

ET65A – Eletrônica A

Modelo exponencial do diodo

- O modelo mais exato para representar o diodo é derivado das características físicas dos semicondutores
- Modelo apresentado em [Sedra, Smith – Microeletrônica 5^aed.]
- Simplificadamente:

$$i_D = I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

$$i_D = I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

- i_D → Corrente no diodo
- v_D → Tensão no diodo
- I_S → Corrente de escala do diodo (Específico para cada diodo)
- V_T → Tensão térmica

- k = Constante de Boltzmann
- T = Temperatura em kelvin
- q = Carga fundamental do elétron

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

Em temperatura ambiente:
 $V_T \approx 25\text{mV}$

Diodo do exemplo 2

- Podemos encontrar a curva exponencial do diodo do exemplo 2 utilizando as medidas apresentadas
- Como as medidas apresentam erro, vamos trabalhar com o valor médio entre as correntes de escala obtidas para este exemplo

$$i_D = I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$
$$4,236mA = I_S e^{\frac{765mV}{25mV}} \rightarrow I_s = 2,175 \cdot 10^{-16}$$
$$6,206mA = I_S e^{\frac{774mV}{25mV}} \rightarrow I_s = 2,235 \cdot 10^{-16}$$

$$I_s = 2,2 \cdot 10^{-16} A$$

Modelo exponencial

- Com o modelo exponencial é possível mostrar o comportamento exato do diodo, em qualquer ponto de operação
- Podemos usar a equação inversa caso convenha:

$$v_D = V_T \ln\left(\frac{i_D}{I_S}\right)$$

Exemplo

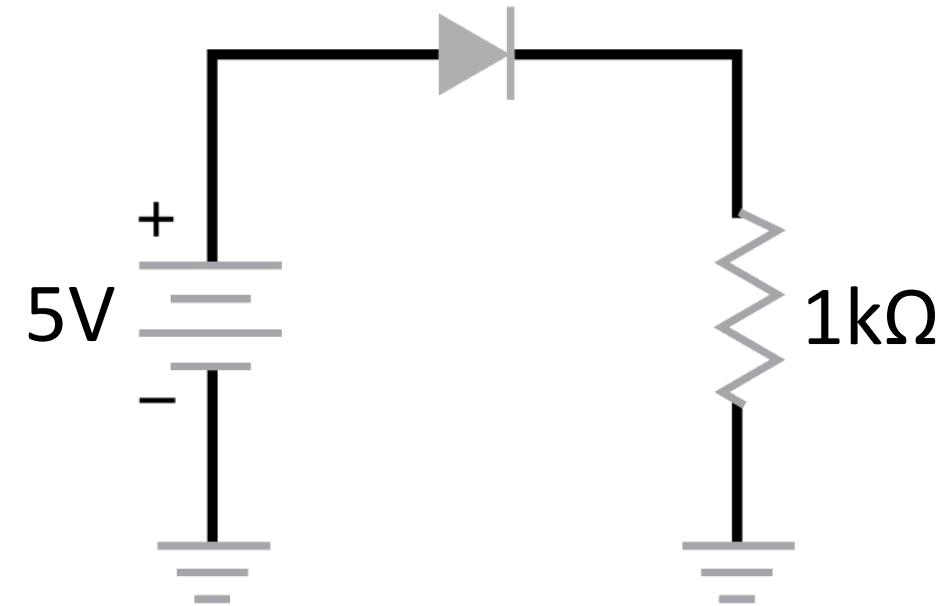
- Calcule a queda de tensão de um diodo com $I_s=1E-12A$ para as correntes:
 - A) 10mA
 - B) 40mA
 - C) 1A

Exemplo

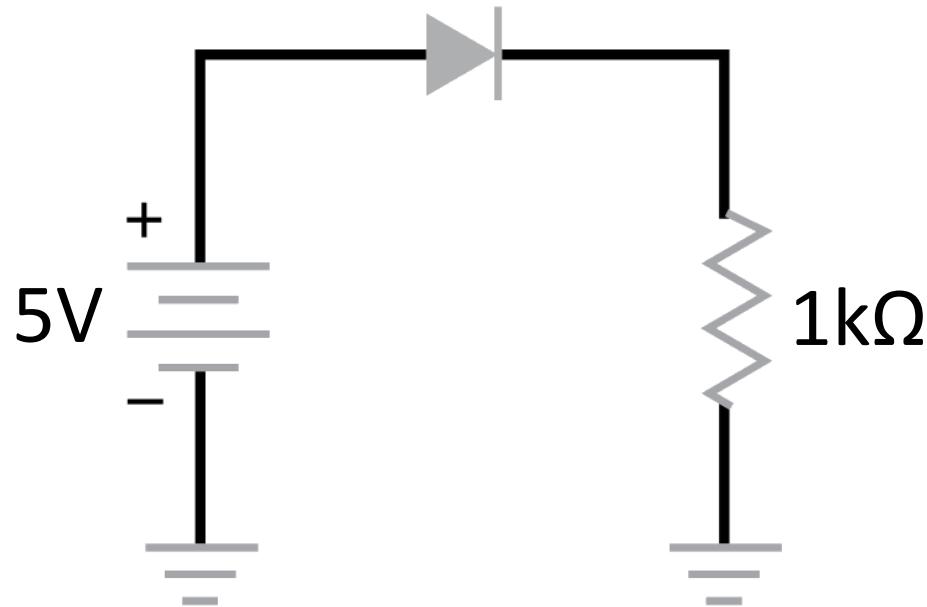
- Calcule a queda de tensão de um diodo com $I_s=1E-12A$ para as correntes:
 - A) 10mA $\rightarrow v_D=575mV$
 - B) 40mA $\rightarrow v_D=610mV$
 - C) 1A $\rightarrow v_D=690mV$

Aplicação em circuito

- Apesar de muito exato, o modelo exponencial é mais complexo e trabalhoso para a análise de circuitos
- A análise exige processo iterativo
- Vamos analisar o exemplo aplicando um diodo com $I_s = 4E-15$

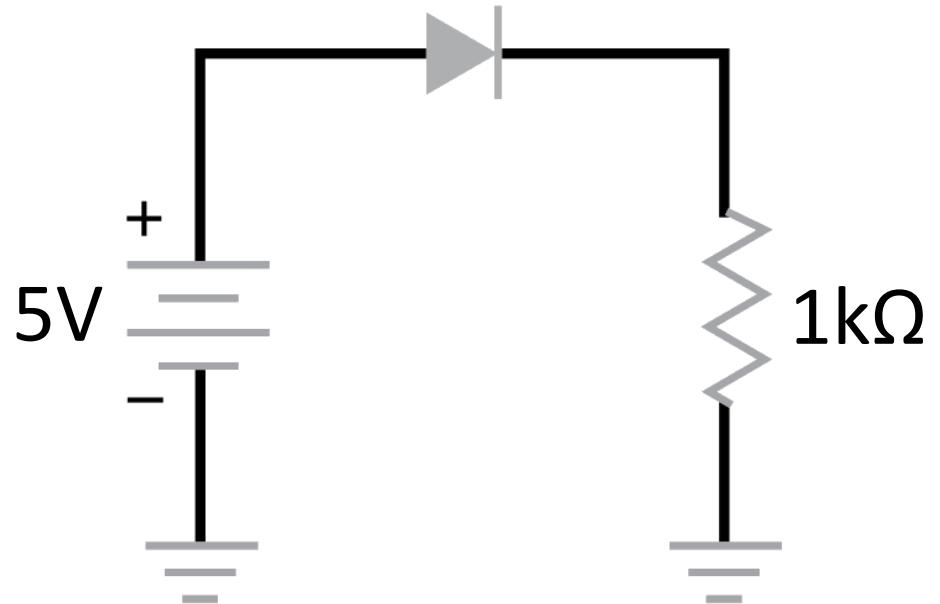


- Como não temos informações exatas sobre o estado do diodo, vamos supor que a queda de tensão seja 0,7V e calcular a corrente no circuito



$$(5V - 0,7V) / 1k = 4,3mA$$

- Como não temos informações exatas sobre o estado do diodo, vamos supor que a queda de tensão seja 0,7V e calcular a corrente no circuito

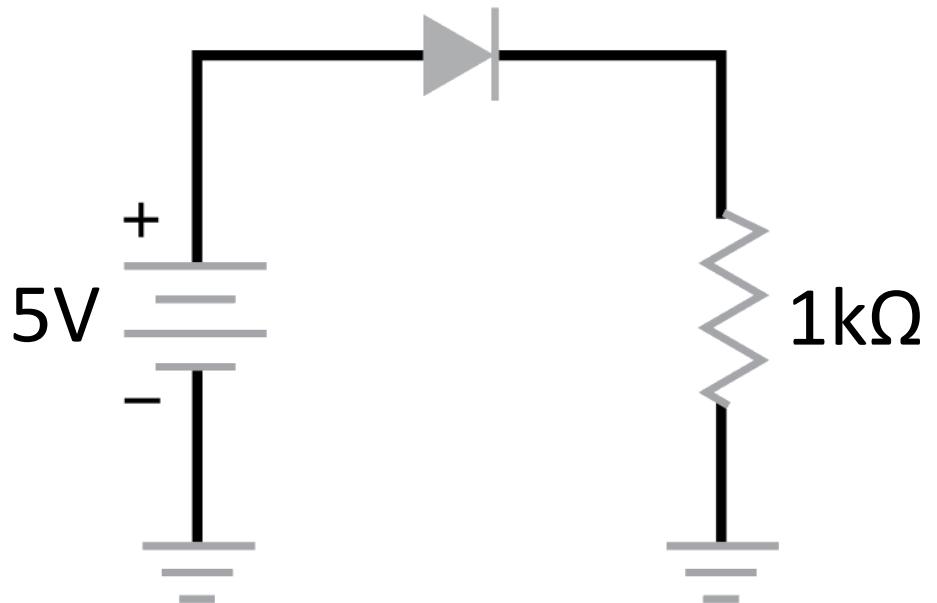


$$(5V - 0,7V)/1k = 4,3mA$$

Então com este valor de corrente, verificamos qual o valor de tensão sobre o diodo pelo modelo:

$$v_D = V_T \ln\left(\frac{i_D}{I_S}\right)$$

- Como não temos informações exatas sobre o estado do diodo, vamos supor que a queda de tensão seja 0,7V e calcular a corrente no circuito



