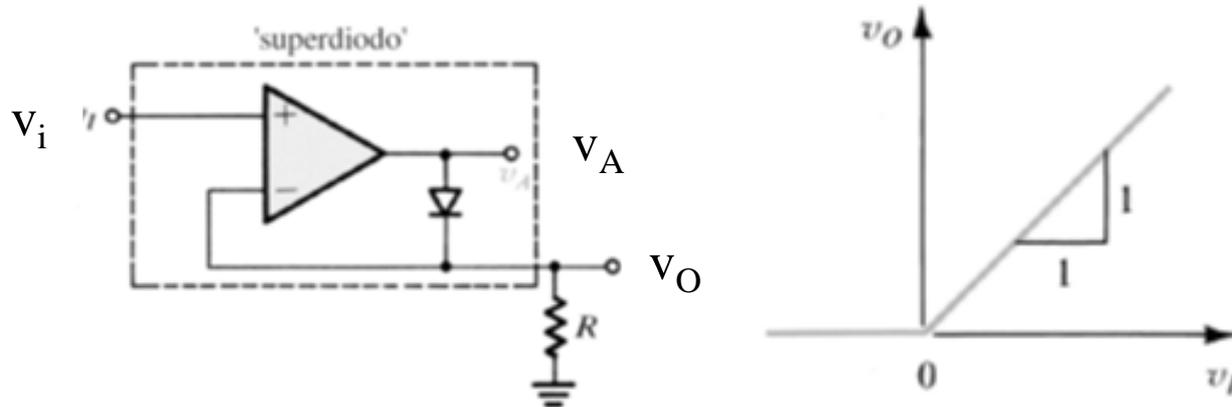
Logo esses circuitos **operam adequadamente só quando o sinal a ser retificado é muito maior que a queda de tensão no diodo ($\approx 0.7V$)**.

Existem aplicações em que o sinal a ser retificado é pequeno, por exemplo, 100mV, e claramente insuficiente para fazer um diodo conduzir.

Além disso, em aplicações de instrumentação, existe a necessidade de circuitos retificadores muito precisos.

Para essas aplicações uma classe de circuitos foi desenvolvida utilizando-se **ampos** em conjunto com diodos para obter **retificação de precisão**.

A figura abaixo mostra um circuito retificador de precisão em que o diodo foi colocado no caminho da realimentação negativa do amp op, sendo R a resistência de carga do retificador. O amp op precisa de fontes de alimentação para sua operação e eles não são mostradas.



Se v_i é positivo a tensão da saída do amp op será positiva e o diodo conduzirá estabelecendo uma malha fechada de realimentação entre o terminal de saída do amp op e o terminal negativo de entrada (entrada inversora). Esse caminho de realimentação e a existência de curto-circuito virtual ($v_+ = v_-$) faz com que $v_o = v_i$ quando $v_i \geq 0$.

Se v_i é negativo a tensão da saída do amp op será negativa e o diodo estará reversamente polarizado e, portanto, a corrente será nula em R impondo que $v_o = 0$. Então para $v_i < 0$, $v_o = 0$.

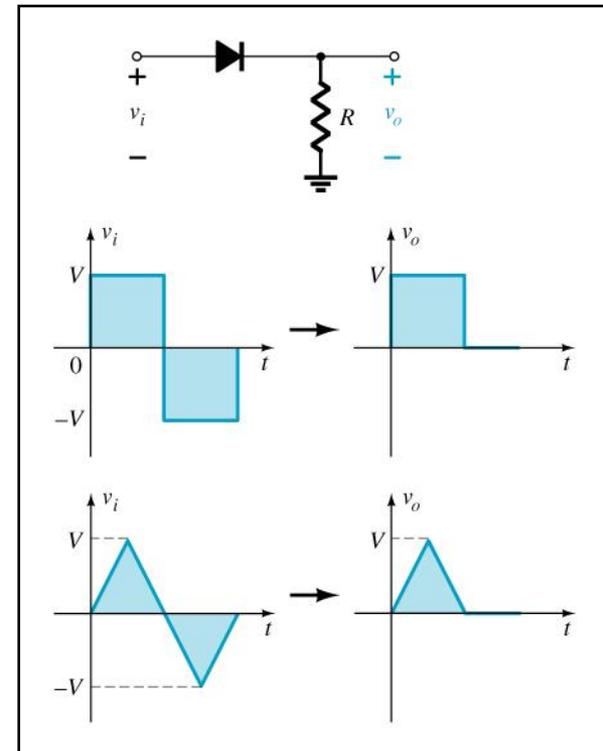
Climppers (Ceifadores)

Diode Clippers

Clippers are networks that employ diodes to “clip” away a portion of an input signal without distorting the remaining part of the applied waveform.

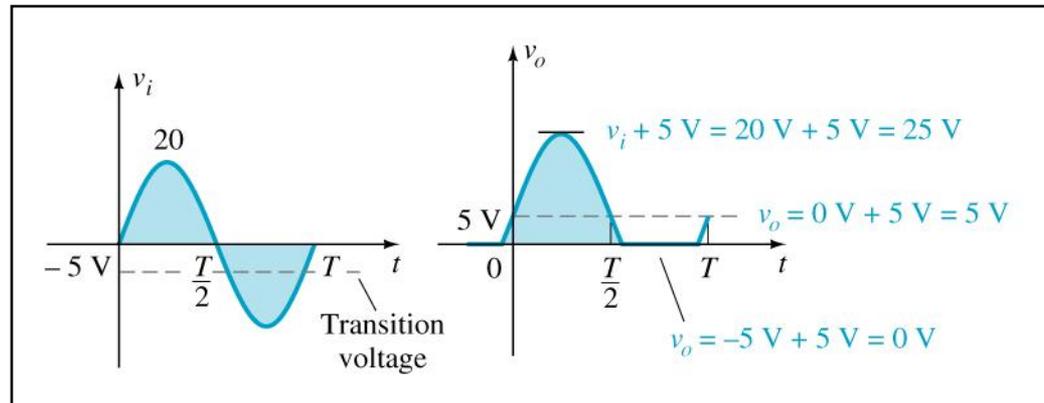
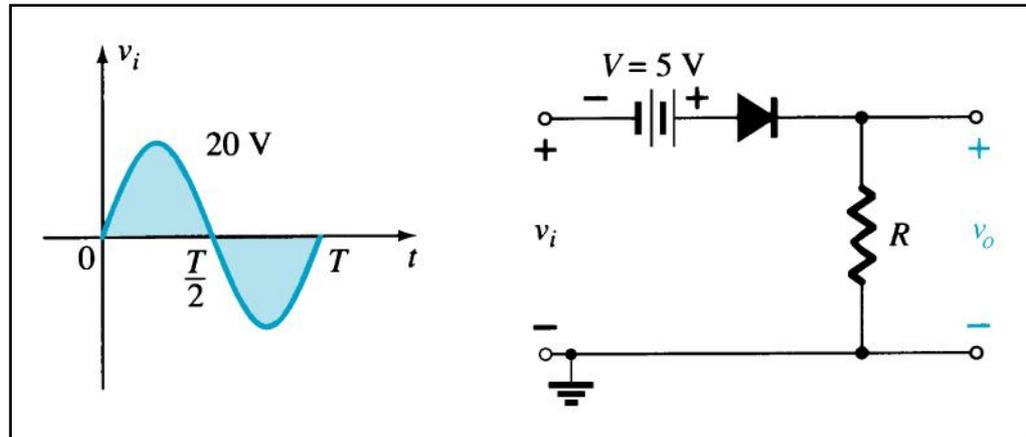
The diode in a series clipper “clips” any voltage that cause:

- A reverse-biasing polarity
- A forward-biasing polarity less than 0.7 V (for a silicon diode)



Biased Clippers

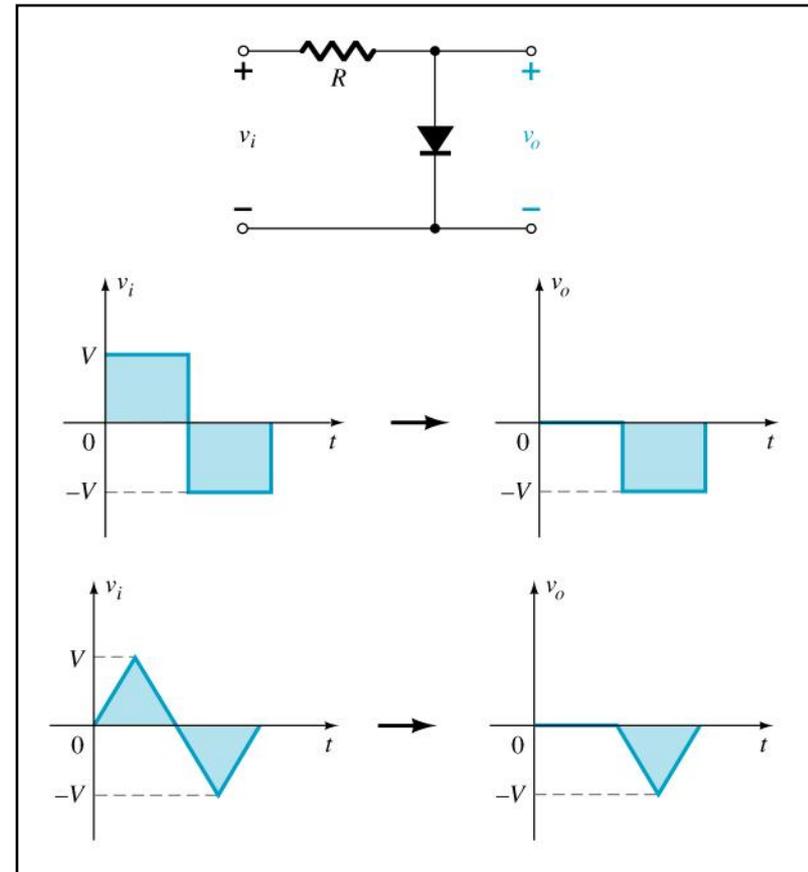
Adding a DC source in series with the clipping diode changes the effective forward bias of the diode.



Parallel Clippers

The diode in a parallel clipper circuit “clips” any voltage that forward biases it.

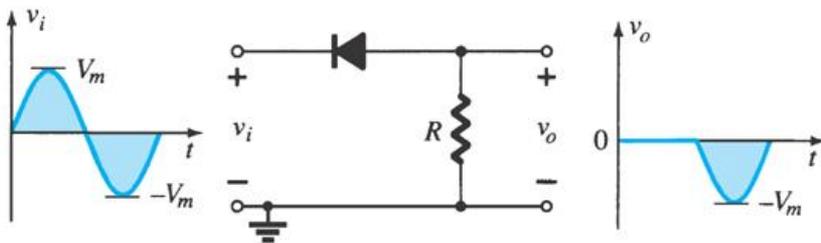
DC biasing can be added in series with the diode to change the clipping level.



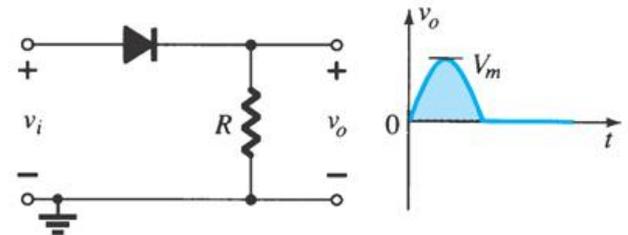
Simple Series Circuits

Simple Series Clippers (Ideal Diodes)

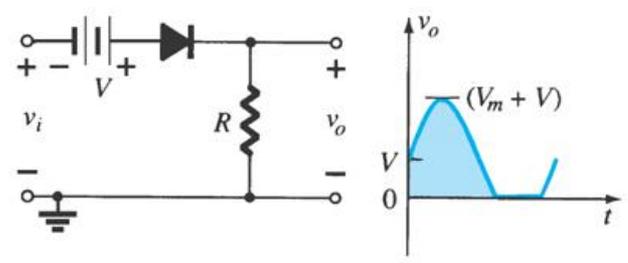
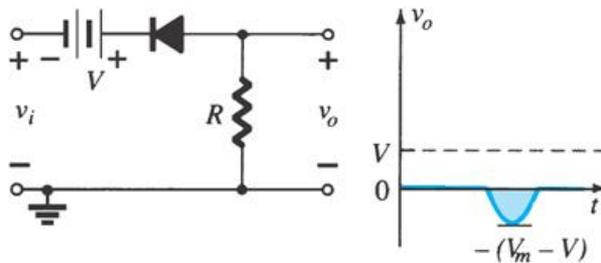
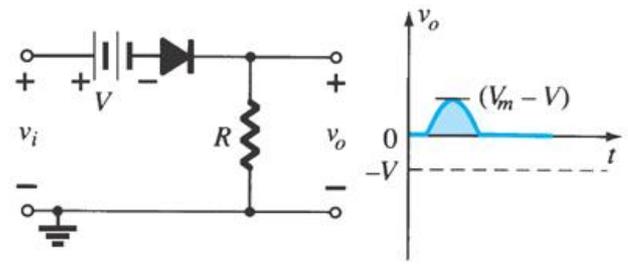
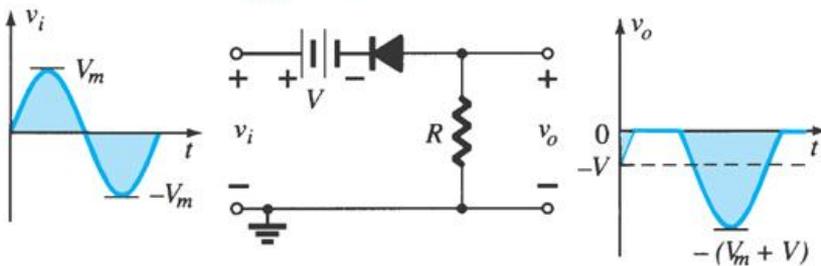
POSITIVE



NEGATIVE

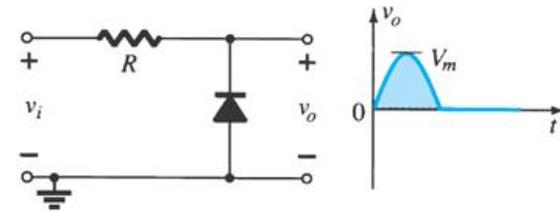
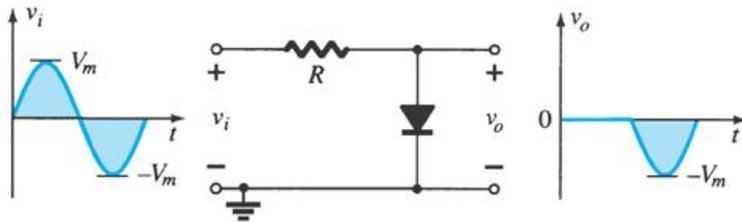


Biased Series Clippers (Ideal Diodes)

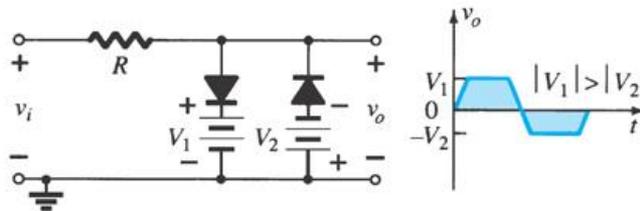
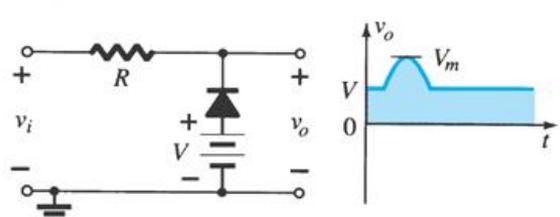
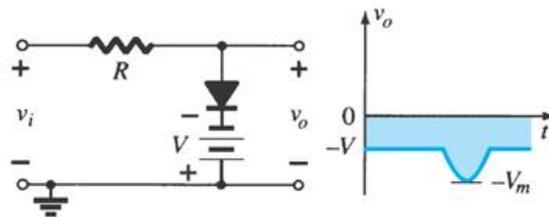
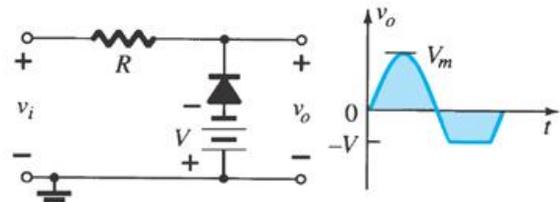
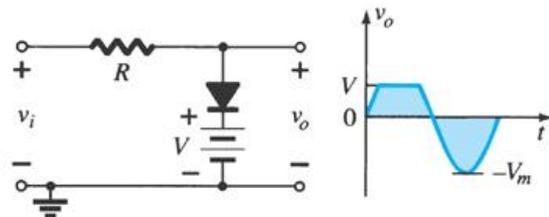