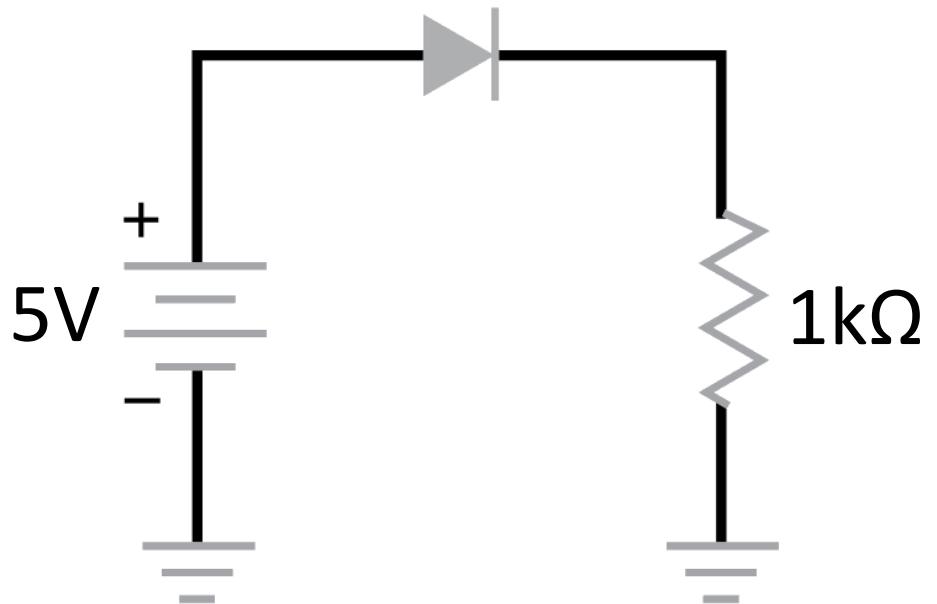
$$(5V - 0,7V) / 1k = 4,3mA$$

Então com este valor de corrente, verificamos qual o valor de tensão sobre o diodo pelo modelo:

$$v_D = V_T \ln\left(\frac{i_D}{I_S}\right)$$

$$v_D = 25mV \ln\left(\frac{4,3mA}{4 \cdot 10^{-15}}\right)$$

- Como não temos informações exatas sobre o estado do diodo, vamos supor que a queda de tensão seja 0,7V e calcular a corrente no circuito



$$(5V - 0,7V) / 1k = 4,3mA$$

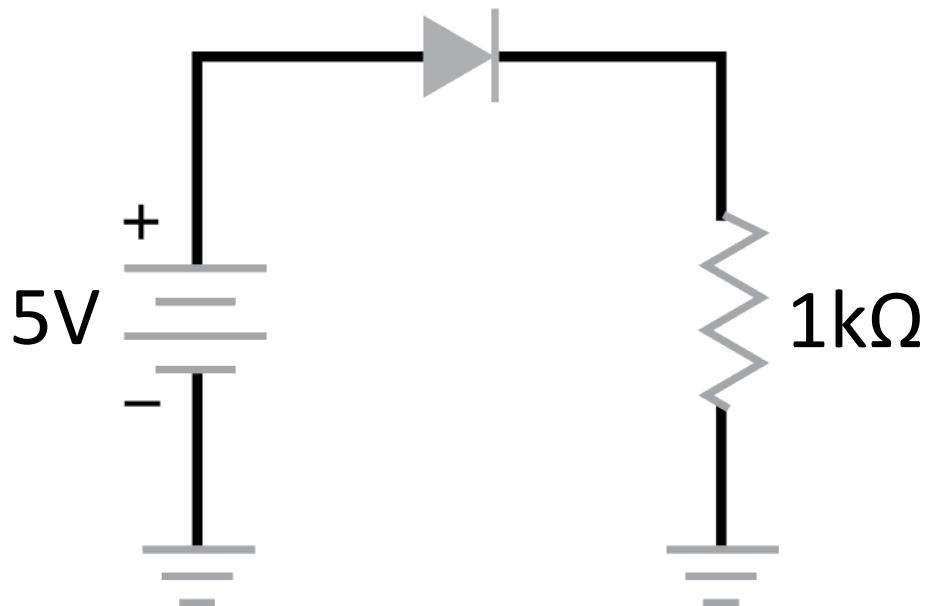
Então com este valor de corrente, verificamos qual o valor de tensão sobre o diodo pelo modelo:

$$v_D = 25mV \ln\left(\frac{4,3mA}{4 \cdot 10^{-15}}\right) = 0,69258V$$

Com este novo valor de tensão, recalculamos qual é a corrente no circuito

$$(5V - 0,69258V) / 1k = 4,30742mA$$

- Como não temos informações exatas sobre o estado do diodo, vamos supor que a queda de tensão seja 0,7V e calcular a corrente no circuito



$$(5V - 0,7V)/1k = 4,3mA$$

Então com este valor de corrente, verificamos qual o valor de tensão sobre o diodo pelo modelo:

$$v_D = 25mV \ln\left(\frac{4,3mA}{4 \cdot 10^{-15}}\right) = 0,69258V$$

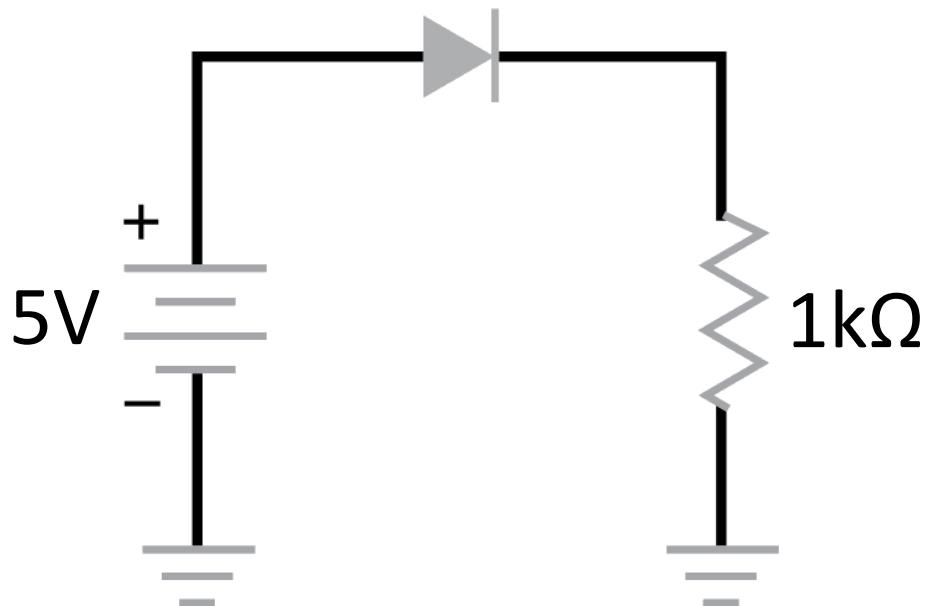
Com este novo valor de tensão, recalculamos qual é a corrente no circuito

$$(5V - 0,692V)/1k = 4,30742mA$$

E agora recalculamos a queda de tensão no diodo

$$v_D = 25mV \ln\left(\frac{4,30742mA}{4 \cdot 10^{-15}}\right) = 0,69262V$$

- Como não temos informações exatas sobre o estado do diodo, vamos supor que a queda de tensão seja 0,7V e calcular a corrente no circuito



$$(5V - 0,7V) / 1k = 4,3mA$$

Então com este valor de corrente, verificamos qual o valor de tensão sobre o diodo pelo modelo:

$$v_D = 25mV \ln\left(\frac{4,3mA}{4 \cdot 10^{-15}}\right) = 0,69258V$$

Com este novo valor de tensão, recalculamos qual é a corrente no circuito

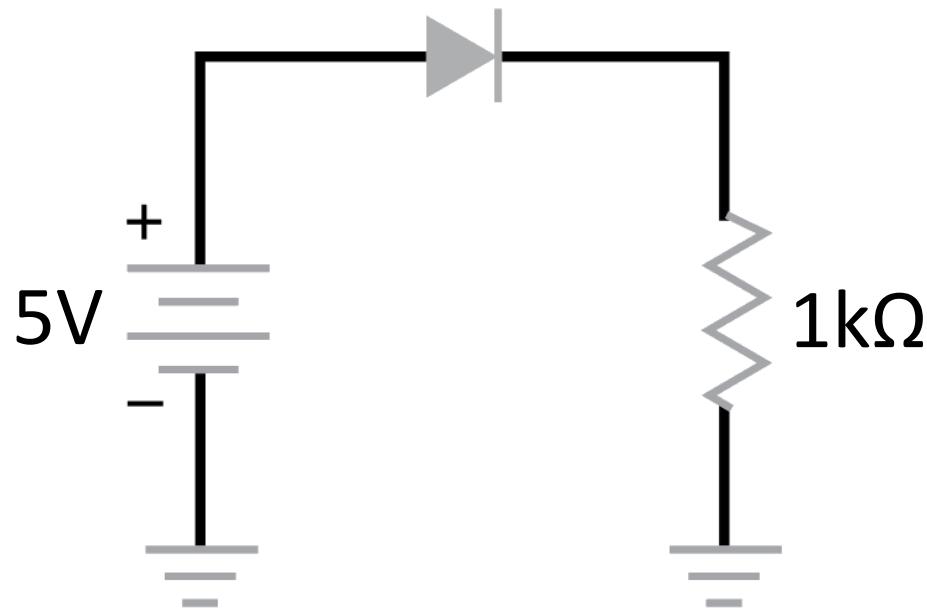
$$(5V - 0,692V) / 1k = 4,30742mA$$

E agora recalculamos a queda de tensão no diodo

$$v_D = 25mV \ln\left(\frac{4,30742mA}{4 \cdot 10^{-15}}\right) = 0,69262V$$

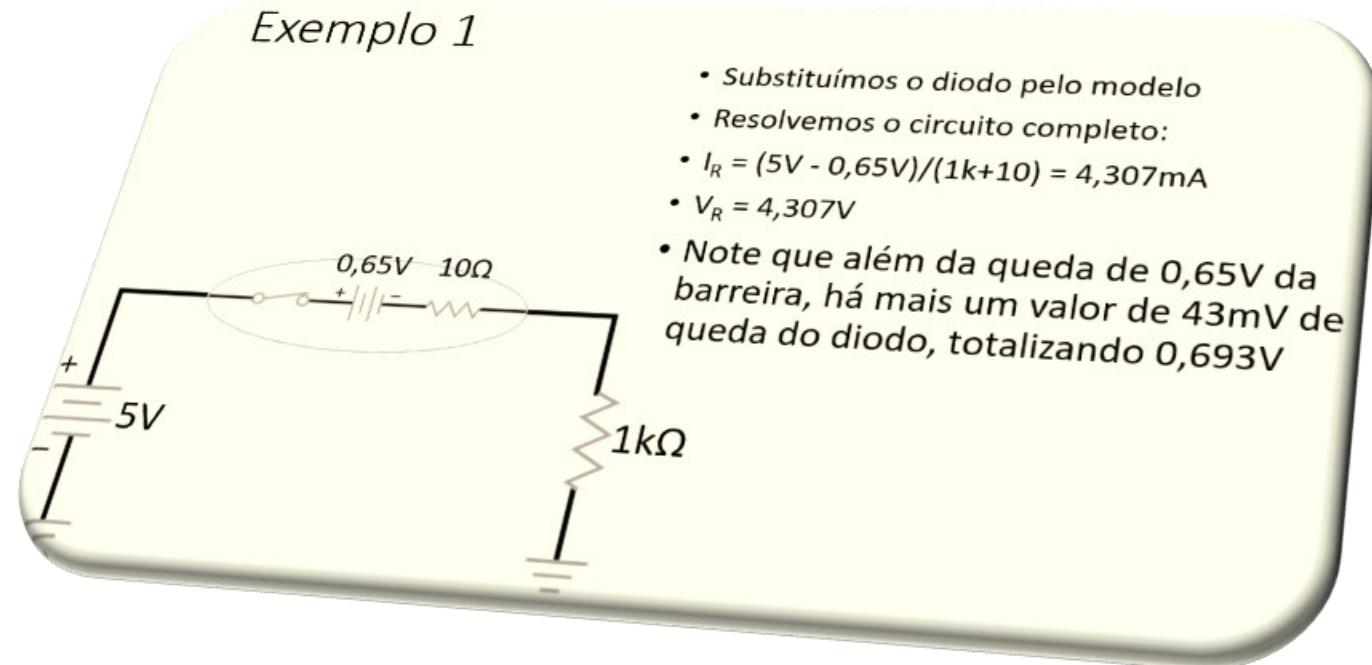
Como os valores são muito próximos, não há sentido em fazer novas iterações e podemos considerar que o resultado está correto

- Solução: $i_D = 4,30742\text{mA}$
 $v_D = 0,692\text{V}$



Note que este é o modelo exponencial do diodo do exercício 1, Mas com este modelo podemos prever o comportamento do diodo para qualquer valor de corrente, mesmo fora do escopo do modelo do tipo bateria

Exemplo 1



- Substituímos o diodo pelo modelo
- Resolvemos o circuito completo:
- $I_R = (5V - 0,65V)/(1k+10) = 4,307\text{mA}$
- $V_R = 4,307\text{V}$
- Note que além da queda de 0,65V da barreira, há mais um valor de 43mV de queda do diodo, totalizando 0,693V

Modelo exponencial

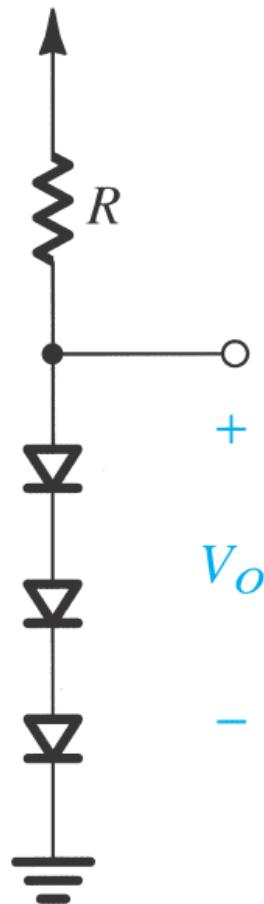
- Outra forma ainda de definir um diodo é apresentando um ponto de operação, por exemplo:
- A) O diodo apresenta 0,7V em 1mA
- B) O diodo apresenta 0,65V em 1A
- C) O diodo apresenta 0,6V em 1mA
- Pela natureza exponencial da curva, basta se usar dessa relação para calcular qualquer outro ponto de operação

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

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

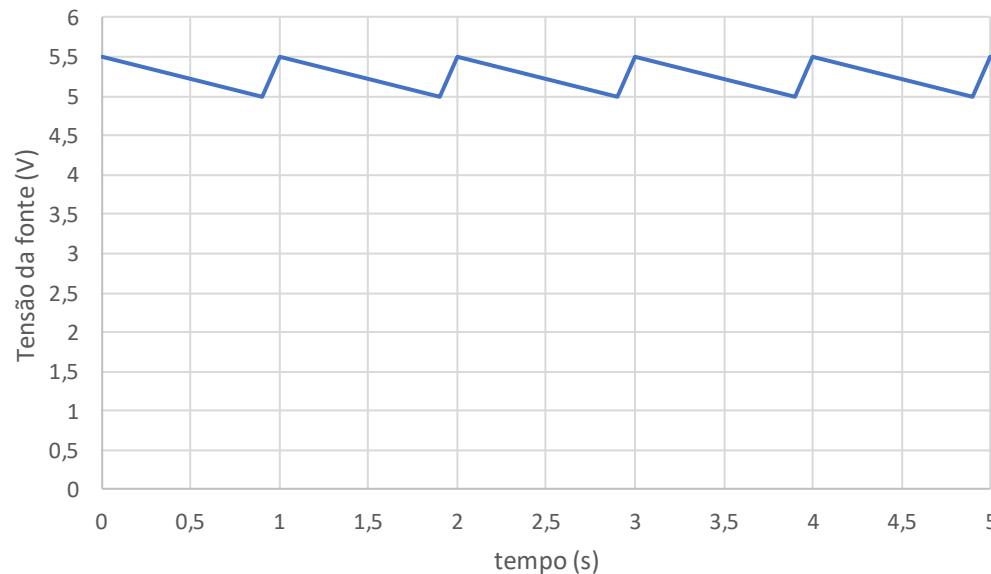
Regulação de tensão

- Por apresentarem pouca variação de tensão frente a variações de corrente, diodos podem ser utilizados como reguladores de tensão em aplicações específicas.

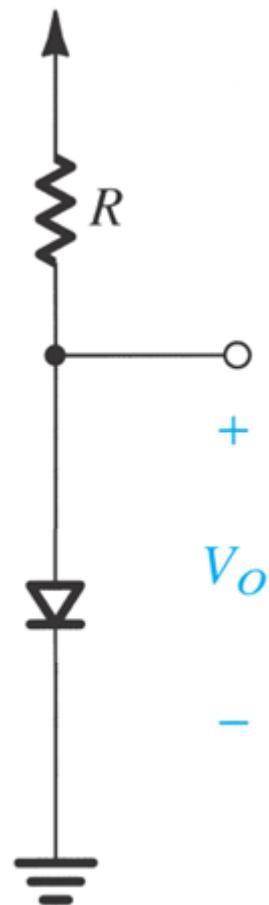


Exemplo

- Considere que no circuito da figura o valor da resistência R é de 500Ω , o diodo apresenta $0,7V$ em $1mA$.
- O circuito é alimentado por uma fonte de $5V$, porém esta fonte apresenta uma variação de 10% na saída, chegando a $5,5V$ de pico



- Calcule qual a variação de tensão sobre o diodo



Exemplo

- Neste caso, temos que analisar a magnitude de corrente nos dois extremos da excursão do valor da fonte:
- Em 5V → supondo queda de 0,7V → $i_D = (5-0,7)/500 = 8,6\text{mA}$
- Recalculando a queda de tensão: $v_D = 0,7 + V_T \ln(8,6\text{m}/1\text{m}) = 0,753\text{V}$
- Mais uma iteração: $i_D = 8,49\text{mA}$ e $v_D = 0,753\text{V}$ (OK)