Biased Parallel Clipper Circuits

Simple Parallel Clippers (Ideal Diodes)



Biased Parallel Clippers (Ideal Diodes)

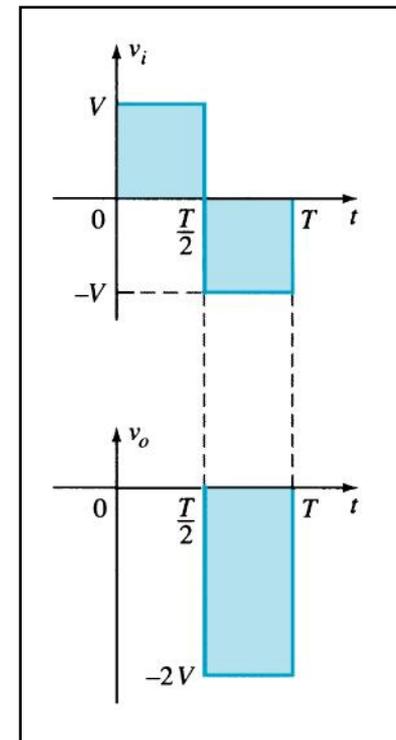
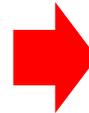
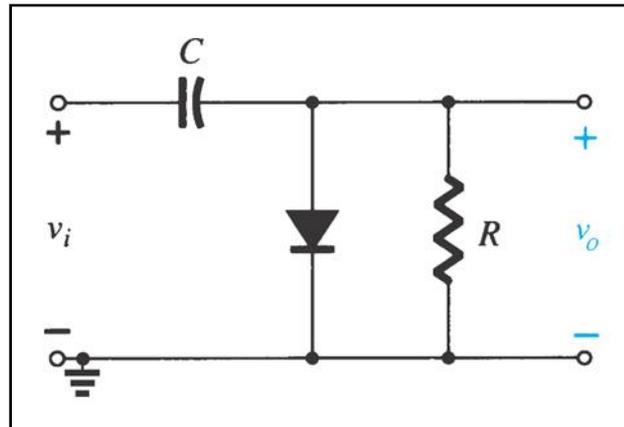


Clamppers (Grampeadores)

Clampers

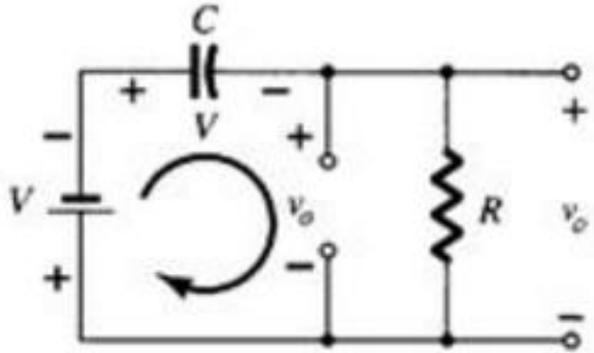
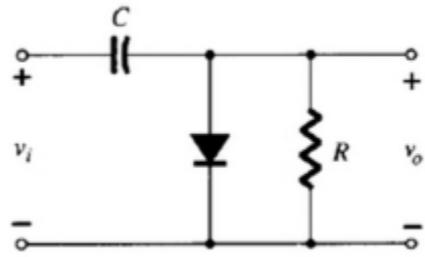
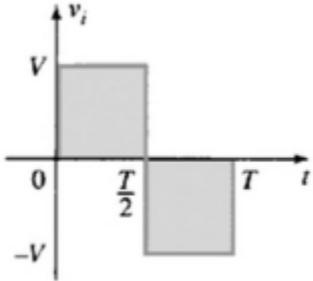
A clamper is a network constructed of a diode, a resistor and a capacitor that shifts a waveform to a different dc level without changing the appearance of the applied signal.

A diode and capacitor can be combined to “clamp” an AC signal to a specific DC level.



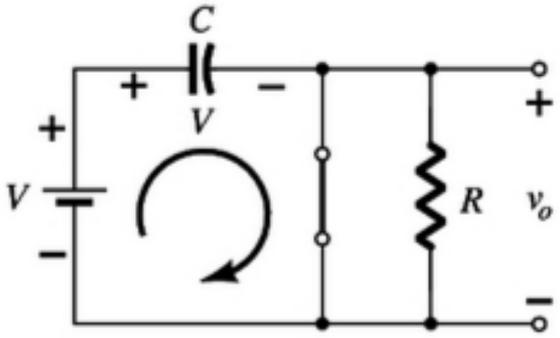
Clamper Circuits

Example 1: Determine v_o for the networks below for the input indicated.

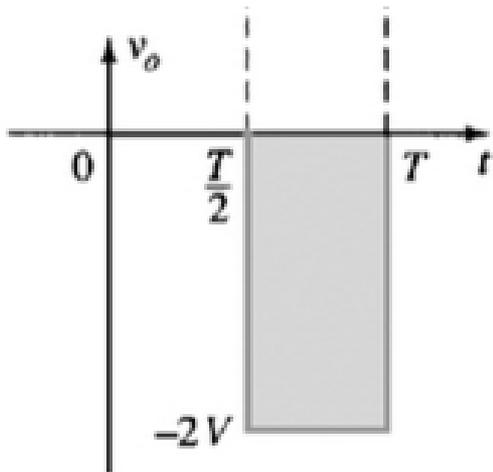


$$-V - V - v_o = 0$$

$$v_o = -2V$$

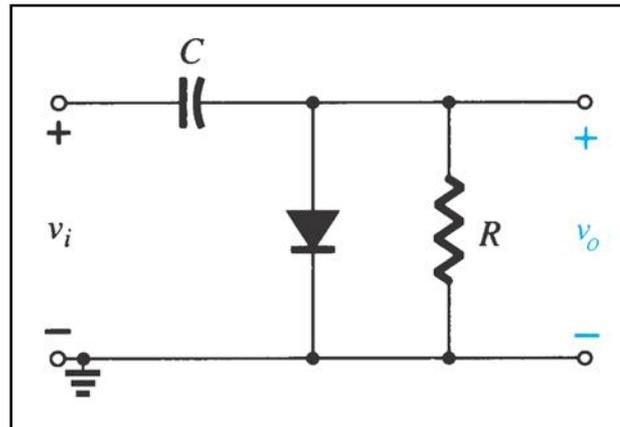


$$v_o = 0$$



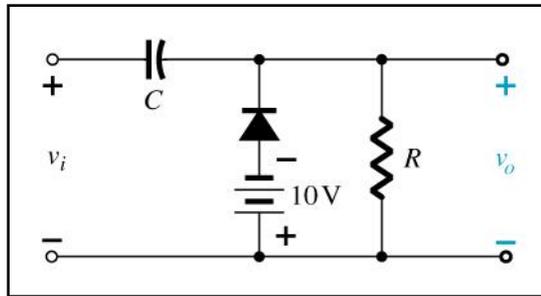
Clampers

The chosen resistor and capacitor of the network must be chosen such that the time constant determined by $\tau = RC$ is sufficiently large to ensure that the voltage across the capacitor does not discharge significantly during the interval the diode is nonconducting. To ensure that the chosen capacitor must fully charges or discharges in five time constants.

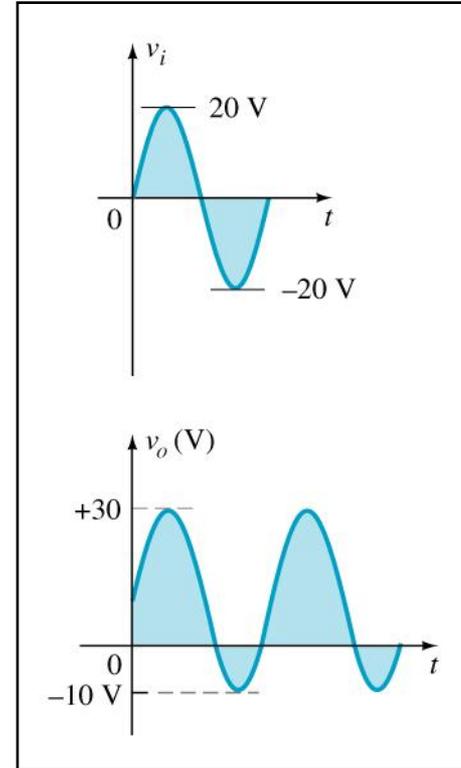


Biased Clamper Circuits

The input signal can be any type of waveform such as a sine, square, or triangle wave.

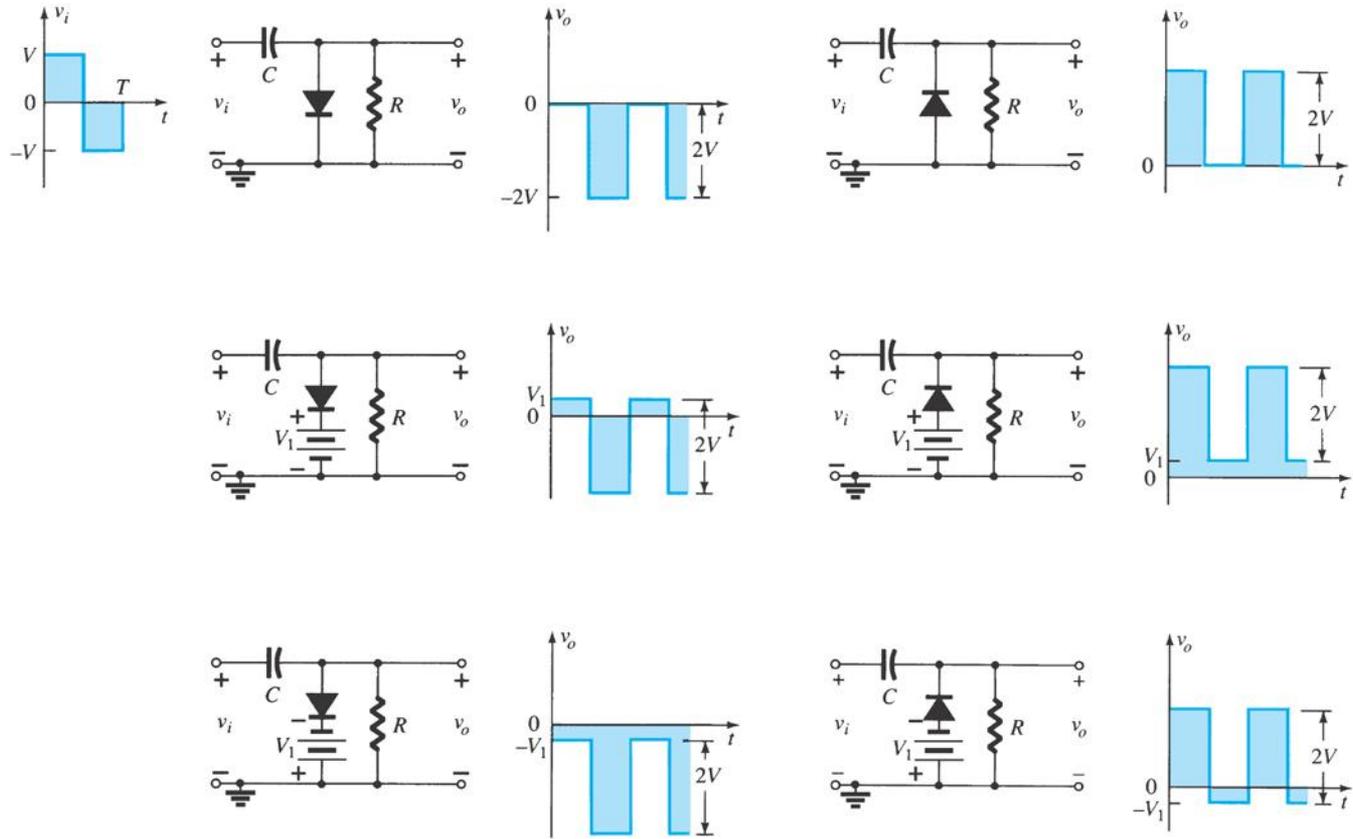


The DC source lets you adjust the DC clamping level.



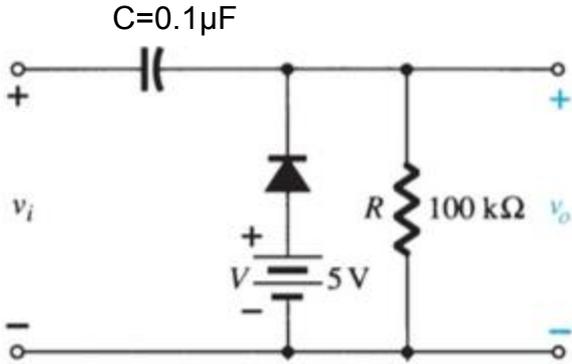
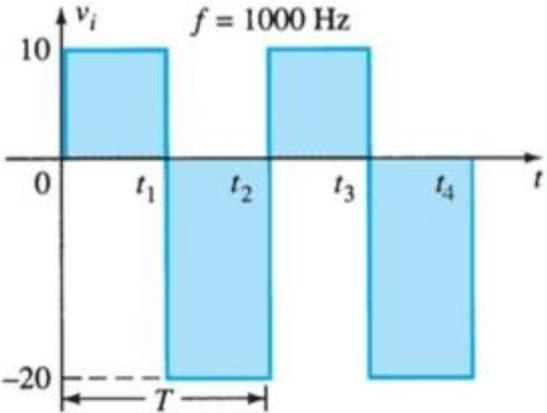
Clamper Circuits

Clamping Networks



Clamper Circuits

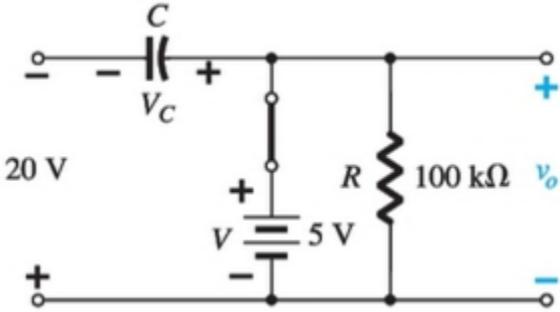
Example 2: Determine v_o for the network below for the input indicated.



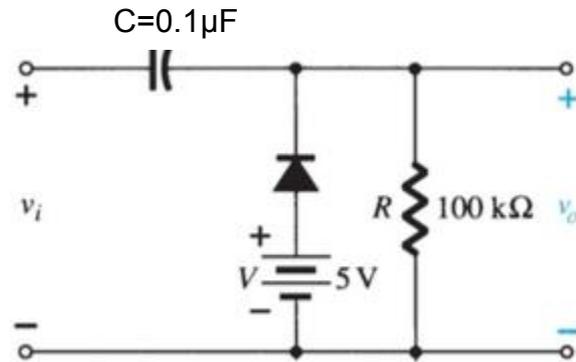
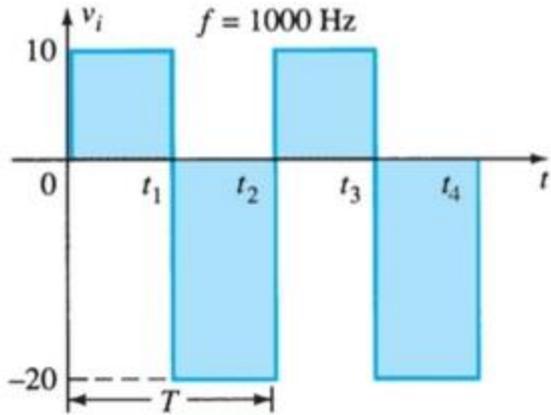
$t_1 \rightarrow t_2$

$$-20 \text{ V} + V_C - 5 \text{ V} = 0$$

$$V_C = 25 \text{ V}$$



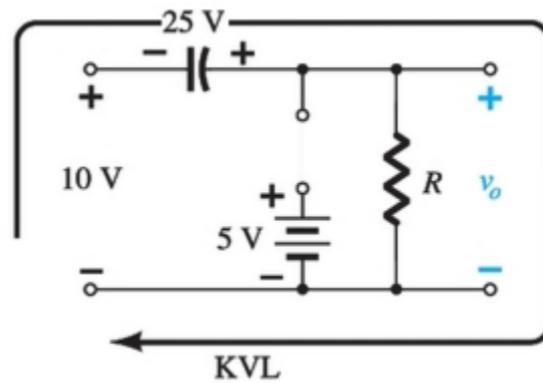
Clamper Circuits



$t_2 \rightarrow t_3$

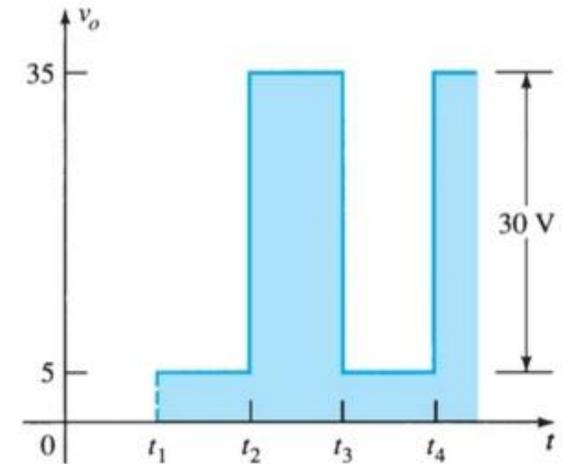
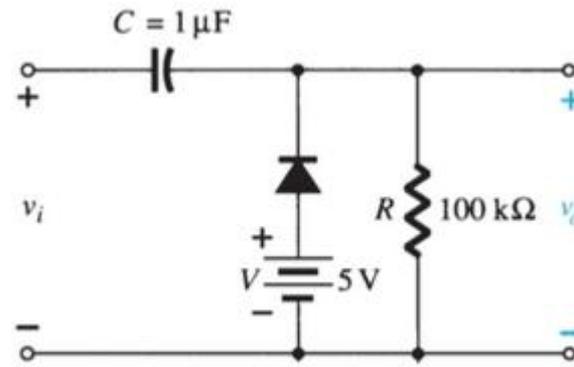
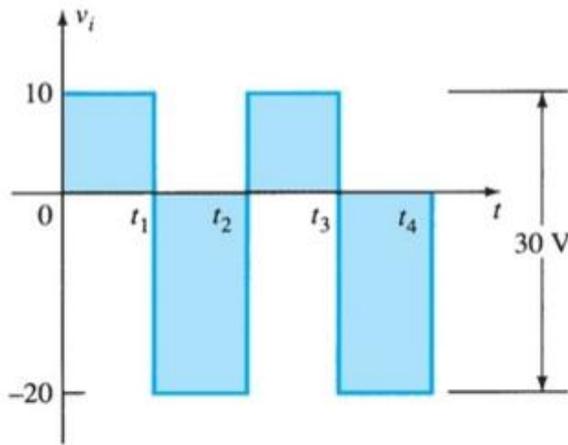
$$+ 10 \text{ V} + 25 \text{ V} - v_o = 0$$

$$v_o = 35 \text{ V}$$



Clamper Circuits

The time constant is $\tau = RC = (100\text{k}\Omega)(0,1\mu\text{F}) = 10\text{ms}$. The total discharge time is $5\tau = 50\text{ms}$. Since the interval $t_2 \rightarrow t_3$ will last only 0.5ms , it is certainly a good approximation that the capacitor will hold its voltage during the discharge between pulses of the input signal.



Voltage Multipliers

Voltage-Multiplier Circuits

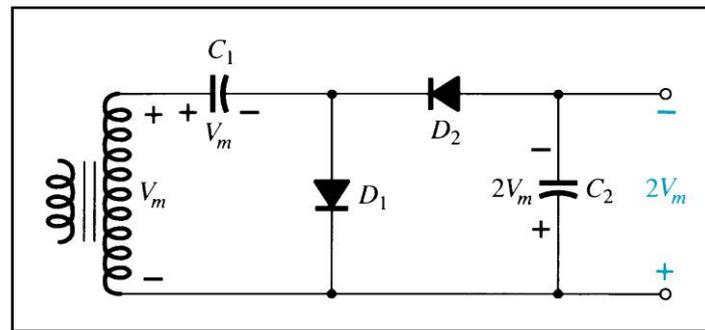
Voltage multiplier circuits use a combination of diodes and capacitors to step up the output voltage of rectifier circuits. Three common voltage multipliers are the:

Voltage Doubler

Voltage Tripler

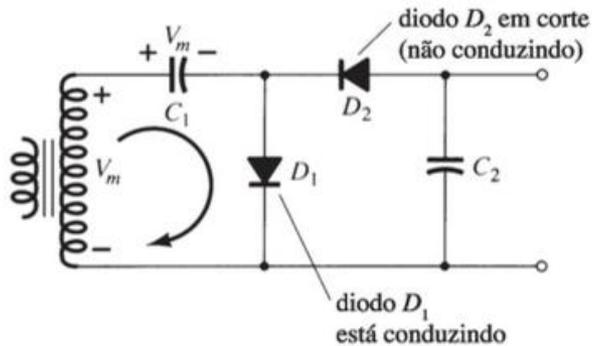
Voltage Quadrupler

Voltage Doubler



Positive Half-Cycle

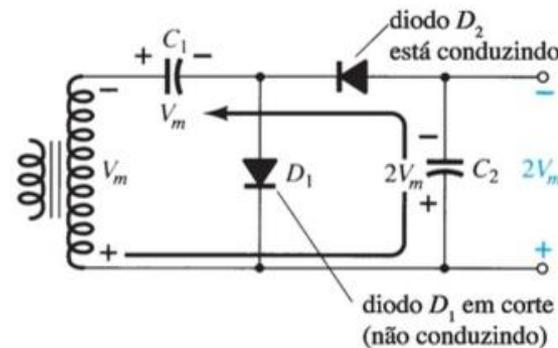
D_1 conducts
 D_2 is switched off
 Capacitor C_1 charges to V_m



$$-V_m + V_{C1} = 0$$

Negative Half-Cycle

D_1 is switched off
 D_2 conducts
 Capacitor C_2 charges to $2V_m$

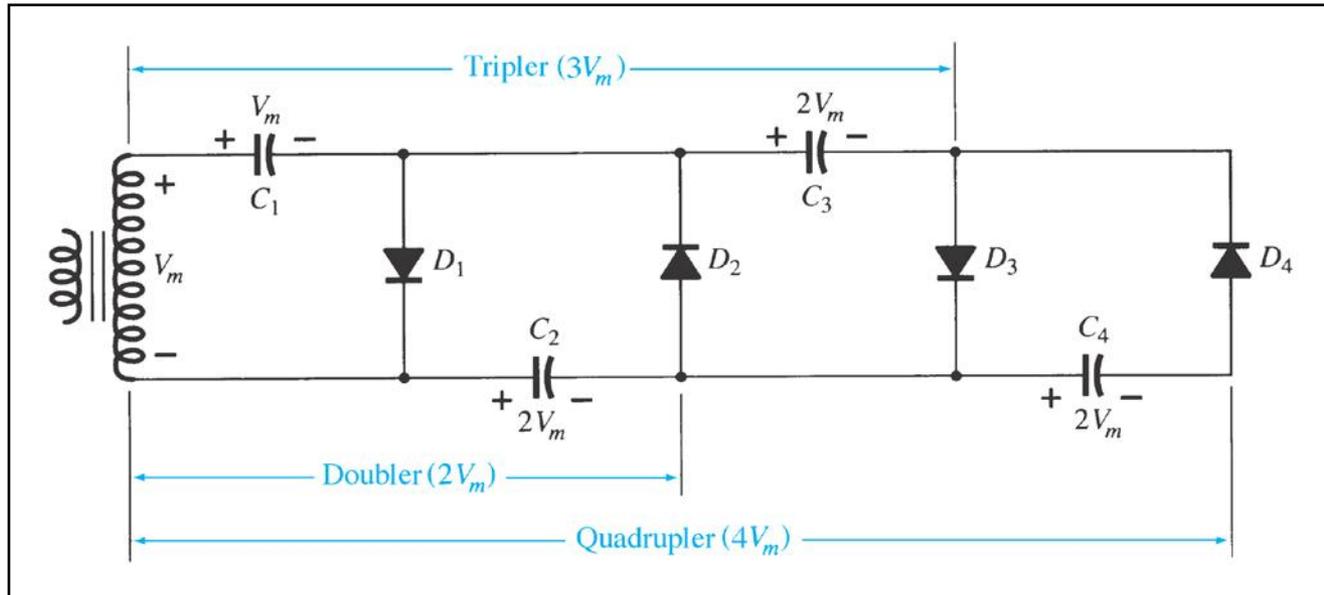


$$-V_m - V_{C1} + V_{C2} = 0$$



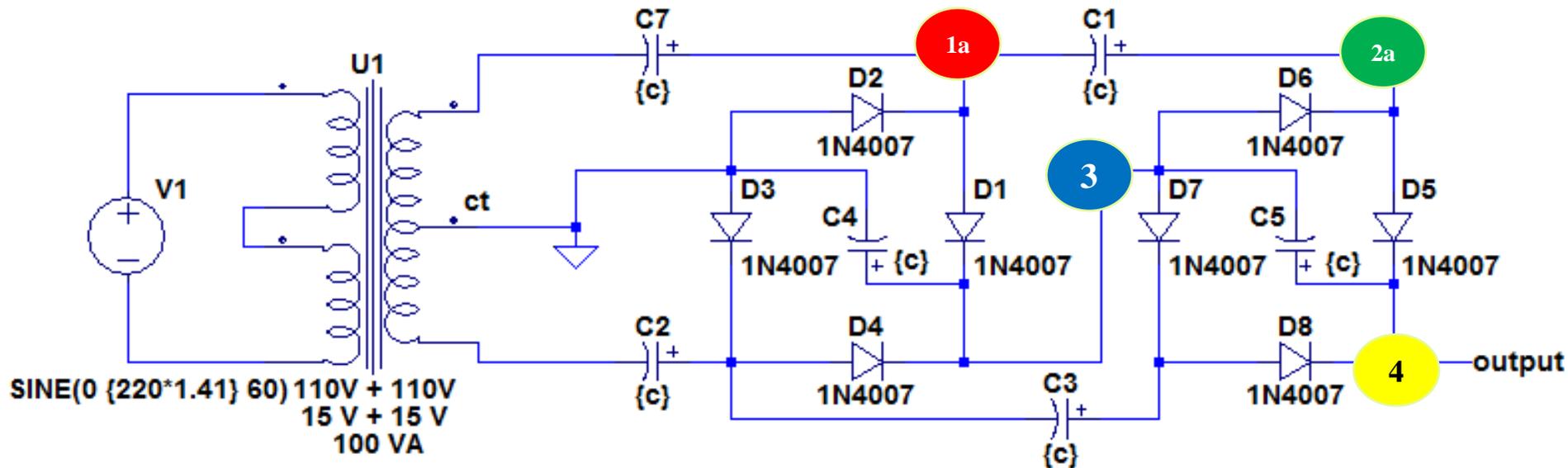
$$V_{out} = V_{C2} = 2V_m$$

Voltage Tripler and Quadrupler



Practical Applications

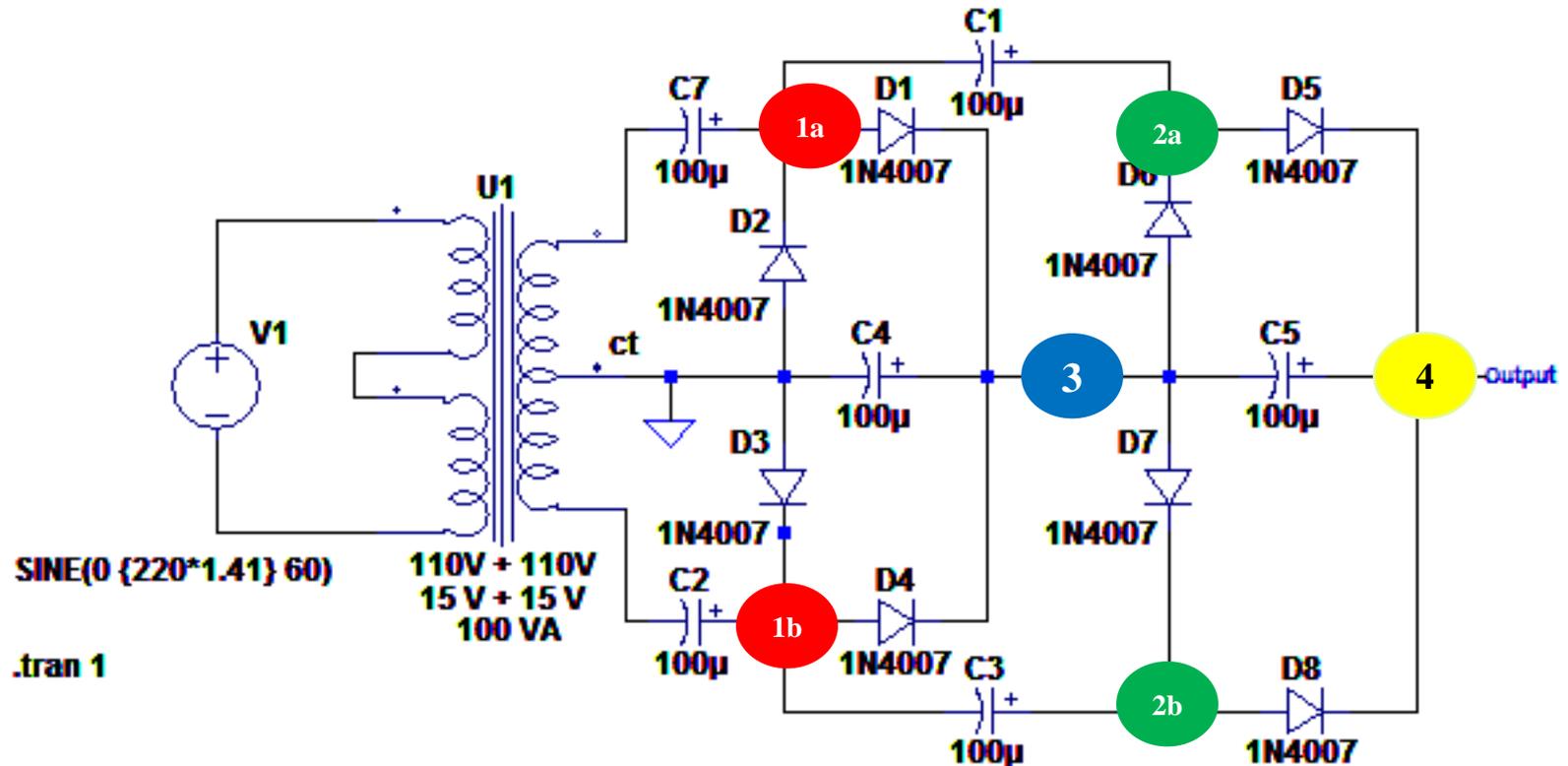
Exercício: No multiplicador de tensão abaixo determine no LTSPice as formas de onda nos nós **1a**, **2a**, **3** e **4** utilizando capacitâncias iguais à **10 μ F** e **100 μ F**.



Exercício:

Practical Applications

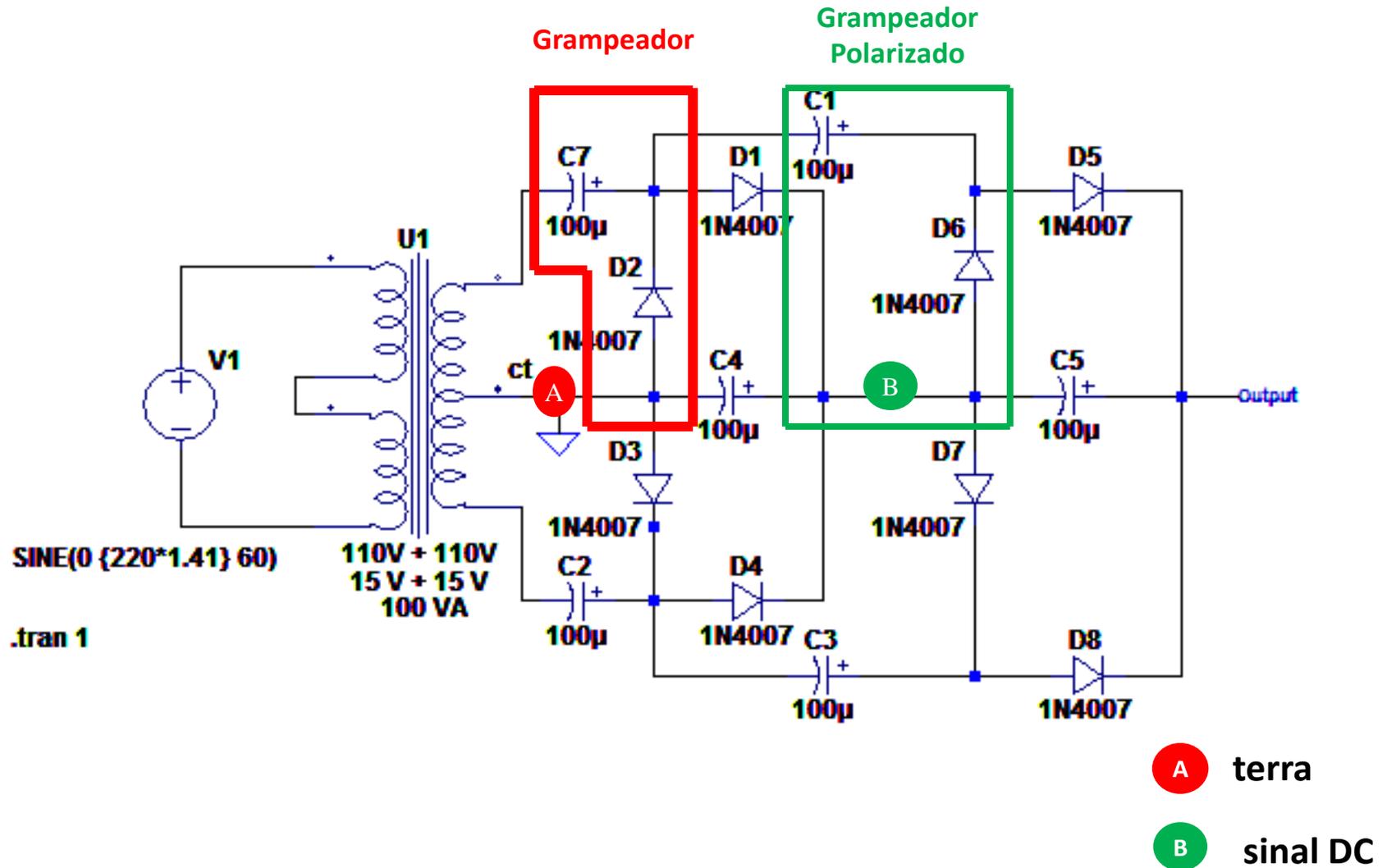
O multiplicador de tensão abaixo pode ser redesenhado para melhor visualizar os grampeadores e retificadores do circuito.