Exemplo

- Neste caso, temos que analisar a magnitude de corrente nos dois extremos da excursão do valor da fonte:
- Em 5V → supondo queda de 0,7V → $i_D = (5-0,7)/500 = 8,6\text{mA}$
- Recalculando a queda de tensão: $v_D = 0,7 + V_T \ln(8,6\text{m}/1\text{m}) = 0,753\text{V}$
- Mais uma iteração: $i_D = 8,49\text{mA}$ e $v_D = 0,753\text{V}$ (OK)
- Em 5,5V → supondo queda de 0,7V → $i_D = (5,5-0,7)/500 = 9,6\text{mA}$
- Recalculando a queda de tensão: $v_D = 0,7 + V_T \ln(9,6\text{m}/1\text{m}) = 0,756\text{V}$
- Mais uma iteração: $i_D = 9,486\text{mA}$ e $v_D = 0,756\text{V}$ (OK)

Exemplo

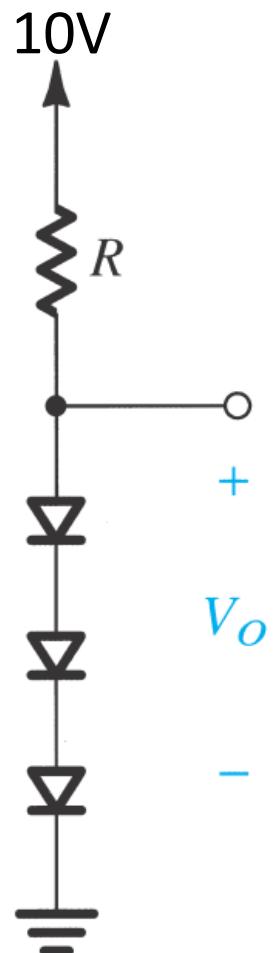
- Neste caso, temos que analisar a magnitude de corrente nos dois extremos da excursão do valor da fonte:
- Em 5V → $v_D = 0,753V$
- Em 5,5V → $v_D = 0,756V$
- Variação <0,4%
- Portanto a variação no diodo é mínima perto da variação da fonte

Regulação

- Um circuito como o do exemplo pode ser utilizado para fornecer uma referência fixa de tensão.
- Podemos cascatear mais diodos e variar a magnitude de corrente para ajustar os valores desejados na saída.
- Esta configuração pode ser usada como uma ‘fonte’, mas deve ser estudado o efeito da carga sobre a tensão de saída, pois a corrente de carga altera a corrente sobre os diodos

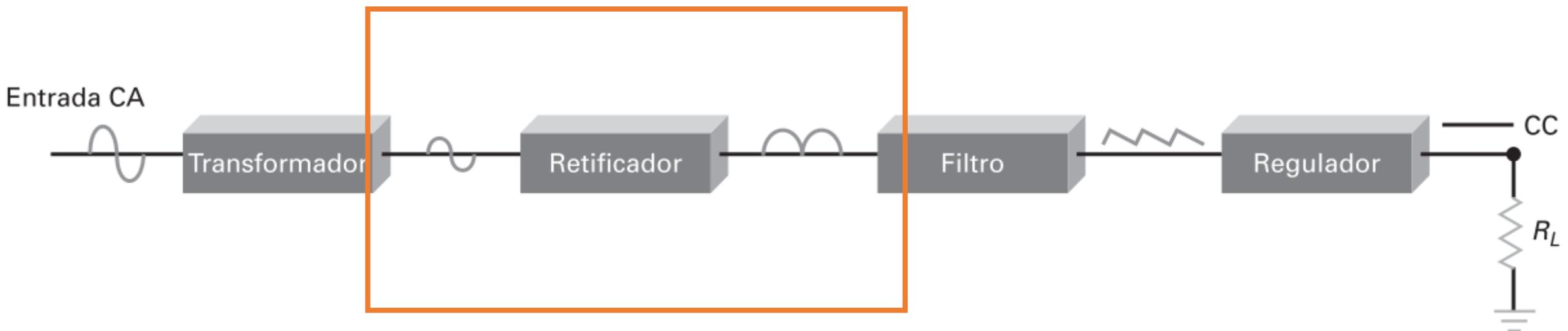
Exercício para casa

- Verifique qual a tensão de saída (V_o) utilizando uma fonte fixa de 10V, cada diodo apresenta 0,7V em 1mA, $R=500\Omega$, conectando nesse terminal cargas de:
- A) $100k\Omega$
- B) $10k\Omega$
- C) $1k\Omega$
- D) 100Ω
- Lembre-se de aplicar a lei dos nós



Circuitos Retificadores

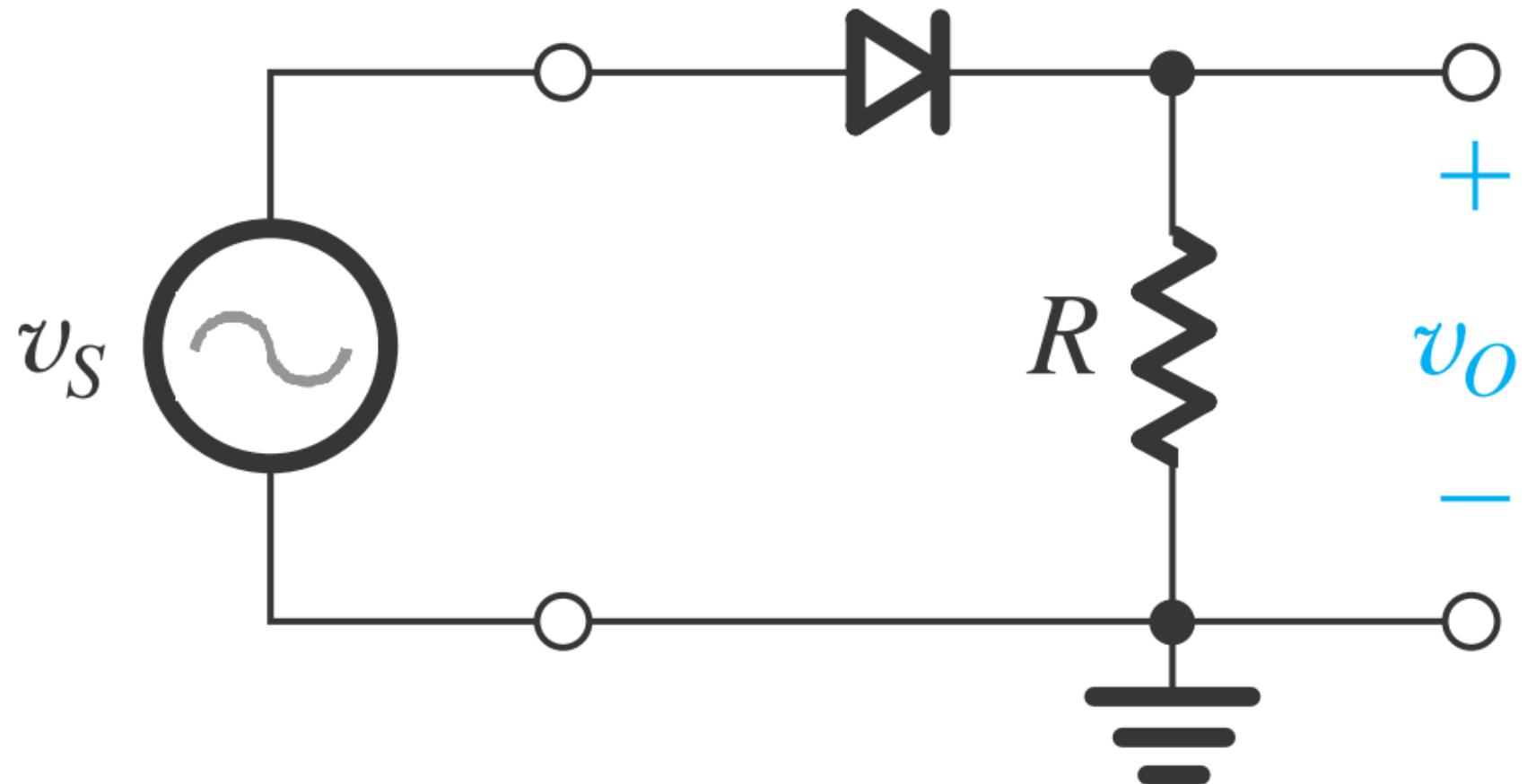
- Uma das principais aplicações de diodos está na conversão de energia CA em CC