Exercício:

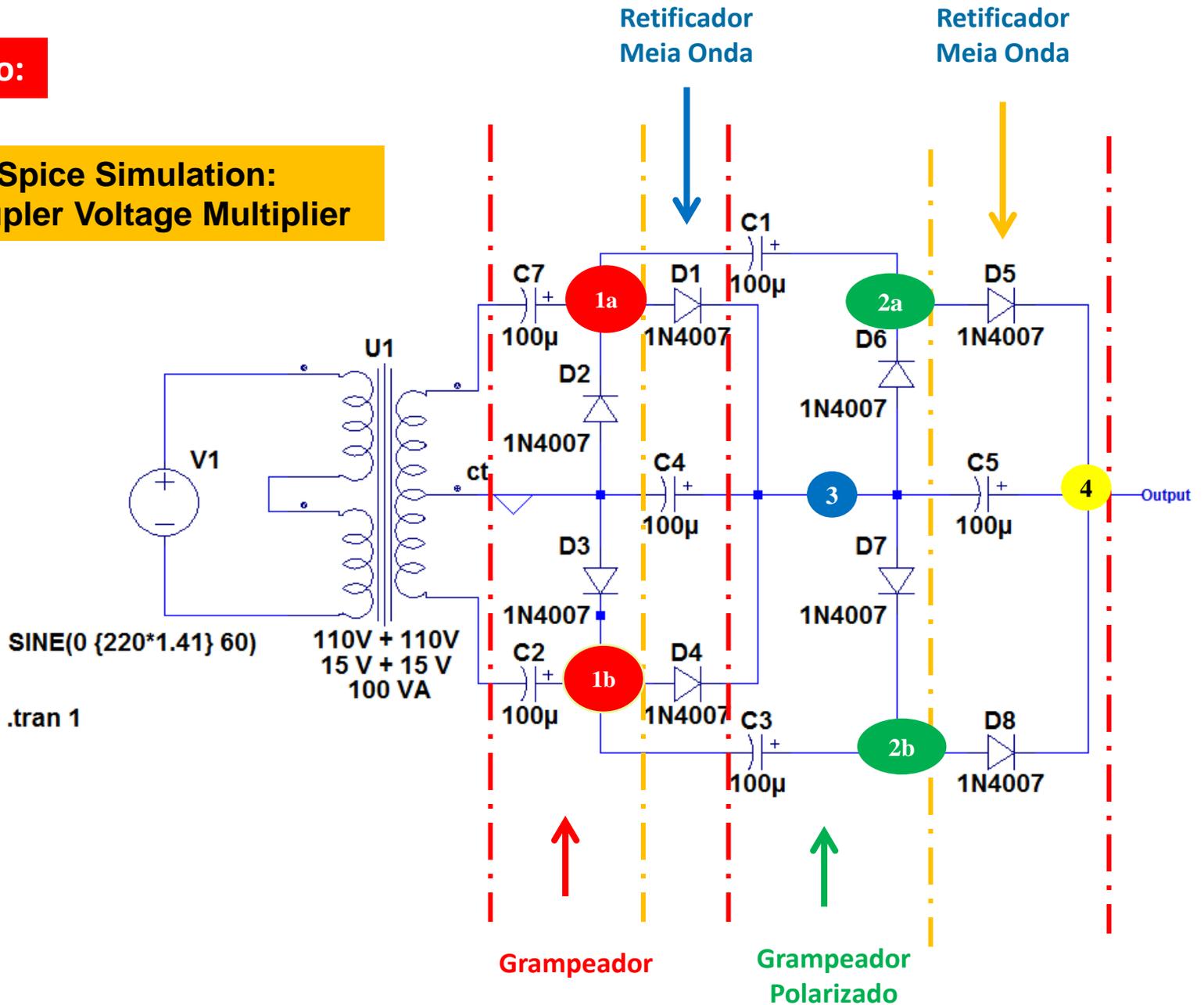
Practical Applications

O multiplicador de tensão abaixo pode ser redesenhado para melhor visualizar os grampeadores e retificadores do circuito.



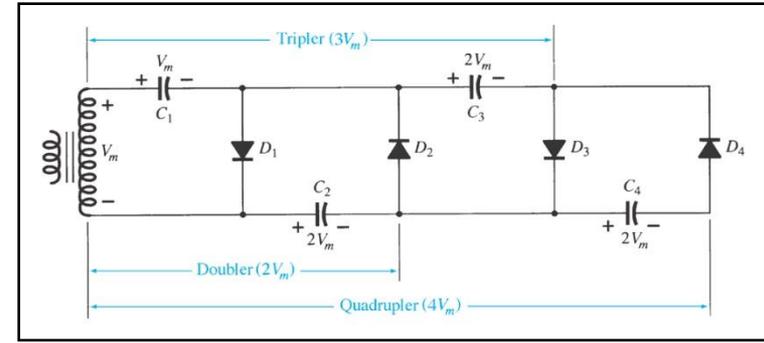
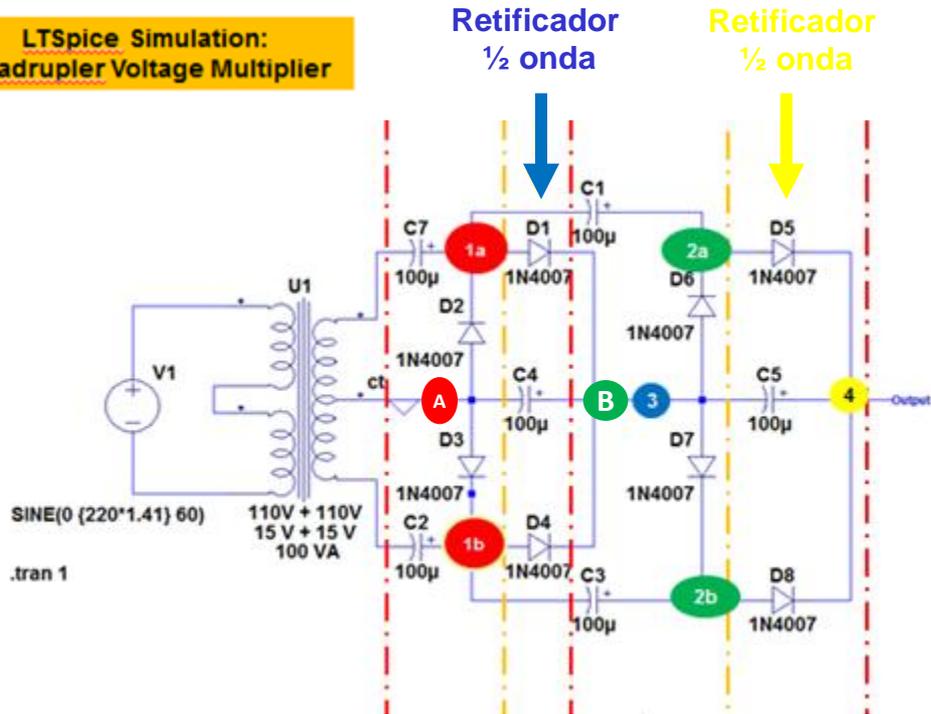
Exercício:

LTSpice Simulation: Quadrupler Voltage Multiplier



Exercício:

LTSpice Simulation:
Quadrupler Voltage Multiplier



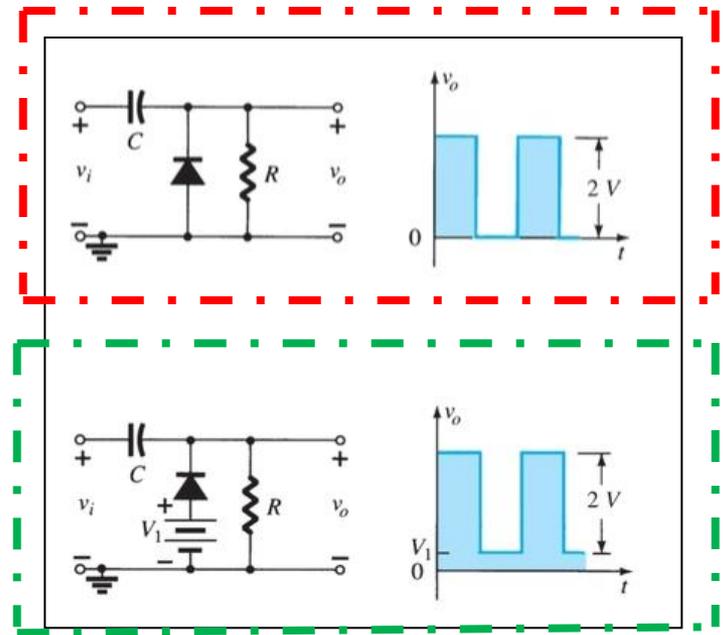
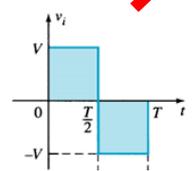
- A terra
- B sinal DC

↑

↑

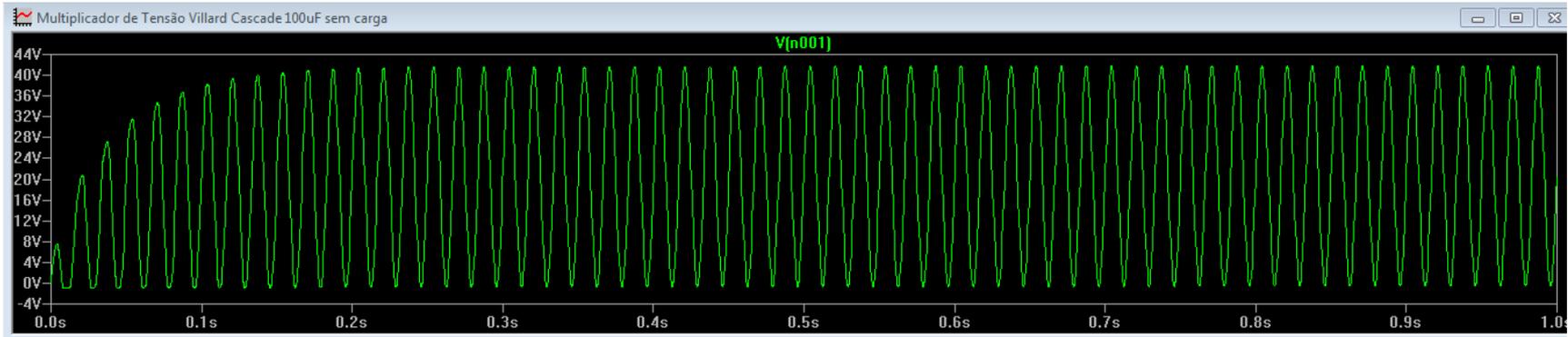
Grampeador

Grampeador Polarizado

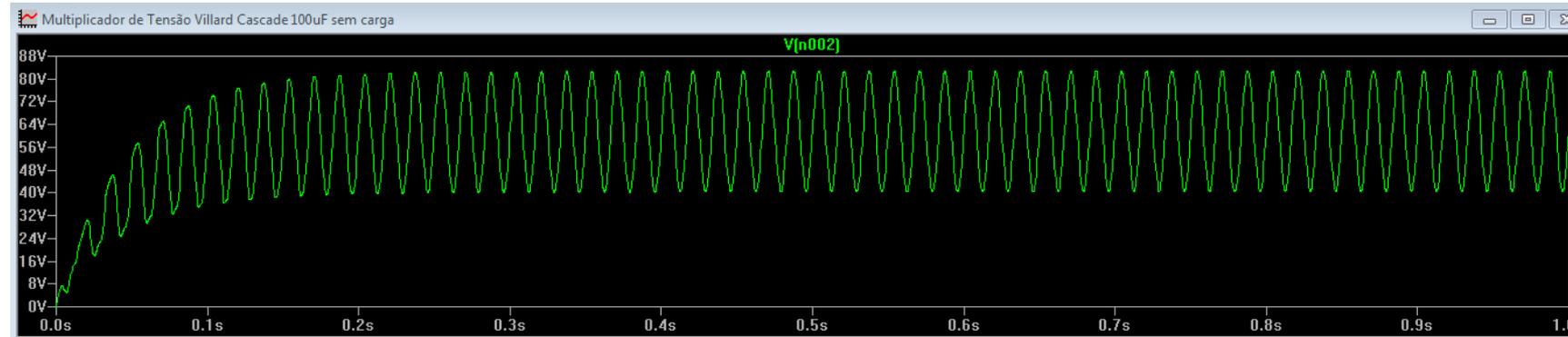


Exercício:

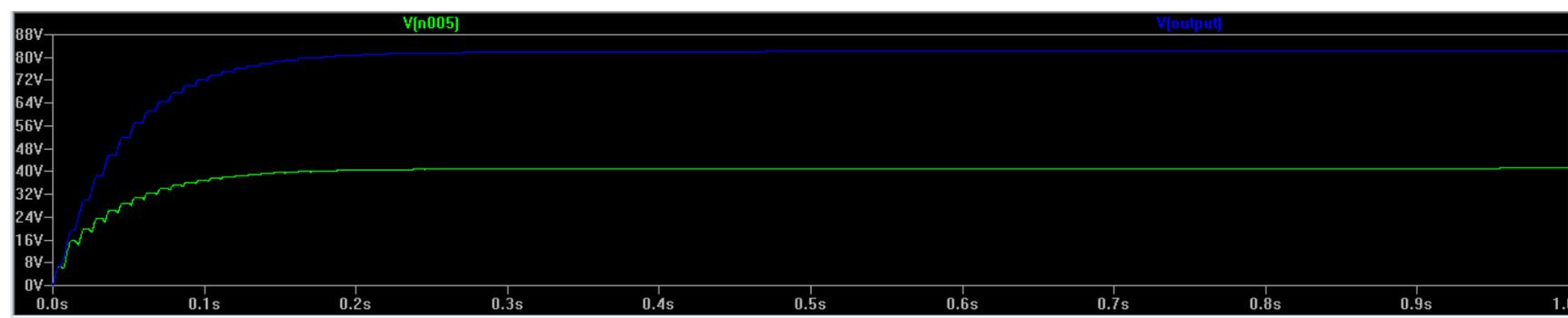
LTSpice Simulation: Quadrupler Voltage Multiplier



1a



2a



4

3

Other Types of Diodes

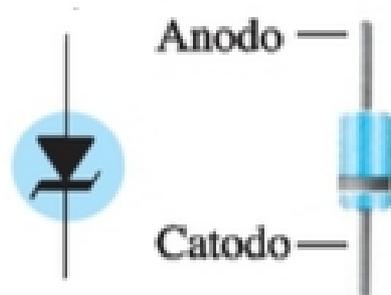
There are several types of diodes besides the standard p - n junction diode. Three of the more common are:

Zener diodes

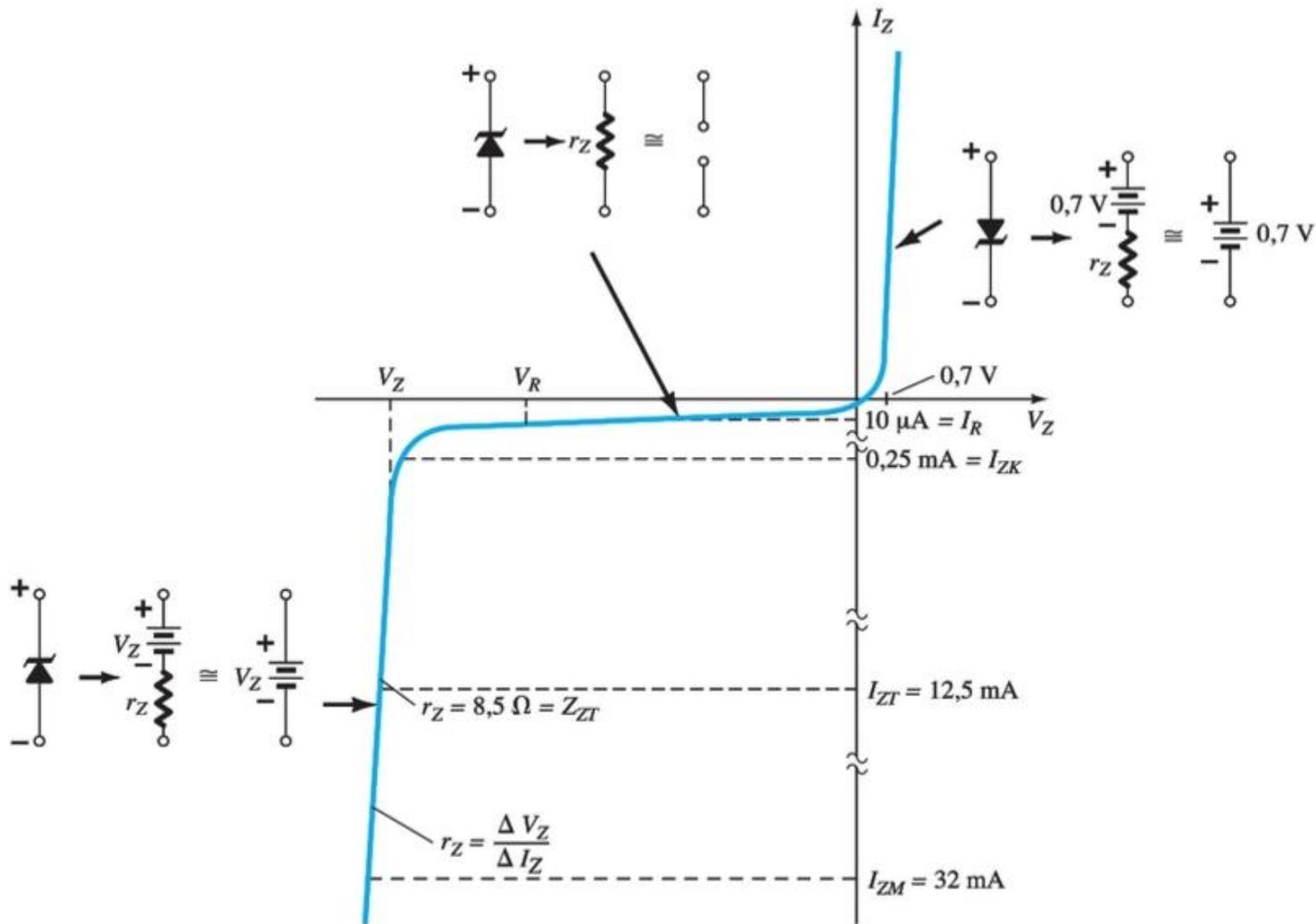
Light-emitting diodes

Diode arrays

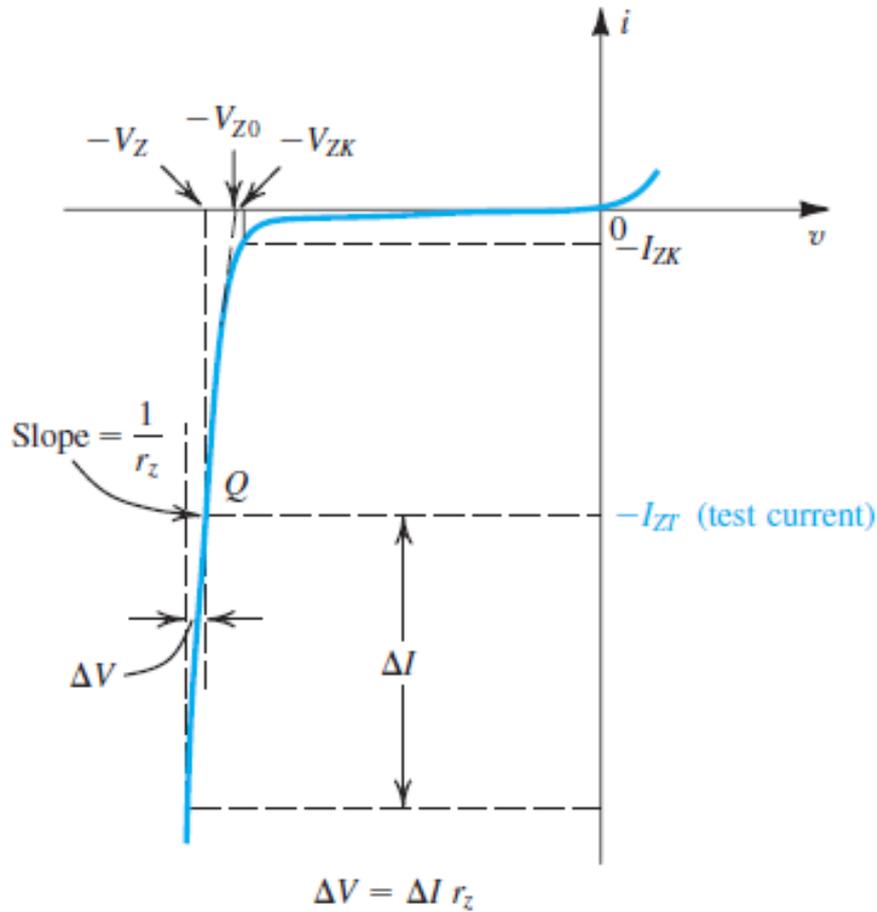
Zener Diode



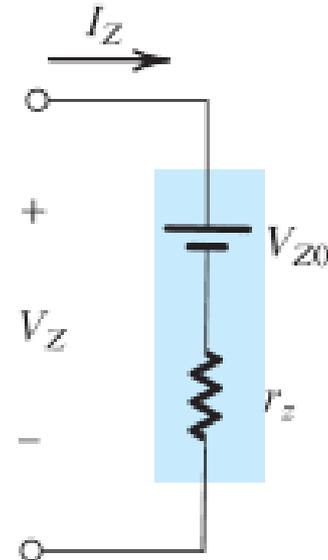
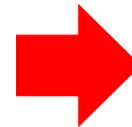
Zener Diodes



Modelo para Zener



r_z - resistência incremental ou dinâmica



$$V_Z = V_{Z0} + r_z I_Z$$

$$(I_Z > I_{ZK} \text{ e } V_Z > V_{Z0})$$

Zener Diodes

Zener diodes are available haven zener potential of 1.8V to 200V with power ratings from 1/4W to 50W. Silicon is the preferred material.

Example:

Electrical characteristics - 10V, 500mW, 20% zener diode

Tensão Zener nominal V_z (V)	Corrente de teste I_{ZT} (mA)	Máxima impedância dinâmica Z_{ZT} no I_{ZT} (Ω)	Máxima impedância de joelho Z_{ZK} (Ω) no I_{ZK} (mA)	Máxima corrente reversa I_R no V_R (μ A)	Tensão de teste V_R (V)	Corrente máxima do regulador I_{ZM} (mA)	Coefficiente de temperatura típico ($\%/^{\circ}$ C)	
10	12,5	8,5	700	0,25	10	7,2	32	+0,072

T_1 é o novo valor da temperatura

T_0 é a temperatura ambiente em um gabinete fechado (25 °C)

T_C é o coeficiente de temperatura

V_Z é o potencial Zener nominal a 25 °C

$$T_C = \frac{\Delta V_Z / V_Z}{T_1 - T_0}$$

Zener Diodes

Zener diodes are available have zener potential of 1.8V to 200V with power ratings from 1/4W to 50W. Silicon is the preferred material

Example:

Analyze the 10V zener diode described if the temperature is increased to 100°C.

$$T_C = \frac{\Delta V_Z / V_Z}{T_1 - T_0}$$



$$\begin{aligned}\Delta V_Z &= \frac{T_C V_Z}{100\%} (T_1 - T_0) \\ &= \frac{(0,072\% / ^\circ\text{C})(10 \text{ V})}{100\%} (100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})\end{aligned}$$

$$\Delta V_Z = 0,54 \text{ V}$$

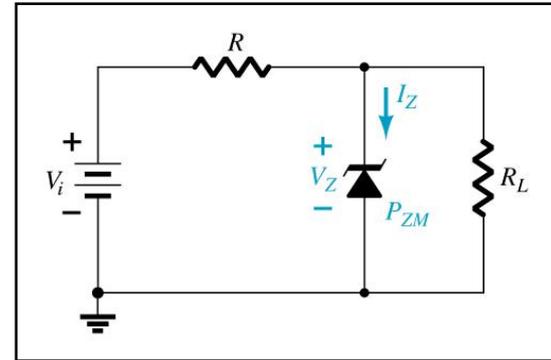


$$V_Z' = V_Z + 0,54 \text{ V} = 10,54 \text{ V}$$

Zener Diodes

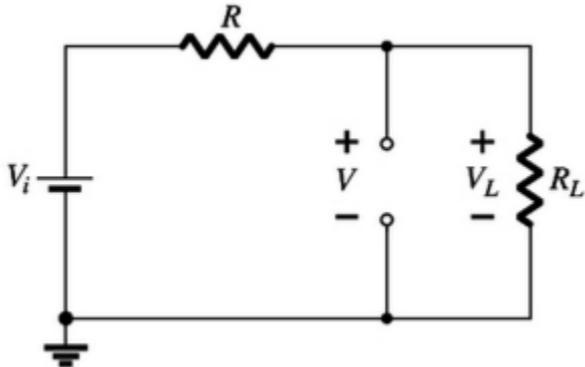
V_i and R_L fixed

O circuito mais simples que utiliza diodo Zener aparece na Figura . A tensão cc aplicada é fixa, assim como o resistor de carga. A análise pode ser fundamentalmente dividida em duas etapas.



1. Determine o estado do diodo Zener, removendo-o do circuito e calculando a tensão através do circuito aberto resultante.

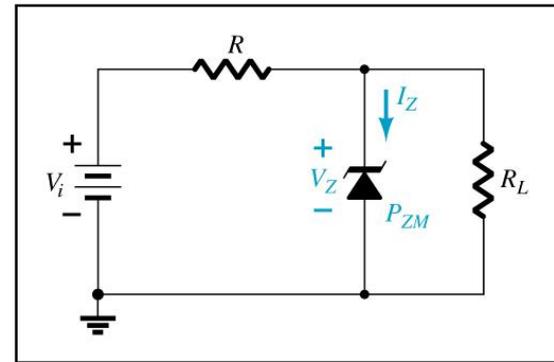
Aplicando-se o passo 1 ao circuito da Figura tem-se o circuito da Figura abaixo onde uma aplicação da regra do divisor de tensão resultará em:



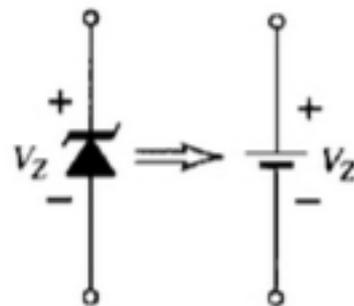
$$V = V_L = \frac{R_L V_i}{R + R_L}$$

Zener Diodes

V_Z and R_Z fixed

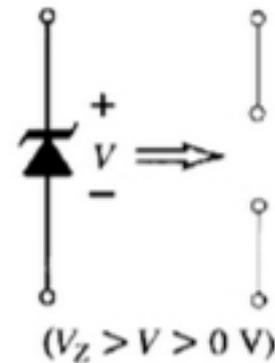


Se $V \geq V_Z$, o diodo Zener está 'ligado' e o modelo equivalente da Figura (a) pode ser substituído. Se $V < V_Z$, o diodo está 'desligado' e o circuito aberto equivalente da Figura (b) é substituído.



"on"

(a)



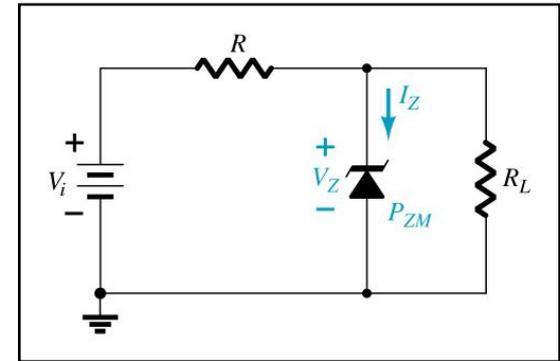
$(V_Z > V > 0 \text{ V})$

"off"

(b)

Zener Diodes

V_i and R_L fixed



2. *Substitua o circuito equivalente apropriado e determine as variáveis desejadas.*

$$V_L = V_Z$$

A corrente no diodo Zener deve ser determinada aplicando-se a lei de Kirchhoff para correntes. Ou seja:

$$I_R = I_Z + I_L$$

$$I_Z = I_R - I_L$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L}$$

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_i - V_L}{R}$$

$$P_Z = V_Z I_Z$$

que deve ser menor do que a P_{ZM} especificada para o dispositivo.

Zener Diodes

Exemplo:

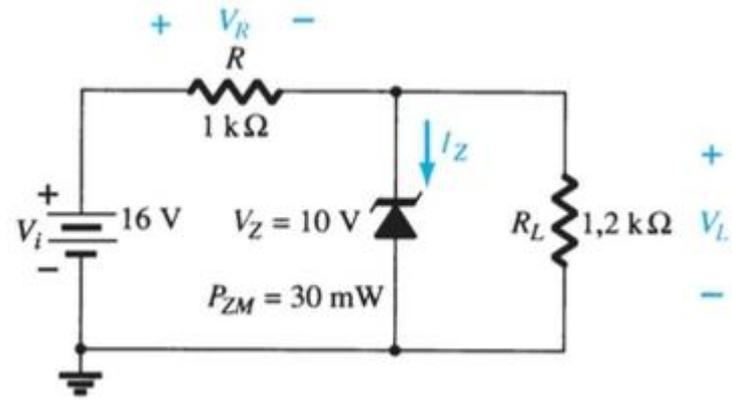
a) In the showed circuit determine V_L , V_R , I_Z , P_{Zi} if $R_L = 1.2\text{k}\Omega$

b) Repeat part a) with $R_L = 3\text{k}\Omega$

■ $V_L = V$

$$V = \frac{R_L V_i}{R + R_L} = \frac{1,2\text{ k}\Omega (16\text{ V})}{1\text{ k}\Omega + 1,2\text{ k}\Omega} = 8,73\text{ V}$$

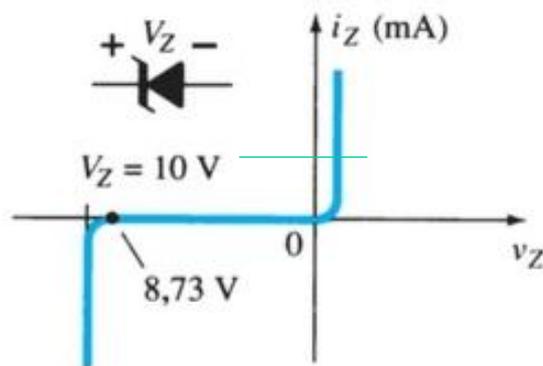
Since $V = 8.73\text{V}$ is less than 10V ,
the diode is off.