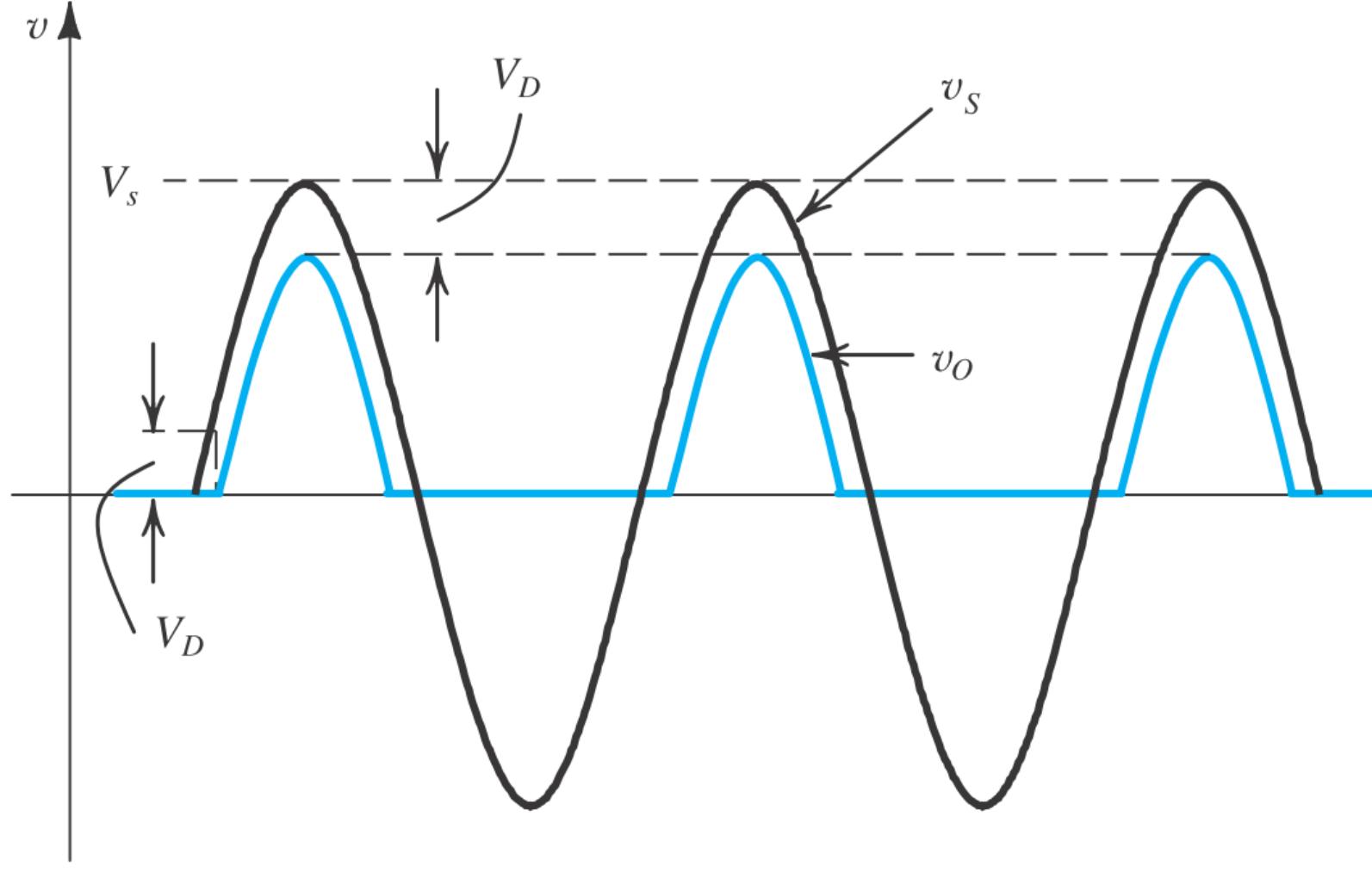
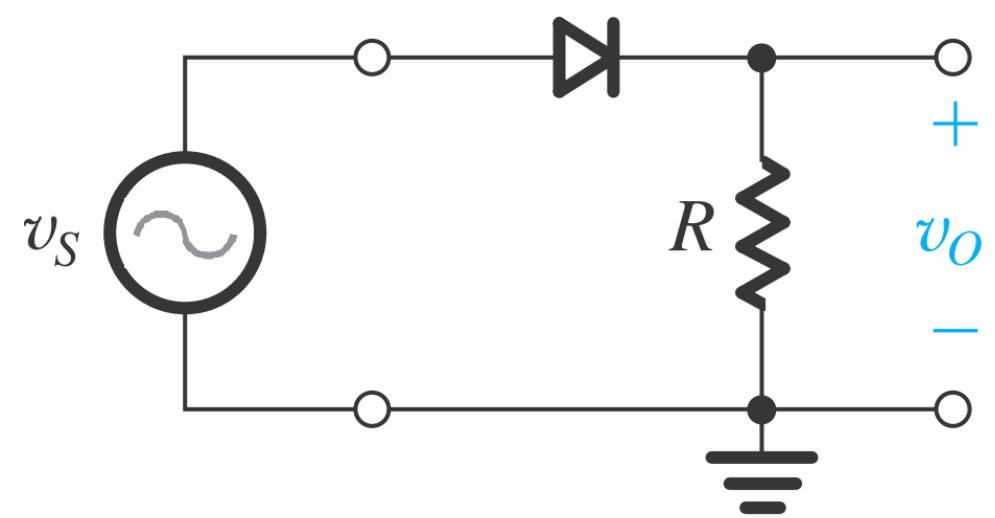


O que define uma forma de onda CA ou CC?

Retificador de meia-onda

- A forma mais simples de retificador é conhecido como retificador de meia onda





Exemplo

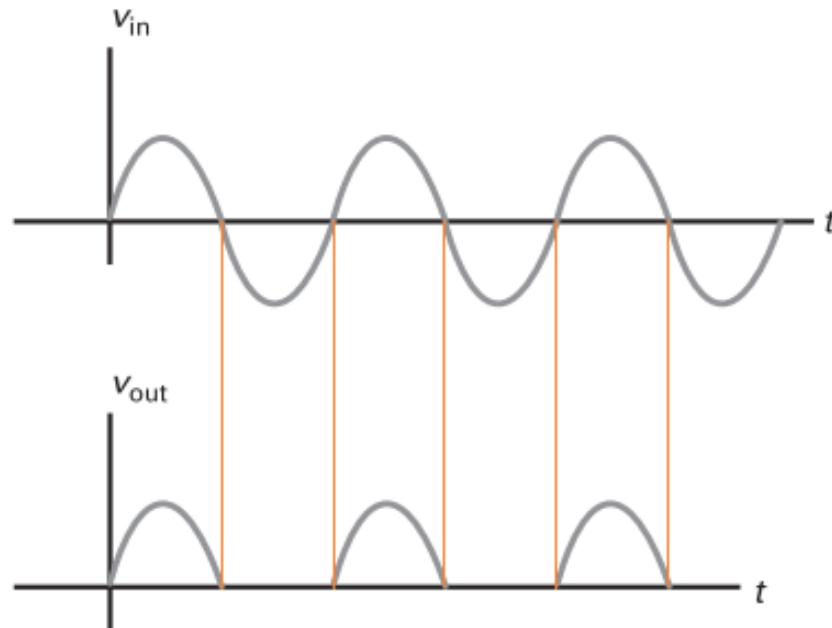
- Considerando o diodo ideal no circuito retificador meia onda, calcule a corrente média sobre uma carga de 50Ω , sendo a tensão de entrada v_s uma senoide de $127V_{RMS}$.

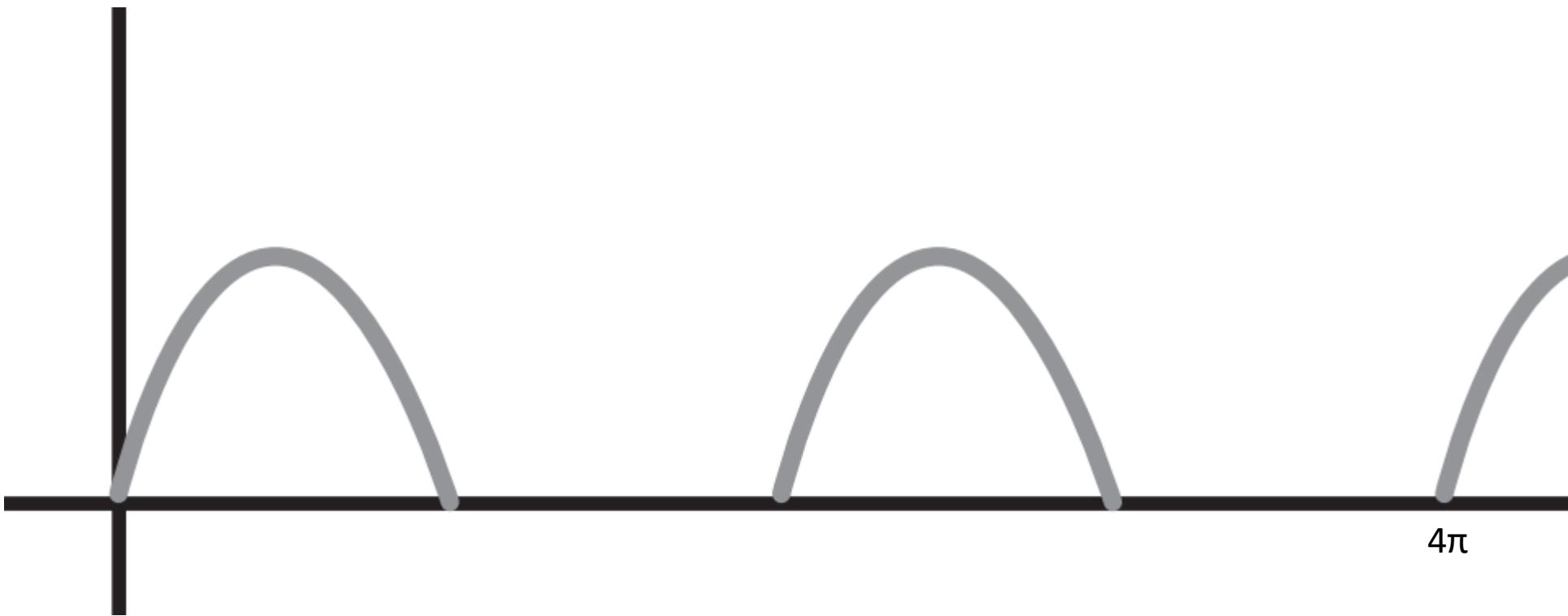
Exemplo

- Considerando o diodo ideal no circuito retificador meia onda, calcule a corrente média sobre uma carga de 50Ω , sendo a tensão de entrada v_s uma senoide de $127V_{RMS}$.
- Diodo ideal → queda de tensão =0V para qualquer corrente positiva