■ $V_R = V_i - V_L = 16\text{ V} - 8,73\text{ V} = 7,27\text{ V}$

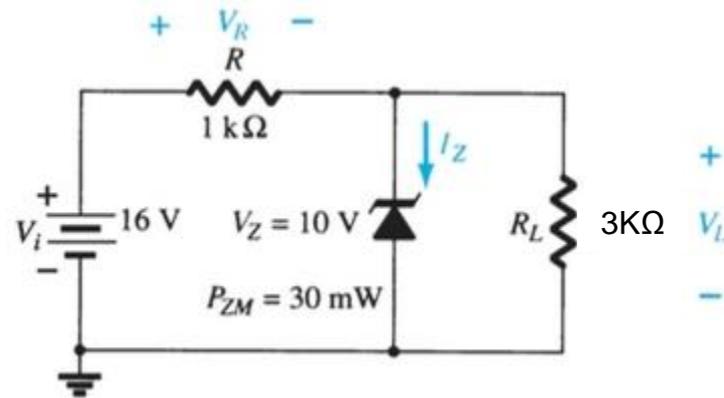
■ $I_Z = 0\text{ A}$

■ $P_Z = V_Z I_Z = V_Z (0\text{ A}) = 0\text{ W}$



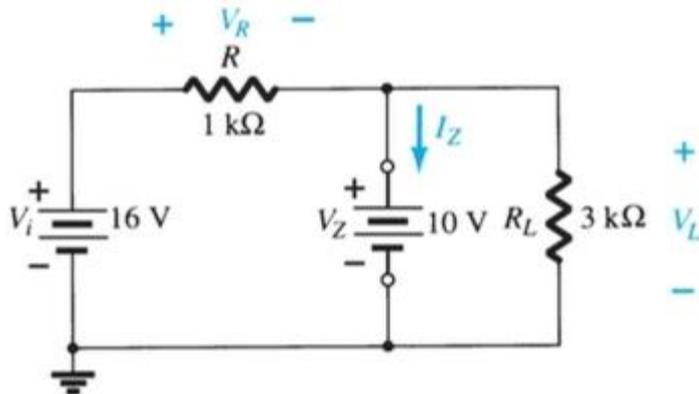
Zener Diodes

b) Determine V_L , V_R , I_Z , P_{Zi} if $R_L = 3\text{k}\Omega$



$$V = \frac{R_L V_i}{R + R_L} = \frac{3\text{ k}\Omega (16\text{ V})}{1\text{ k}\Omega + 3\text{ k}\Omega} = 12\text{ V}$$

Since 12V is greater than 10V, **the diode is on**



$$V_L = V_Z = 10\text{ V}$$

$$V_R = V_i - V_L = 16\text{ V} - 10\text{ V} = 6\text{ V}$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{10\text{ V}}{3\text{ k}\Omega} = 3,33\text{ mA}$$

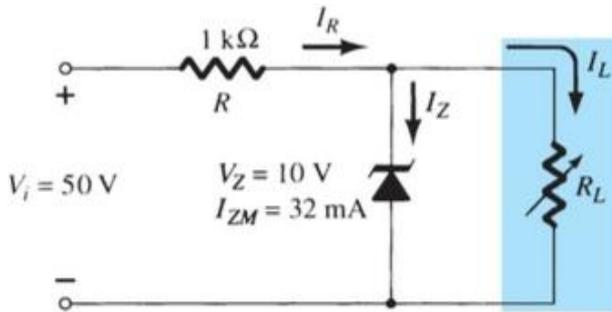
$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{6\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 6\text{ mA}$$

$$I_Z = I_R - I_L = 2,67\text{ mA}$$

$$P_Z = V_Z I_Z = (10\text{ V})(2,67\text{ mA}) = 26,7\text{ mW}$$

Zener Diodes

Fixed V_i / Variable R_L
(values to turn on the diode)



Devido à tensão V_Z , há uma faixa específica de valores de resistor (e, portanto, corrente de carga) que garantirá que o Zener esteja no estado 'ligado'. Uma resistência de carga R_L muito pequena resultará em uma tensão V_L através da resistência de carga que será menor do que V_Z , fazendo com que o diodo Zener esteja no estado 'desligado'.

R_{Lmin}

Para se determinar R_L mínima que ligará o diodo, calcula-se o valor de R_L que resulta em uma tensão $V_L = V_Z$

$$V_L = V_Z = \frac{R_L V_i}{R_L + R}$$

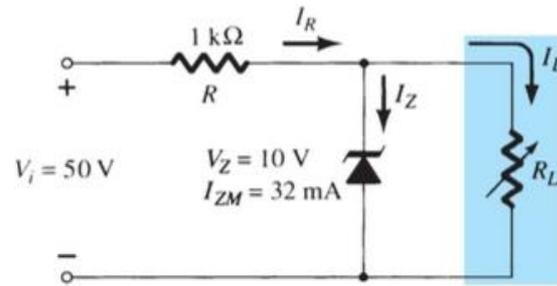


$$R_{Lmin} = \frac{R V_Z}{V_i - V_Z}$$

[1]

Zener Diodes

Fixed V_i / Variable R_L
(values to turn on the diode)



$R_{L\text{máx}}$

Qualquer valor de $R_L > R_{L\text{min}}$ garantirá que o diodo esteja “ligado” e possa ser substituído por sua fonte V_Z equivalente. Calcula-se então $I_{L\text{min}}$:

$$V_R = V_I - V_Z \quad \longrightarrow \quad I_R = \frac{V_R}{R} \quad \longrightarrow \quad I_{L\text{min}} = I_R - I_{ZM}$$

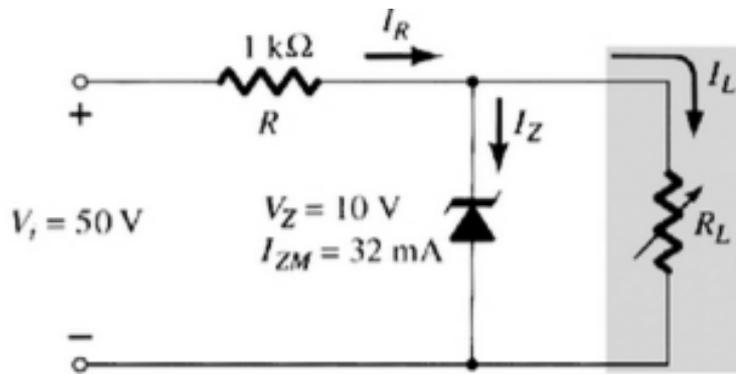
$$\longrightarrow \quad R_{L\text{máx}} = \frac{V_Z}{I_{L\text{min}}}$$

$P_{\text{máx}}$

$$P_{\text{máx}} = V_Z I_{ZM}$$

Zener Diodes

Example: Determine V_R and I_L that will result in V_{RL} being measured at 10V. Plot $V_L \times R_L$ and $V_L \times I_L$.



$$\begin{aligned}
 R_{L_{\min}} &= \frac{RV_Z}{V_i - V_Z} \\
 &= \frac{(1 \text{ k}\Omega)(10 \text{ V})}{50 \text{ V} - 10 \text{ V}} \\
 &= \frac{10 \text{ k}\Omega}{40} = \mathbf{250 \Omega}
 \end{aligned}$$

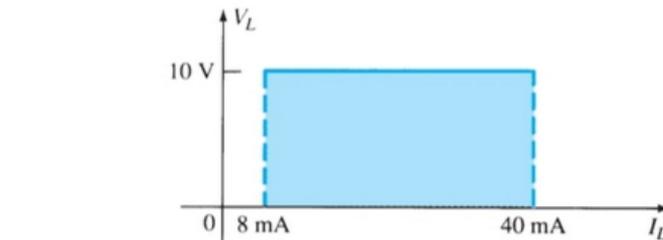
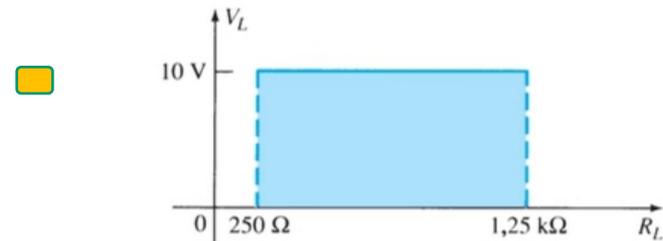
$$V_R = V_i - V_Z = 50 \text{ V} - 10 \text{ V} = \mathbf{40 \text{ V}}$$

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{40 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = \mathbf{40 \text{ mA}}$$

$$\begin{aligned}
 I_{L_{\min}} &= I_R - I_{ZM} \\
 &= 40 \text{ mA} - 32 \text{ mA} = \mathbf{8 \text{ mA}}
 \end{aligned}$$

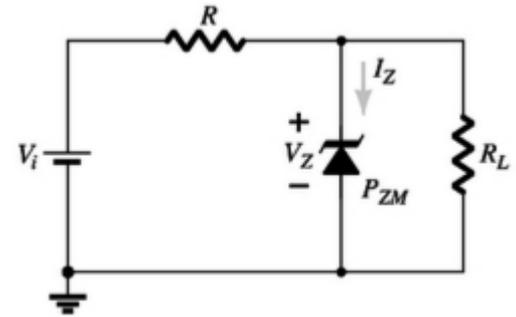
$$R_{L_{\max}} = \frac{V_Z}{I_{L_{\min}}} = \frac{10 \text{ V}}{8 \text{ mA}} = \mathbf{1,25 \text{ k}\Omega}$$

$$P_{\max} = V_Z I_{ZM} = (10 \text{ V})(32 \text{ mA}) = \mathbf{320 \text{ mW}}$$



Zener Diodes

Fixed R_L / variable V_i
(values to turn on the diode)



V_{imin}

Para valores fixos de R_L , a tensão V_i deve ser grande o suficiente para ligar o diodo Zener. A tensão mínima $V_i = V_{i_{mín}}$ que liga o diodo é determinada por:

$$V_L = V_Z = \frac{R_L V_i}{R_L + R}$$



$$V_{i_{mín}} = \frac{(R_L + R)V_Z}{R_L}$$

V_{imax}

O valor máximo de V_i é limitado pela corrente Zener máxima I_{ZM} . Como $I_{ZM} = I_R - I_L$:

$$I_{R_{máx}} = I_{ZM} + I_L$$

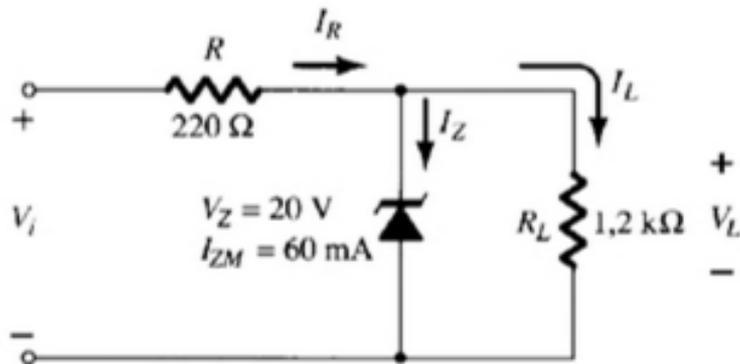


$$V_{i_{máx}} = I_{R_{máx}} R + V_Z$$

Zener Diodes

Example:

Determine the range of values of V_i that will maintain the zener diode in the “on” state. Plot $V_L \times V_i$.

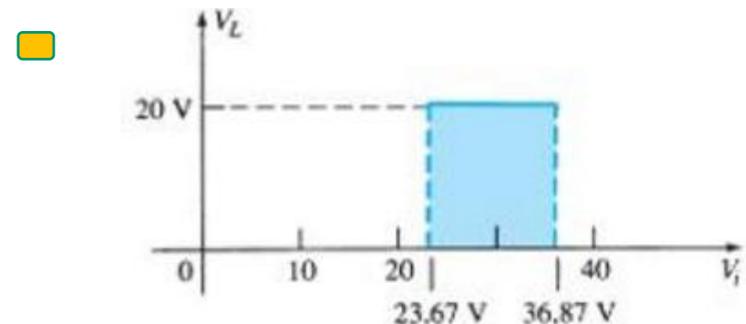


$$V_{i_{\min}} = \frac{(R_L + R)V_Z}{R_L}$$
$$= \frac{(1200 \Omega + 220 \Omega)(20 \text{ V})}{1200 \Omega} = 23,67 \text{ V}$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{20 \text{ V}}{1,2 \text{ k}\Omega} = 16,67 \text{ mA}$$

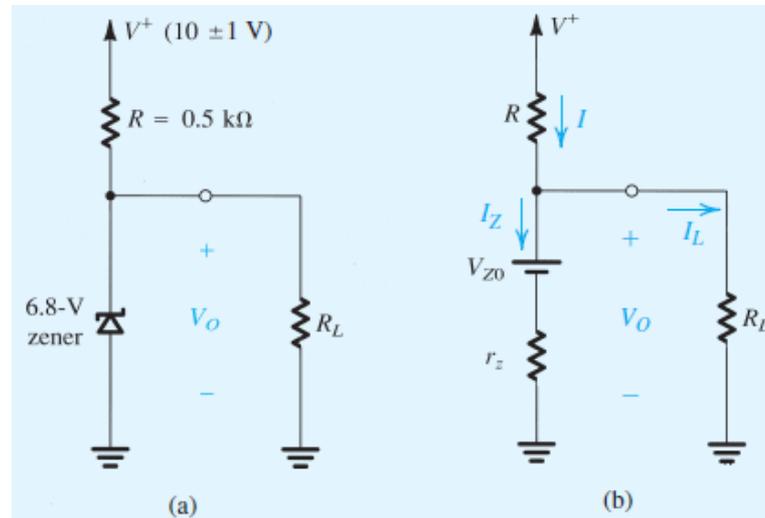
$$I_{R_{\max}} = I_{ZM} + I_L = 60 \text{ mA} + 16,67 \text{ mA}$$
$$= 76,67 \text{ mA}$$

$$V_{i_{\max}} = I_{R_{\max}} R + V_Z$$
$$= (76,67 \text{ mA})(0,22 \text{ k}\Omega) + 20 \text{ V}$$
$$= 16,87 \text{ V} + 20 \text{ V}$$
$$= 36,87 \text{ V}$$



Uso do Zener como Regulador de Tensão

The 6.8-V zener diode in the circuit of Fig. 4.19(a) is specified to have $V_Z = 6.8\text{ V}$ at $I_Z = 5\text{ mA}$, $r_z = 20\ \Omega$, and $I_{ZK} = 0.2\text{ mA}$. The supply voltage V^+ is nominally 10 V but can vary by $\pm 1\text{ V}$.



- Find V_O with no load and with V^+ at its nominal value.
- Find the change in V_O resulting from the $\pm 1\text{-V}$ change in V^+ . Note that $(\Delta V_O / \Delta V^+)$, usually expressed in mV/V , is known as **line regulation**.
- Find the change in V_O resulting from connecting a load resistance R_L that draws a current $I_L = 1\text{ mA}$, and hence find the **load regulation** $(\Delta V_O / \Delta I_L)$ in mV/mA .
- Find the change in V_O when $R_L = 2\text{ k}\Omega$.
- Find the value of V_O when $R_L = 0.5\text{ k}\Omega$.
- What is the minimum value of R_L for which the diode still operates in the breakdown region?

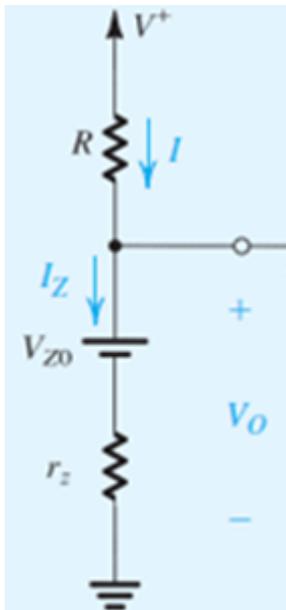
Uso do Zener como Regulador de Tensão

First we must determine the value of the parameter V_{Z0} of the zener diode model. Substituting $V_Z=6.8$ V, $I_Z = 5$ mA, and $r_z=20$ Ω in the equation below yields:

$$V_Z = V_{Z0} + r_z I_Z \longrightarrow V_{Z0} = 6.7 \text{ V}$$

a) Find V_O with no load and with V_+ at its nominal value.

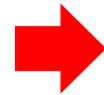
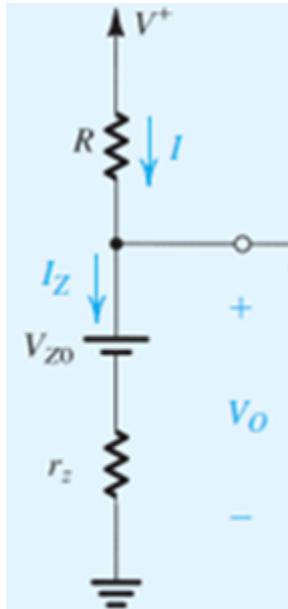
With no load connected the current through the zener is given by:



$$I_Z = I = \frac{V^+ - V_{Z0}}{R + r_z} = \frac{10 - 6.7}{0.5 + 0.02} = 6.35 \text{ mA}$$

$$V_O = V_{Z0} + I_Z r_z = 6.7 + 6.35 \times 0.02 = 6.83 \text{ V}$$

b) Find the change in V_O resulting from the $\pm 1V$ change in V^+ . Note that $(\Delta v_o / V^+)$, usually expressed in mV/V, is known as **line regulation**.



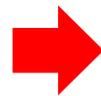
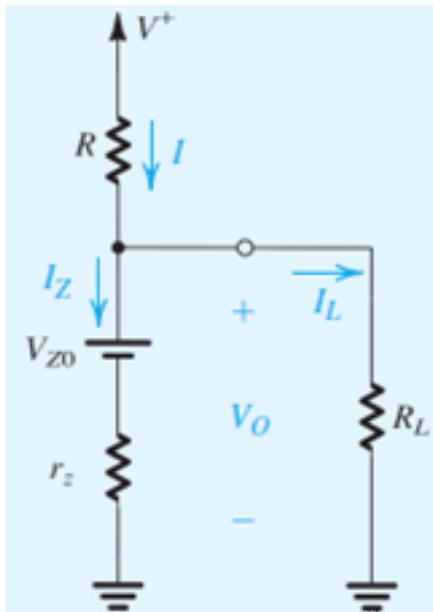
$$\Delta V_O = \Delta V^+ \frac{r_z}{R + r_z} = \pm 1 \times \frac{20}{500 + 20} = \pm 38.5 \text{ mV}$$



Line regulation = 38.5 mV/V

c) Find the change in V_O resulting from connecting a load resistance R_L that draws a current $I_L = 1$ mA, and hence find the **load regulation** ($\Delta v_o / \Delta I_L$) in mV/mA.