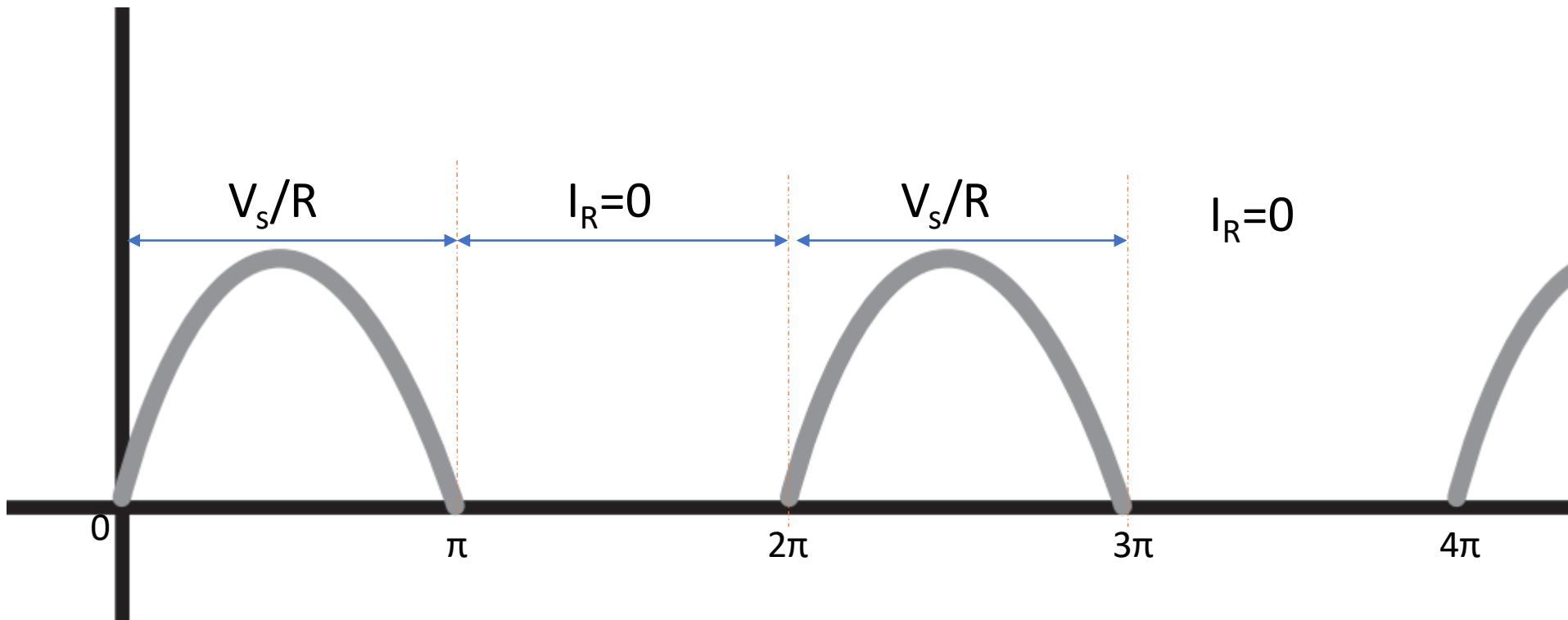
Exemplo

- Considerando o diodo ideal no circuito retificador meia onda, calcule a corrente média sobre uma carga de 50Ω , sendo a tensão de entrada v_s uma senóide de $127V_{RMS}$.
- Diodo ideal \rightarrow queda de tensão =0V para qualquer corrente positiva

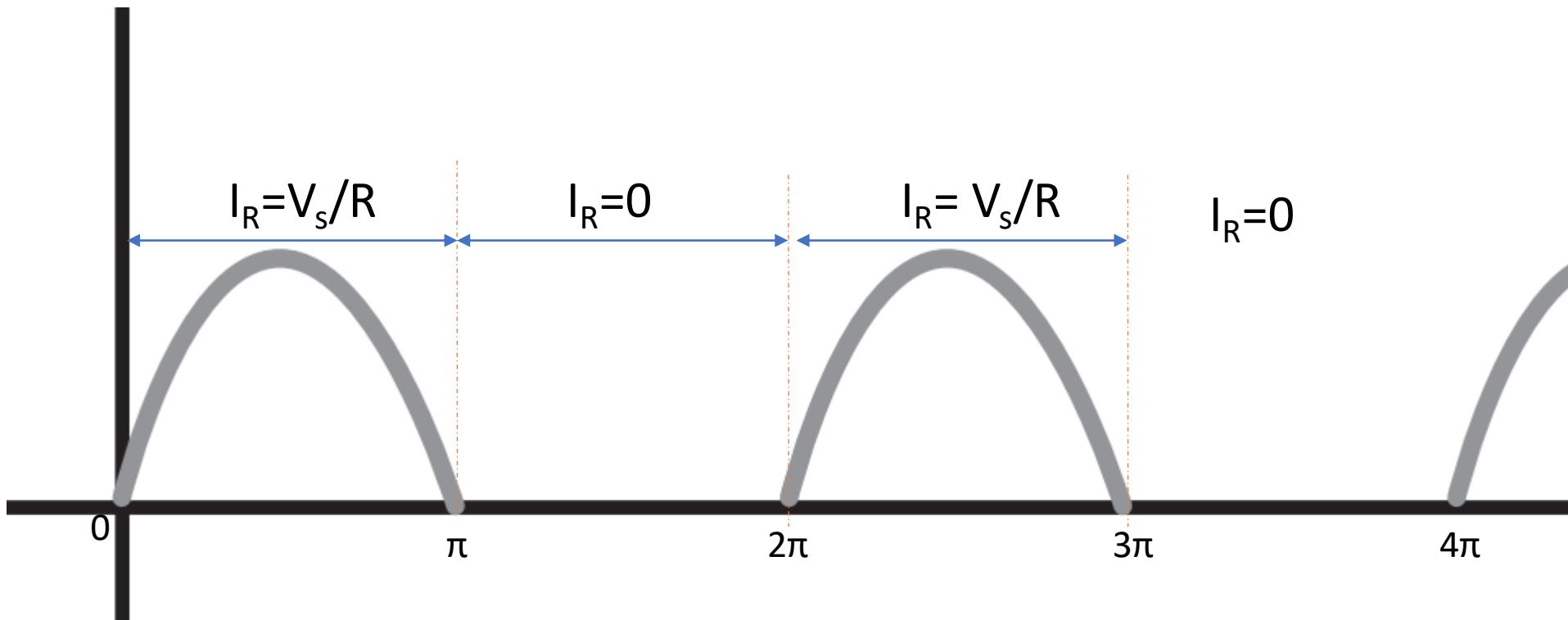




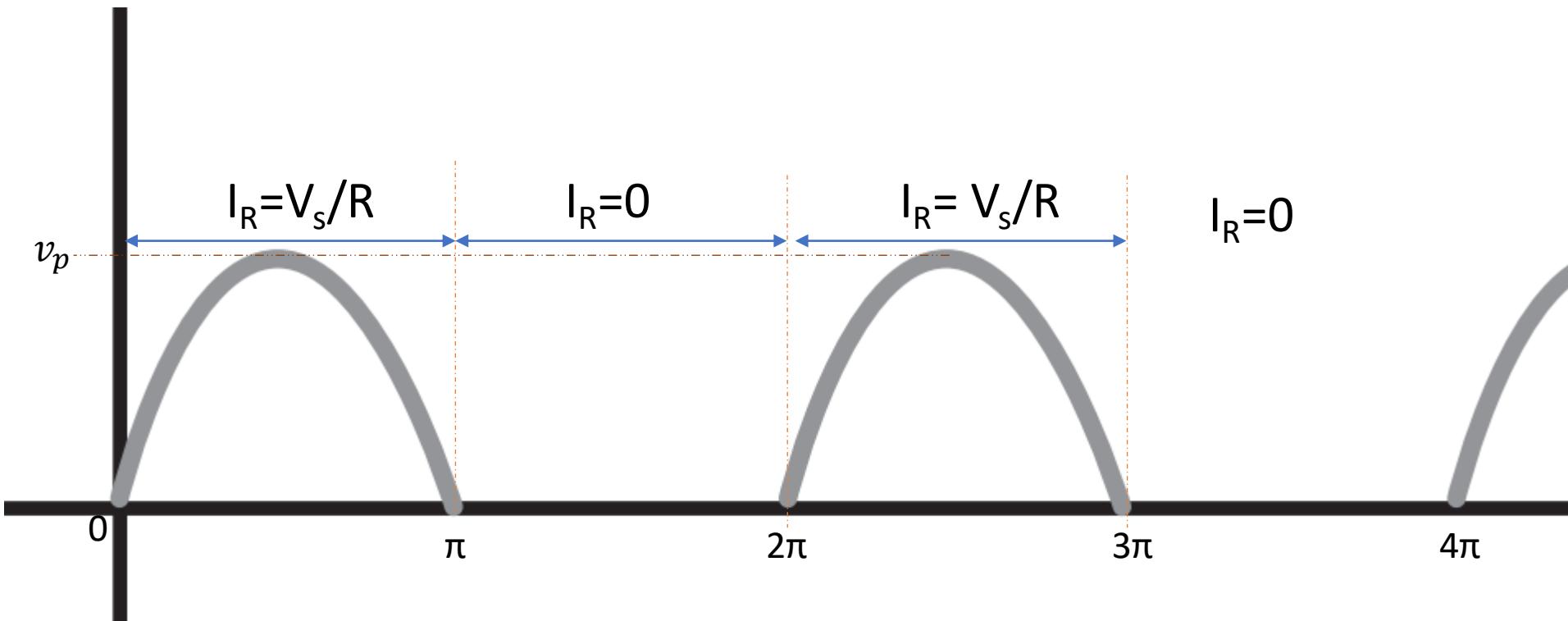
A forma de onda de tensão na saída terá apenas os semi-ciclos positivos do sinal de entrada e zero durante o semi-ciclo negativo



Como a carga é resistiva, o sinal da corrente é o sinal de tensão dividido pela resistência