When a load resistance R_L that draws a load current $I_L = 1$ mA is connected, the zener current will decrease by 1 mA. The corresponding change in zener voltage can be found from:



$$\Delta V_O = r_z \Delta I_Z = 20 \times -1 = -20 \text{ mV}$$



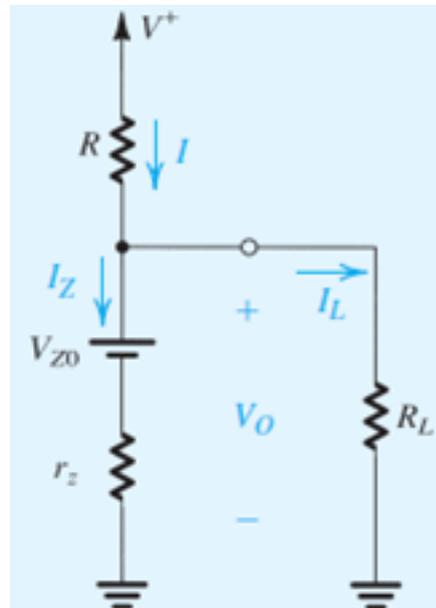
$$\text{Load regulation} \equiv \frac{\Delta V_O}{\Delta I_L} = -20 \text{ mV/mA}$$

(f) What is the minimum value of R_L for which the diode still operates in the breakdown region?

For the zener to be at the edge of the breakdown region, $I_Z = I_{ZK} = 0.2 \text{ mA}$ and $V_Z = 6,7 \times (0,2 \times 10^{-3}) \times 20 \cong 6,7 \text{ V}$. At this point the lowest (worst-case) current supplied through R is:

$$I = (9 - 6.7)/0.5 = 4.6 \text{ mA}$$

and thus the load current is $4.6 - 0.2 = 4.4 \text{ mA}$. The corresponding value of R_L is:



$$R_L = \frac{6.7}{4.4} \cong 1.5 \text{ k}\Omega$$

d) Find the change in V_O when $R_L = 2 \text{ k}\Omega$.

Since $R_L = 2 \text{ k}\Omega > 1.5 \text{ k}\Omega$, then the load voltage will be $V_O \cong 6.8\text{V}$ and the load current will be $I_L = 6.8/2\text{k} = 3.4\text{mA}$

Thus the change in Zener current will be $\Delta I_z = -3.4\text{mA}$ and the change in the zener voltage (output voltage) will be:

$$\Delta V_O = 20 \times -3.4 = -68\text{mV}$$

e) Find the value of V_O when $R_L = 0.5 \text{ k}\Omega$.

The Zener will be out of the breakdown region because $R_L = 0.5 \text{ k}\Omega < 1.5 \text{ k}\Omega$.

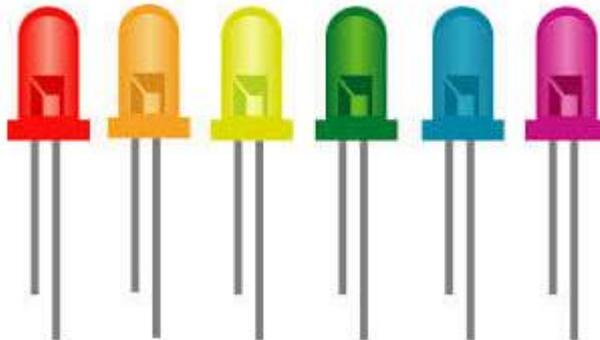
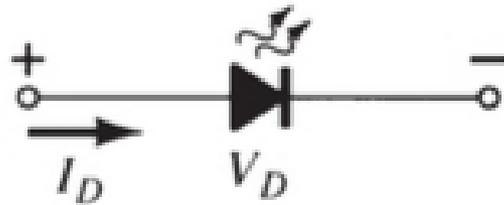
Therefore, the zener must be cut off. If this is indeed the case, then V_O is determined by the voltage divider formed by R_L and R : c

$$V_O = V^+ \frac{R_L}{R + R_L}$$



$$= 10 \frac{0.5}{0.5 + 0.5} = 5 \text{ V}$$

Light-Emitting Diode



LED

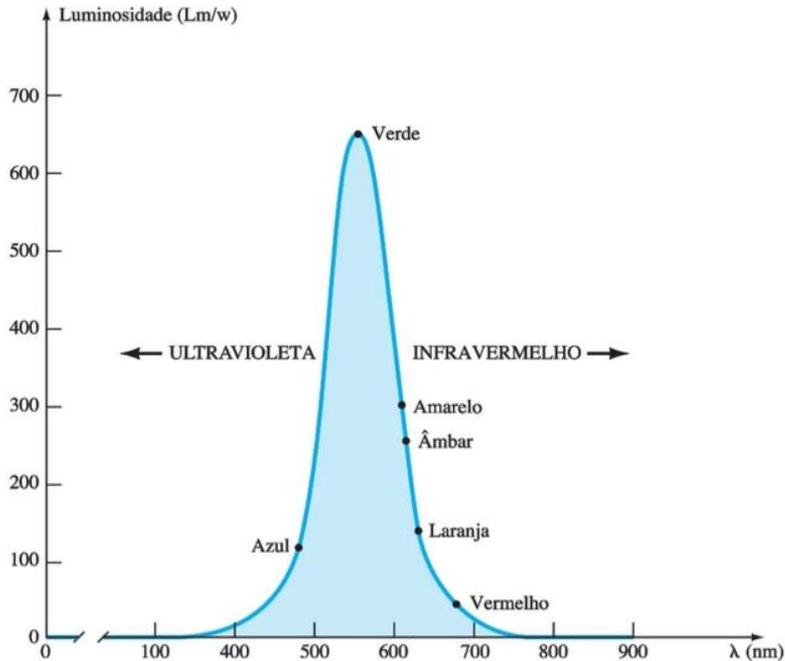
O processo de emissão de luz pela aplicação de uma fonte elétrica de energia é chamado de eletroluminescência.

Como o nome indica, o diodo emissor de luz (LED) é um diodo que emite luz visível quando energizado. Em qualquer junção $p-n$ polarizada diretamente, existe, dentro da estrutura e principalmente próximo da junção, uma recombinação de lacunas e elétrons. Essa recombinação exige que a energia do elétron livre não-ligado seja transferida para outro estado. Em todas as junções $p-n$ do semicondutor, uma parte dessa energia será emitida na forma de calor e outra parte, na forma de fótons. No silício e no germânio, a maior parte é emitida na forma de calor e a luz emitida é insignificante. Em outros materiais, como o fosfeto de arsenieto de gálio (GaAsP) ou o fosfeto de gálio (GaP), o número de fótons da energia luminosa é suficiente para criar uma fonte de luz bastante visível.

LED

The two type structures that emit light when properly biased are the LED and LCD.

In Si and Ge diodes the greater percentage of the energy during recombination at the junction is dissipated in the form of heat within the structured and the light is insignificant. For this reason, silicon and germanium are not used in the construction of LED devices.

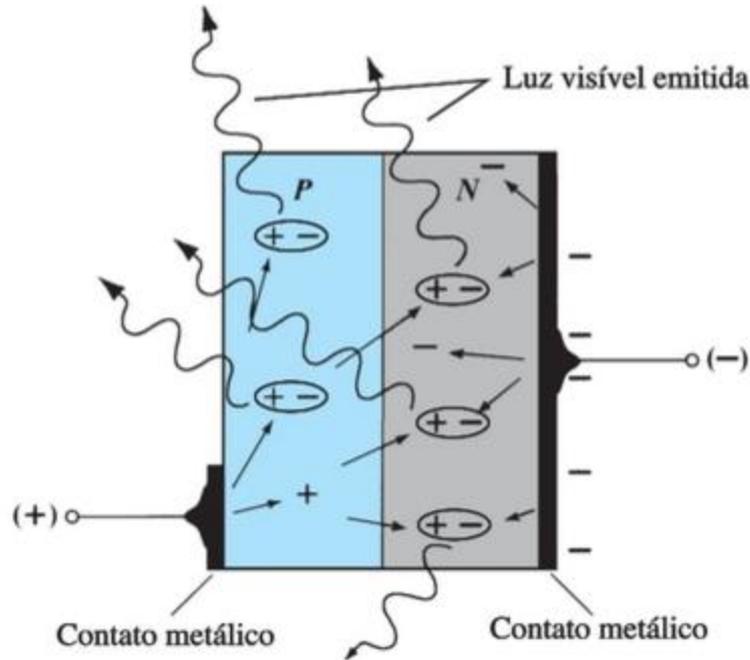


Ligh-emiting diodes

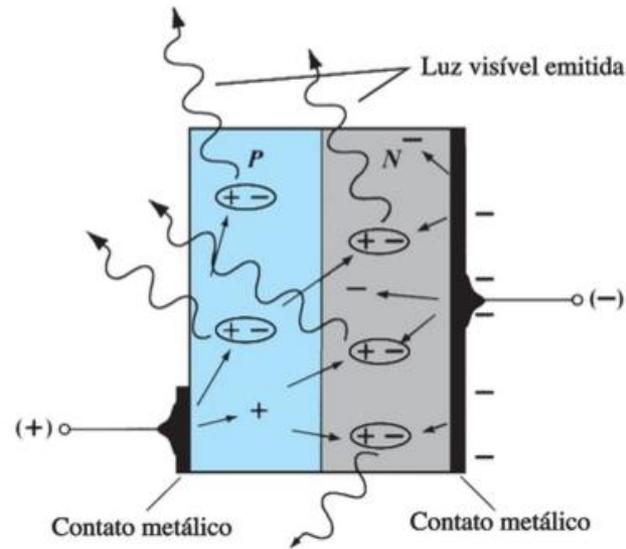
Cor	Construção	Tensão direta comum (V)
Âmbar	AllnGaP	2,1
Azul	GaN	5,0
Verde	GaP	2,2
Laranja	GaAsP	2,0
Vermelho	GaAsP	1,8
Branco	GaN	4,1
Amarelo	AllnGaP	2,1

LED

Infrared LEDs have numerous applications where visible light is not a desirable effect: home entertainment centers (remote control), optical coupling, garage door openers,



LED



■ The external metallic conducting surface connected to the p-type material is smaller to permit the emergence of the maximum number of photons of light energy when the device is forward-biased.

■ The recombination of the injected carriers due to the forward-biased junction results in emitted light as the site of recombination.

LED

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{m})$$

$c = 3 \times 10^8$ m/s (a velocidade da luz no vácuo)

f = frequência em Hertz

λ = comprimento de onda em metros

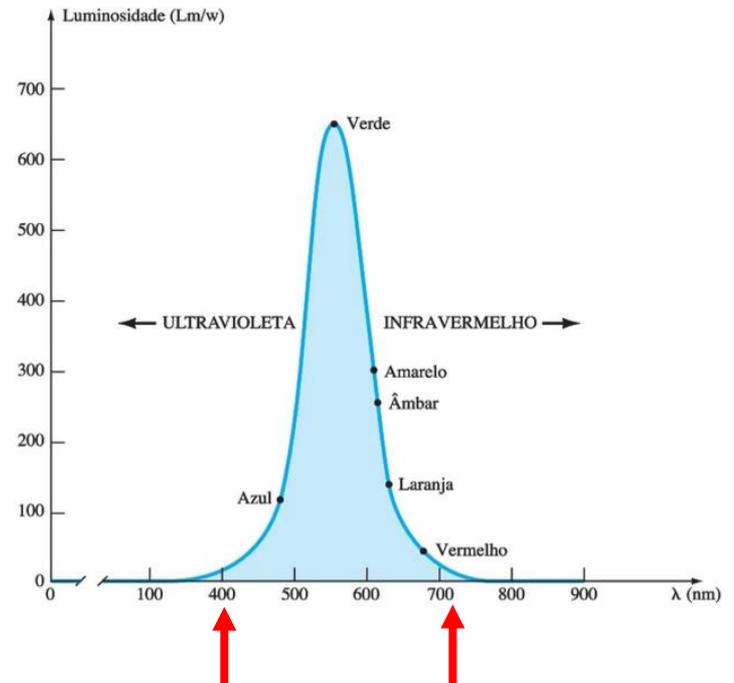
Example 1:

The frequency spectrum for infrared light extends for about 100THz to 400 THz. The visible light spectrum extends from 400THz to 750THz. Find the range of wavelength for the frequency range of the visible light.

$$c = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \left[\frac{10^9 \text{ nm}}{\text{m}} \right] = 3 \times 10^{17} \text{ nm/s}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^{17} \text{ nm/s}}{400 \text{ THz}} = \frac{3 \times 10^{17} \text{ nm/s}}{400 \times 10^{12} \text{ Hz}} = 750 \text{ nm}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^{17} \text{ nm/s}}{750 \text{ THz}} = \frac{3 \times 10^{17} \text{ nm/s}}{750 \times 10^{12} \text{ Hz}} = 400 \text{ nm}$$



LED

■ GaAs with its higher energy gap of 1.43eV made it suitable for electromagnetic radiation of visible light. Si at 1.1 eV result primarily in heat dissipation on recombination.

■ The effect of this difference energy gaps can be explained by realizing that to move an electron from one discrete energy level to another requires a specific amount of energy:

$$E_g = \frac{hc}{\lambda}$$

E_g = joules (J) [1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ J]

h = constante de Planck = $6,626 \times 10^{-34}$ J · s.

c = 3×10^8 m/s

λ = comprimento de onda em metros

LED

Example 2:

If we substitute the energy gap level of 1.43eV for GaAs into the equation, we obtain:

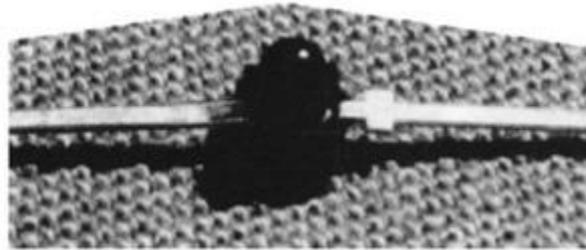
$$1,43 \text{ eV} \left[\frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right] = 2,288 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} = \frac{(6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{2,288 \times 10^{-19} \text{ J}} \\ = 869 \text{ nm}$$

- For Si with $E_g=1.1\text{eV}$ the $\lambda=1130\text{nm}$ is beyond the visible light.
- The GaAs is typically used in infrared devices.
- GaAsP with a band gap of 1.9eV (654nm) is in the center of red zone and is an excellent compound semiconductor for LED production.

LED

As características do led miniature da HP abaixo de alta eficiência são mostrados nas figuras a seguir.



Na fig. 1 observa-se que a corrente direta máxima é de 60 mA e 20mA é o valor típico de operação.

Fig. 1

Especificações máximas absolutas a $T_A = 25^\circ\text{C}$		
<i>Parâmetro</i>	<i>Vermelho de alta eficiência 4160</i>	<i>Unidades</i>
Dissipação de energia	120	mW
Corrente média direta	20 ⁽¹⁾	mA
Corrente de pico direta	60	mA
Faixa de temperatura de operação e armazenamento	-55°C a 100°C	
Temperatura de solda dos terminais [1,6 mm (0,063 polegadas) do corpo]	230°C por 3 segundos	

(1) Reduz a partir de 50°C a 0,2 mV/°C

Nas condições de teste indicadas na Fig. 2 a corrente direta é de 10 mA. O valor V_D sob condições de polarização direta aparece como V_F e se estende de 2,2 V à 3V.

Características elétricas/ópticas a $T_A = 25^\circ\text{C}$						
Símbolo	Descrição	Vermelho de alta eficiência 4160			Unidades	Condições de teste
		Mín.	Típico	Máx.		
I_V	Intensidade luminosa axial	1,0	3,0		mcd	$I_F = 10 \text{ mA}$
$2\theta_{1/2}$	Ângulo incluído entre pontos de meia intensidade luminosa		80		deg.	Nota 1
λ_{pico}	Comprimento de onda de pico		635		nm	Medida durante o pico
λ_d	Comprimento de onda dominante		628		nm	Nota 2
τ_s	Velocidade de resposta		90		ns	
C	Capacitância		11		pF	$V_F = 0; f = 1\text{Mhz}$
θ_{JC}	Resistência térmica		120		$^\circ\text{C/W}$	Junção ao catodo a 0,79 mm (0,31 pol.) do corpo
V_F	Tensão direta		2,2	3,0	V	$I_F = 10 \text{ mA}$
BV_R	Tensão reversa de ruptura	5,0			V	$I_R = 100 \mu\text{A}$
η_v	Eficiência luminosa		147		l m/W	Nota 3

Notas:

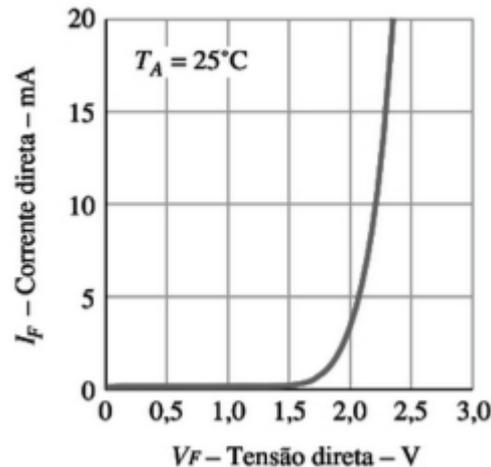
- $\theta_{1/2}$ é o ângulo no qual a intensidade luminosa é a metade da intensidade luminosa axial.
- O comprimento de onda dominante λ_d deriva do diagrama de cromaticidade CIE e representa o comprimento de onda único que define a cor da luz emitida pelo dispositivo.
- A intensidade radiante I_e em watts/esterradiano pode ser encontrada por meio da equação $I_e = I_v/\eta_v$, onde I_v é a intensidade luminosa em candelas e η_v é a eficácia luminosa em lúmens/watt.

LED

Duas quantidades são mostradas nas características elétrica/óptica em $T_A = 25^\circ\text{C}$: a **intensidade luminosa** (I_v) e a **eficiência luminosa** (η_v). A intensidade de luz é medida em candela e o fluxo de luz em lúmens.

A eficiência de um LED é a razão de lúmens gerados por watt aplicado de energia elétrica.

Por ser um dispositivo de junção p-n o LED apresenta uma curva característica para polarização direta semelhante às curvas de resposta de diodo, conforme Fig. 5



LED

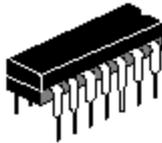
A introdução do LED branco permitiu a substituição de lâmpadas incandescente e fluorescentes com tempo de vida que excedem 25.000 horas. Recentemente LEDs são uma escolha comum para luzes de flashes e faróis de automóveis. Lâmpadas com as da figura abaixo resultam em uma economia de 90% de energia quando comparada com incandescentes. Há lâmpadas de LED com formato de vela com vida de 50.000 horas com consumo de 3W.



LED branco

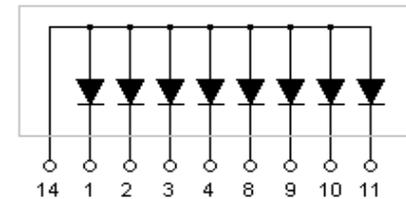
Diode Arrays

Multiple diodes can be packaged together in an integrated circuit (IC).

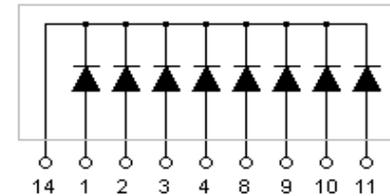


A variety of diode configurations is available.

Common Anode



Common Cathode

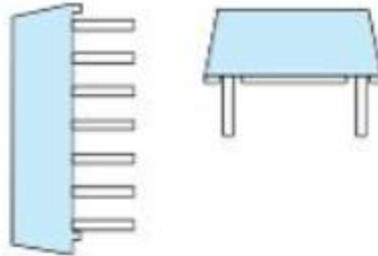
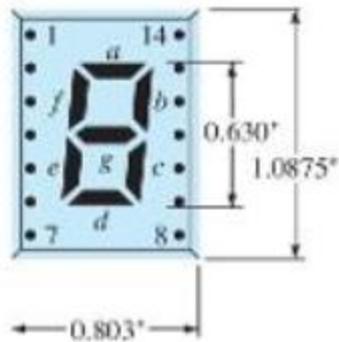


Practical Applications

Display

LED

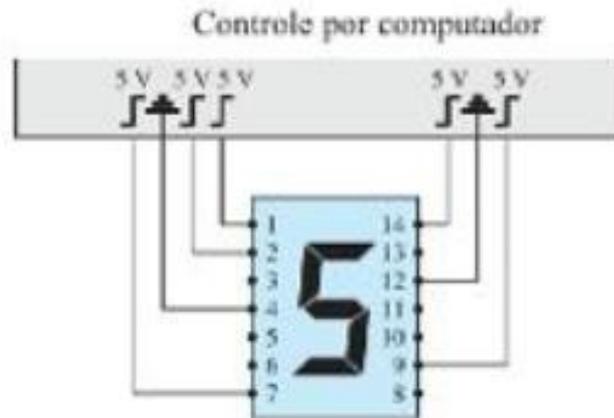
Application 1:



Catodo comum

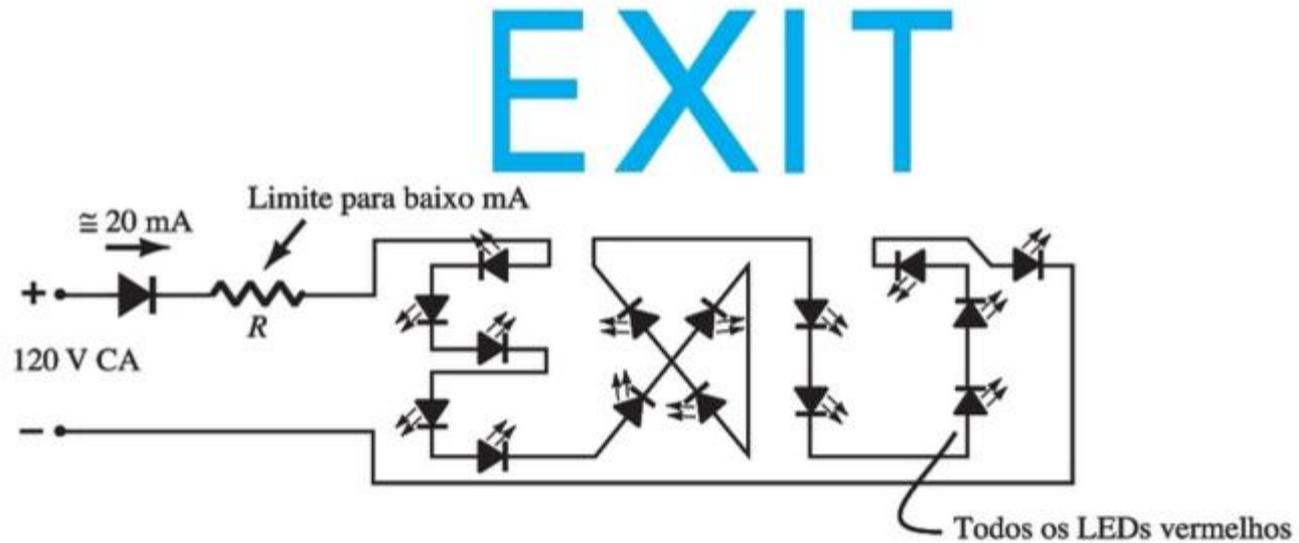
Número do pino/função

1. Anodo f
2. Anodo g
3. Sem pino
4. Catodo comum
5. Sem pino
6. Anodo e
7. Anodo d
8. Anodo c
9. Anodo b
10. Sem pino
11. Sem pino
12. Catodo comum
13. Anodo a
14. Anodo a



LED

Application 2:

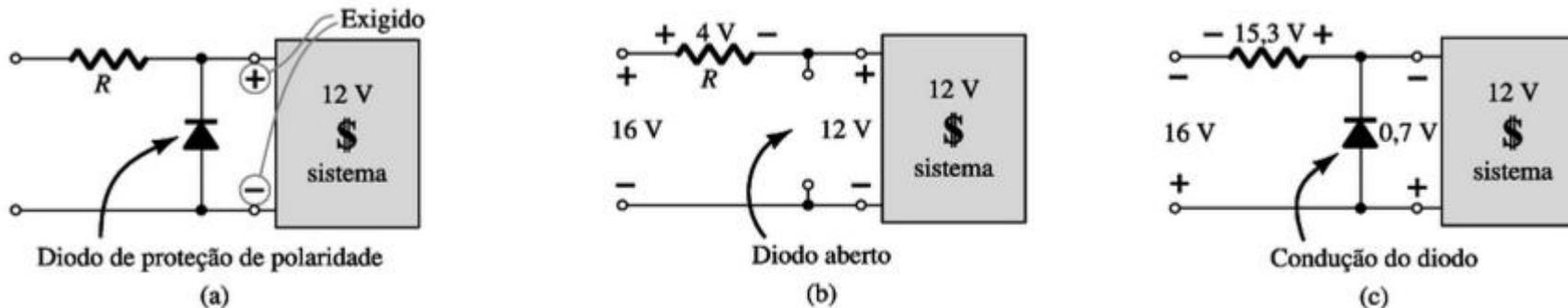


Luz de saída de emergência com LEDs

Practical Applications

Garantia de Polaridade

Garantia de Polaridade



a) Proteção de um equipamento caro e sensível ; b) polaridade corretamente aplicada; c) polaridade erradamente aplicada

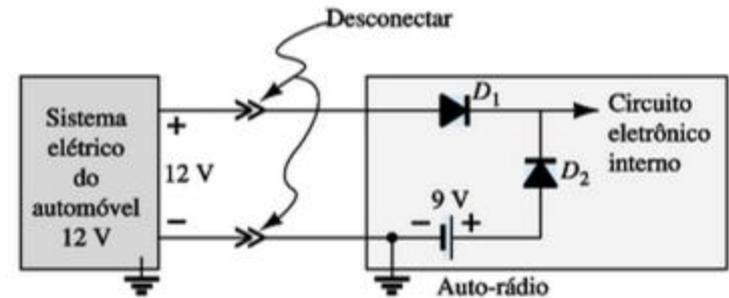
Vários sistemas são bastante sensíveis à polaridade das tensões aplicadas. Imaginemos, por exemplo, que na Figura a) existisse um equipamento bastante caro que pudesse ser danificado se sofresse a aplicação de polarização incorreta. Na Figura b) a polaridade correta é indicada à esquerda. Como resultado, o diodo sofre uma inversão de polarização, mas o sistema funciona bem; o diodo não tem efeito. No entanto, se uma polaridade errada for aplicada, como mostra a Figura c), o diodo conduzirá e garantirá que no máximo 0,7 V passem pelos terminais do sistema, protegendo-o da tensão excessiva com polaridade errada. Para qualquer polaridade, a diferença entre a tensão aplicada e da carga ou tensão do diodo aparecerá na resistência interna da fonte ou na resistência série da rede.

Practical Applications

**Sistema de Alimentação
com Bateria de Backup**

Sistema de Alimentação com Bateria de Backup

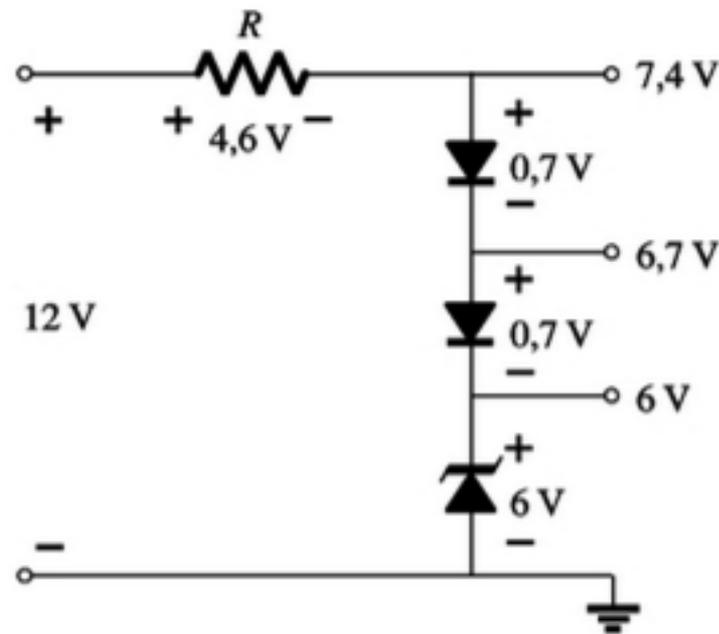
Há situações em que o sistema necessita de uma fonte de backup para garantir que funcione caso haja falta de energia. Isso se aplica especialmente a sistemas de segurança e sistemas de iluminação que precisam ser ligados nesses casos. O backup também é importante quando um computador ou rádio é desconectado da fonte ca-cc e é ligado em um sistema de energia portátil para viagem. Na Figura um rádio para automóvel de 12 V, operando sem a fonte de energia cc de 12 V, possui um sistema de bateria de backup em um pequeno compartimento na parte de trás pronto para entrar em operação e salvar a memória do relógio e das estações quando o rádio é removido. Com os 12 V disponíveis no carro, D_1 conduz e a tensão no rádio é cerca de 11,3 V. D_2 é reversamente polarizado (um circuito aberto) e a bateria de reserva de 9 V dentro do carro é desativada. Mas, quando o rádio é removido do carro, D_1 não conduzirá mais, pois a fonte de 12 V não estará mais disponível para polarizar diretamente o diodo. No entanto, D_2 será polarizado diretamente pela bateria de 9 V, e o rádio continuará a receber cerca de 8,3 V para manter a memória com os dados para o relógio e as estações.



Practical Applications

**Níveis de Referência
de Tensão**

Diodos e Zeners podem ser utilizados como níveis de referência, como mostra a Figura . O circuito, através do uso de dois diodos e de um diodo Zener, oferece três níveis diferentes de tensão.

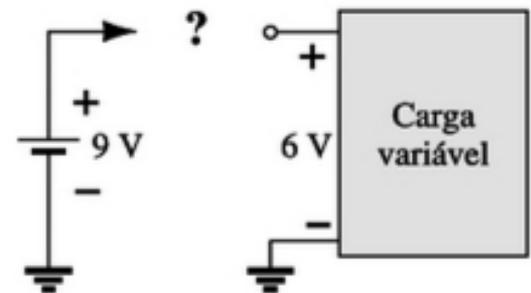


Practical Applications

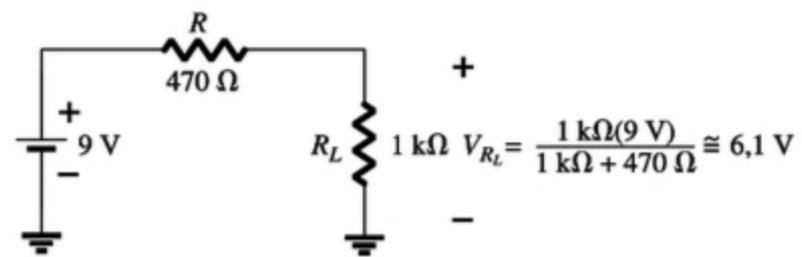
**Nível de Tensão
Independente da Corrente
de Carga**

Como exemplo que demonstra claramente a diferença entre uma resistência e um diodo em um circuito divisor de tensão, consideremos a situação da Figura a, em que uma carga requer cerca de 6 V para operar adequadamente tendo apenas uma bateria de 9 V. Imaginemos que as condições sejam tais que a carga tenha uma resistência interna de 1 kΩ. Utilizando a regra do divisor de tensão, é possível facilmente determinar que a resistência em série deve ser de 470 Ω (valor comercialmente disponível), como mostra a Figura b. O resultado é uma tensão na carga de 6,1 V, situação aceitável para a maioria das cargas de 6 V. No entanto, se as condições de operação da carga mudarem e existir então uma resistência interna de apenas 600 Ω, a tensão da carga cairá para cerca de 4,9 V e o sistema poderá não operar corretamente. Tal sensibilidade à resistência da carga pode ser eliminada conectando-se quatro diodos em série com a carga, como mostra a Figura c.

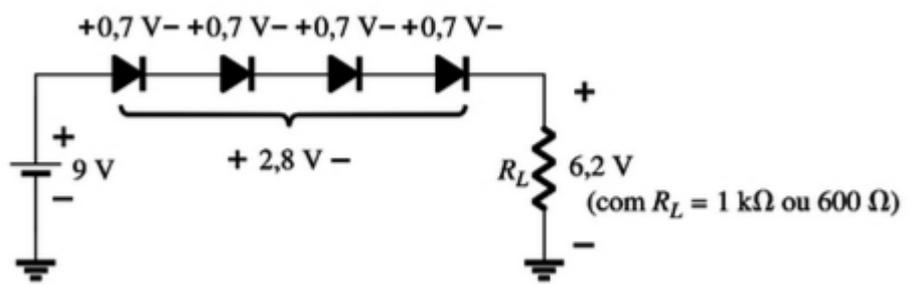
Quando os quatro diodos conduzirem, a tensão de carga será de 6,2 V — independentemente da impedância (dentro dos limites do dispositivo, é claro). A sensibilidade da tensão às características da carga foi removida.



(a)



(b)



(c)

Conversores AC - DC