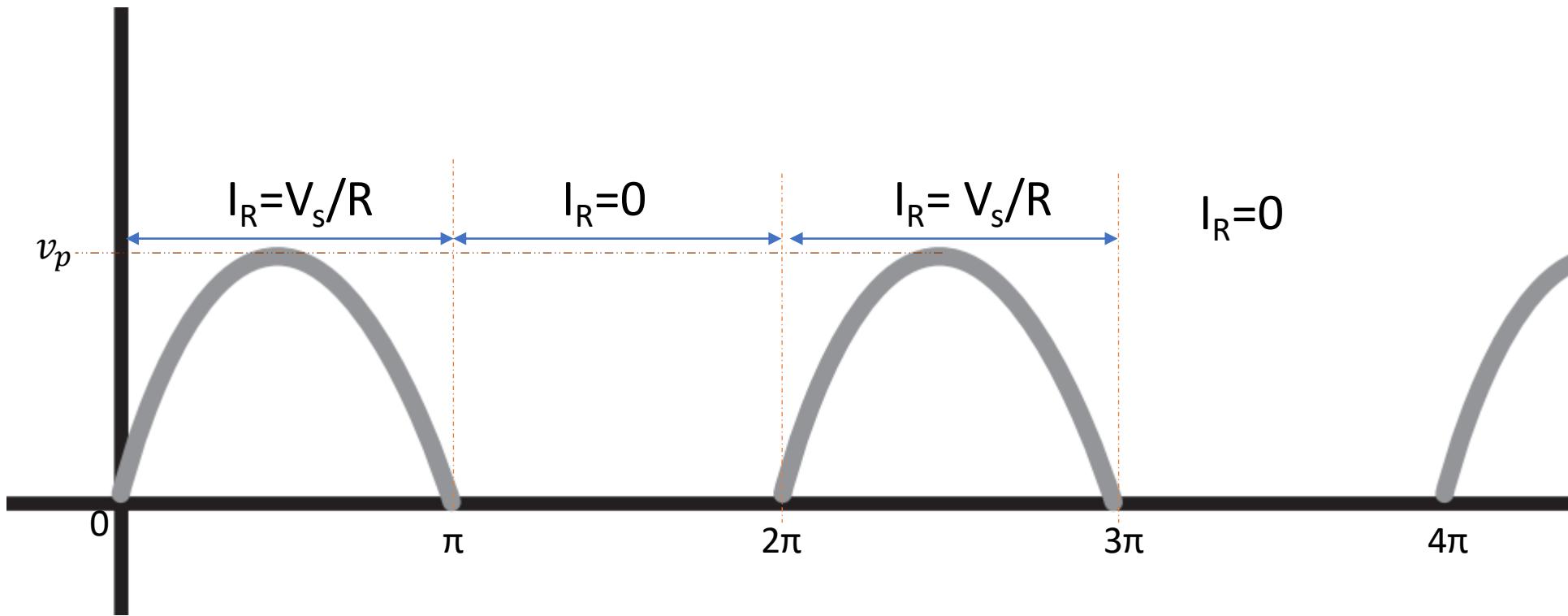


Como a carga é resistiva, o sinal da corrente é o sinal de tensão dividido pela resistência



Podemos calcular o valor médio pela integral do sinal

$$i_{R_{med}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{v_o}{R} d\theta = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{\pi} \frac{v_p \sin(\theta)}{R} d\theta + \int_{\pi}^{2\pi} \frac{0}{R} d\theta \right)$$

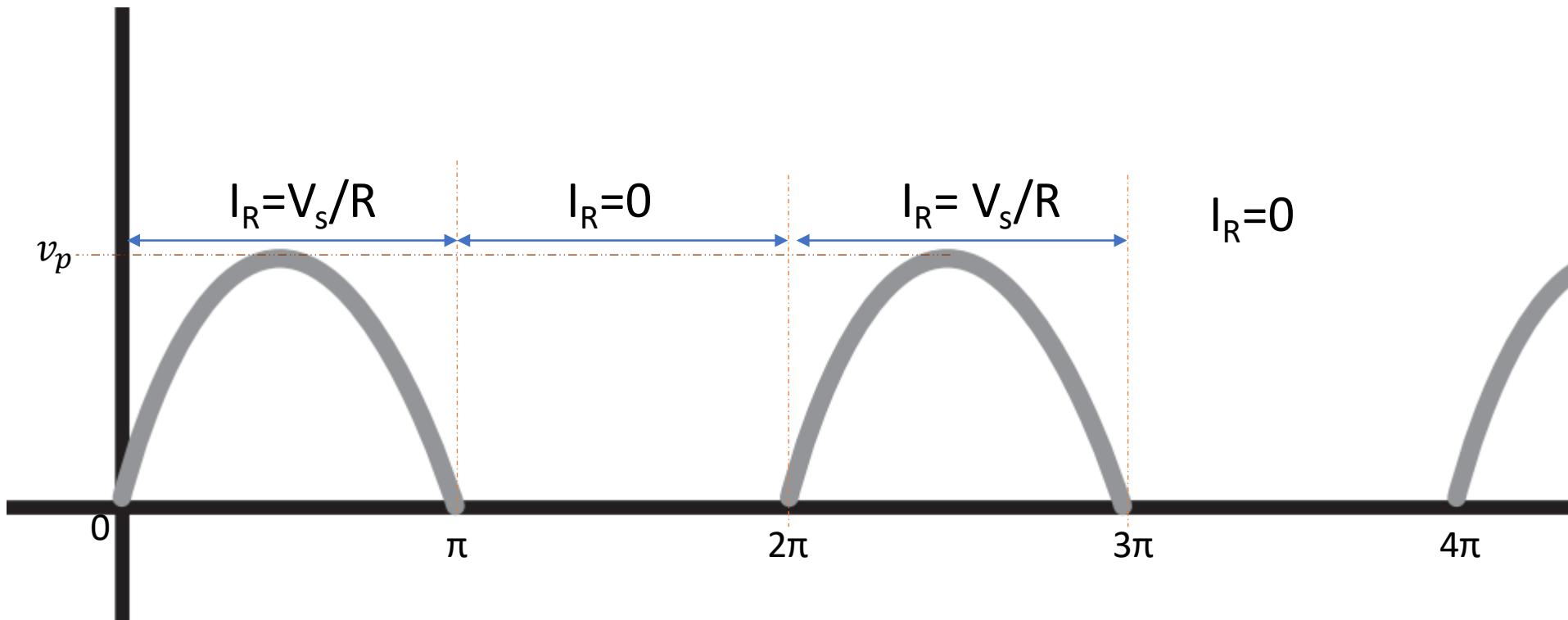


$$i_{R_{med}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{v_o}{R} d\theta = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{\pi} \frac{v_p \sin(\theta)}{R} d\theta + \int_{\pi}^{2\pi} \frac{0}{R} d\theta \right)$$

$$\int_0^{\pi} \frac{v_p \sin(\theta)}{R} d\theta =$$

$$\frac{v_p}{R} (-\cos(\pi) - \cos(0)) =$$

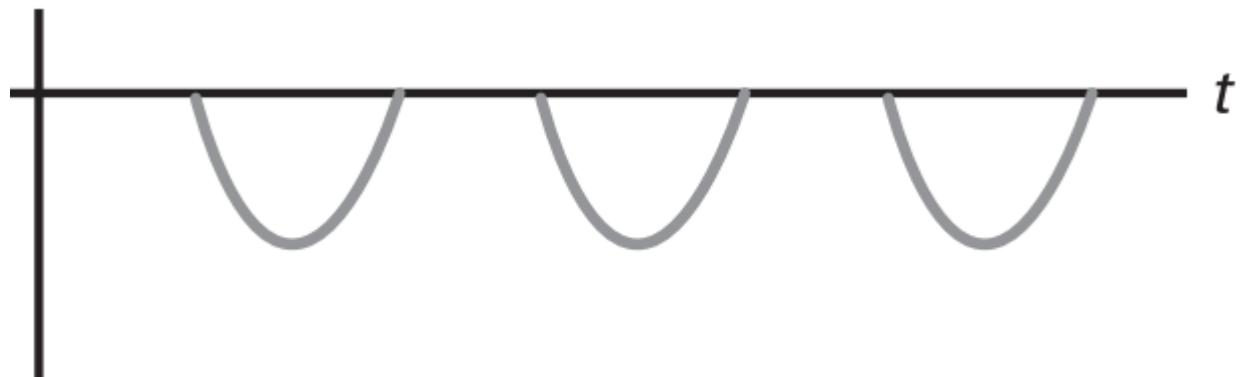
$$\frac{2v_p}{R}$$



$$i_{R_{med}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{v_o}{R} d\theta = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{\pi} \frac{v_p \sin(\theta)}{R} d\theta + \int_{\pi}^{2\pi} \frac{0}{R} d\theta \right) = \frac{1}{2\pi} \frac{2v_p}{R}$$

$$i_{R_{med}} = \frac{v_p}{\pi R}$$

- Como a tensão de entrada é uma senóide de 127VRMS, a tensão de pico é 180V
- Portanto a corrente média sobre uma carga de 50Ω é 1,14A
- No pico de tensão, a corrente de pico no diodo é de **3,6A!**
- Note que se o diodo fosse invertido, a tensão na saída seria negativa pois o diodo conduziria apenas no semi-ciclo negativo.



O mesmo procedimento é utilizado para o cálculo em RMS:

$$v_{oRMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o^2 d\theta}$$

Tensão reversa

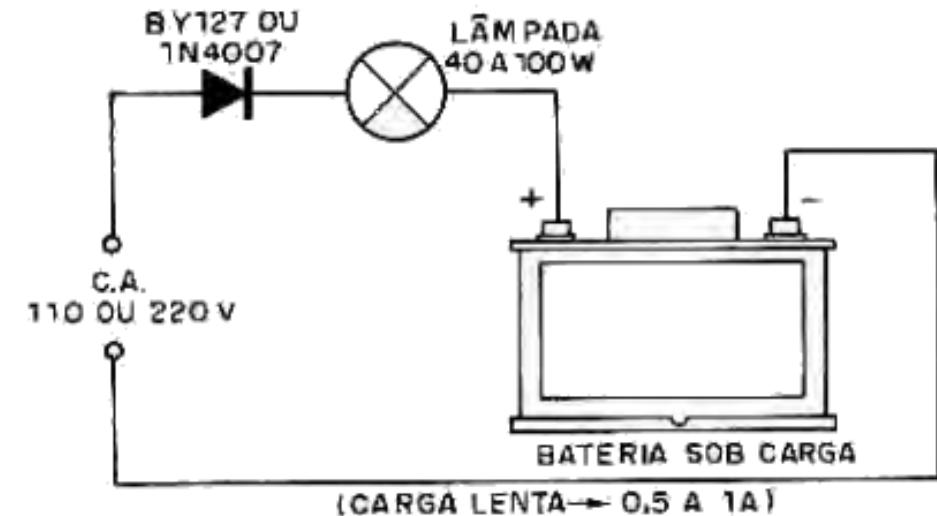
- Note que durante o semi-ciclo negativo há uma tensão com amplitude considerável sendo aplicada ao diodo
- No Exemplo do retificador de meia onda, o pico de tensão reversa é de 180V
- Ao projetar um circuito, o diodo escolhido deve suportar tanto a corrente de pico quanto o pico de tensão reversa.

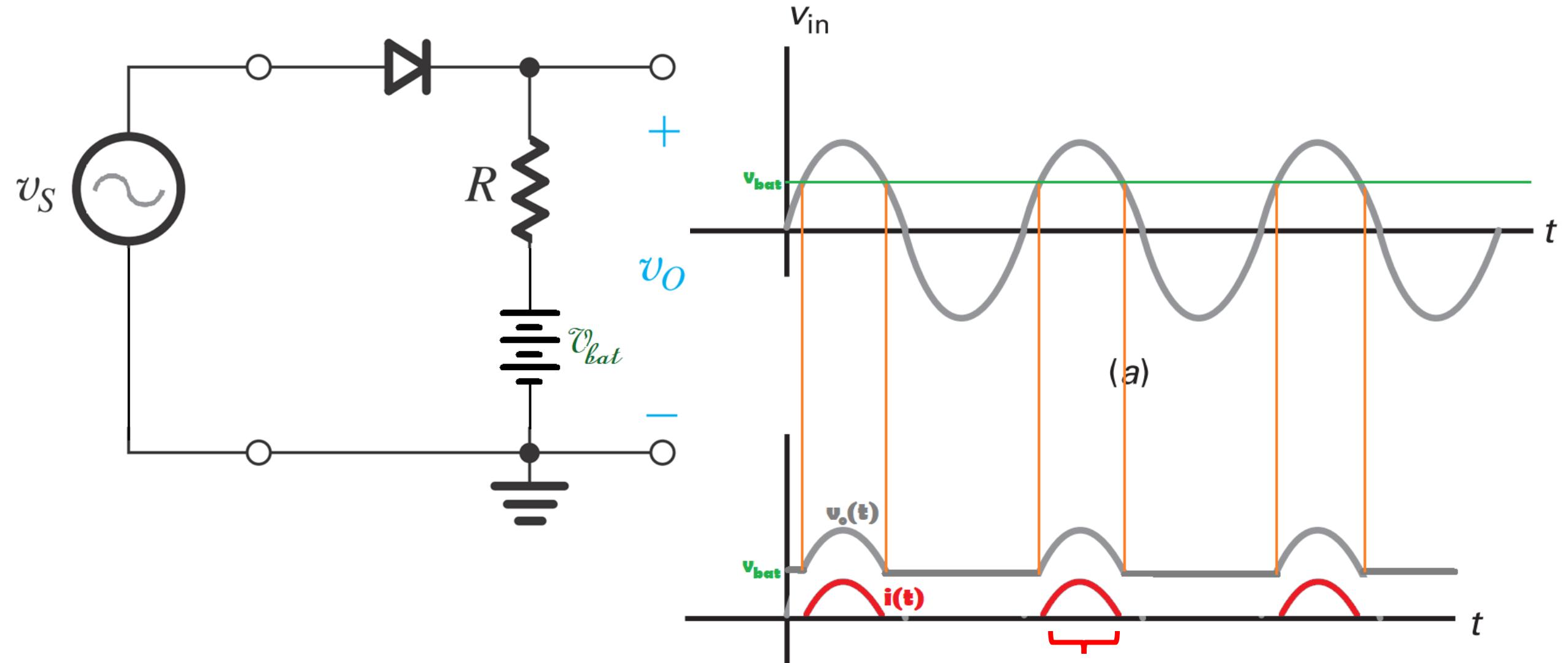
Caso o diodo não seja ideal

- Utilizamos o modelo de queda constante (V) ou de bateria ($V+R$)
- A condução se dá apenas quando a tensão de entrada superar a tensão de barreira
- A resistência interna do diodo é somada à carga
- **Para casa:** refazer o exemplo utilizando uma fonte de 20V, resistência de carga de 10Ω , aplicando diodo ideal, diodo com queda constante de 0,7V e diodo com queda de 0,65V e resistência interna de $0,5\Omega$

Carga com uma fonte de tensão

- Uma aplicação clássica dos retificadores é para a carga de uma bateria
- É um processo rudimentar mas serve como exemplo



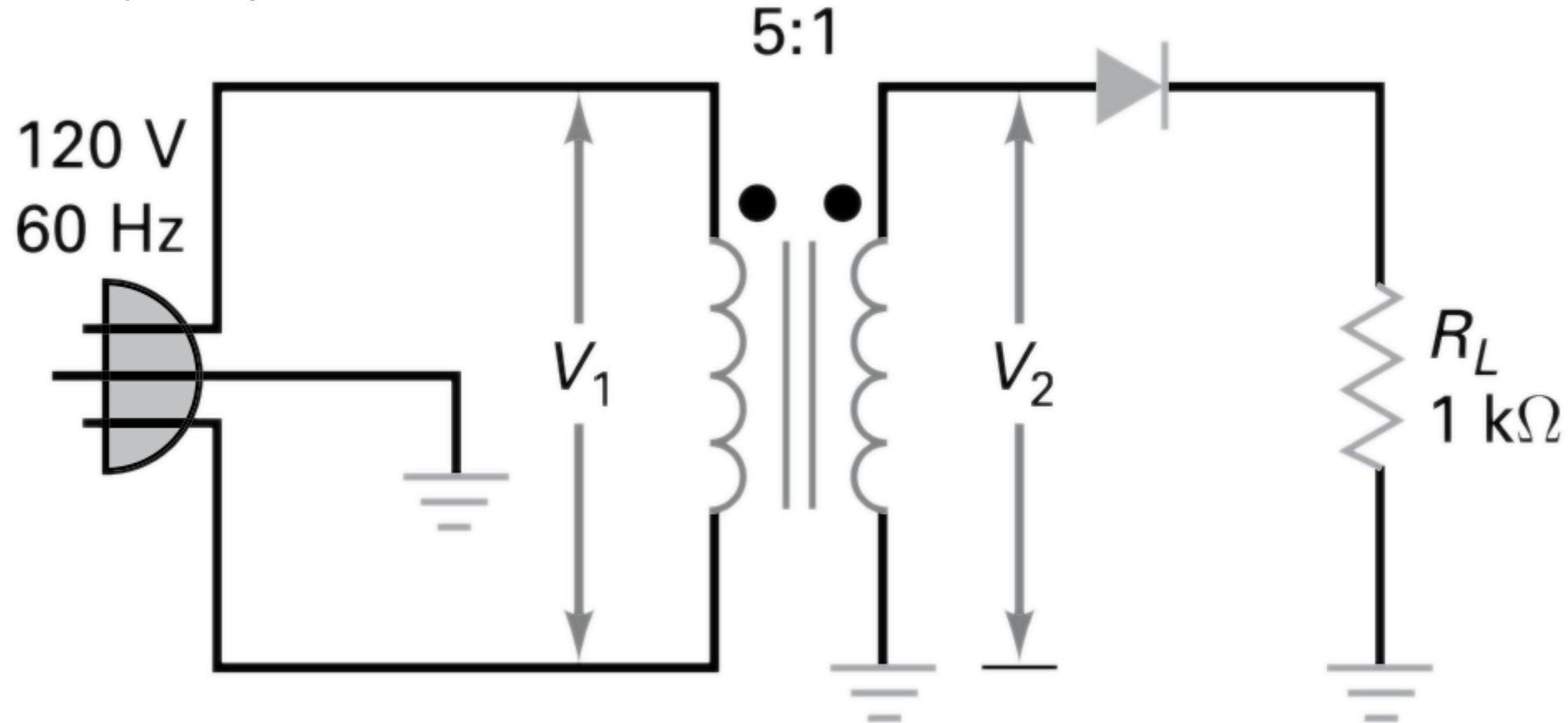


Ângulo de condução,
definido entre os ângulos
de início e fim quando o
diodo permite passagem
de corrente ($v_s > v_{bat}$)

Carga com fonte de tensão

- Neste caso, a condução se dá apenas quando a tensão de entrada for maior que a tensão na carga
- Os ângulos inicial e final são calculados pela função da senóide, quando $v_p \operatorname{sen}(\theta) \geq v_{bat}$
- A corrente é calculada integrando dentro do ângulo de condução

- A tensão de saída tem o valor de pico da tensão de entrada
- Para obter valores variados podemos usar antes do retificador um transformador CA, de forma a obter patamares de tensão compatíveis com a aplicação

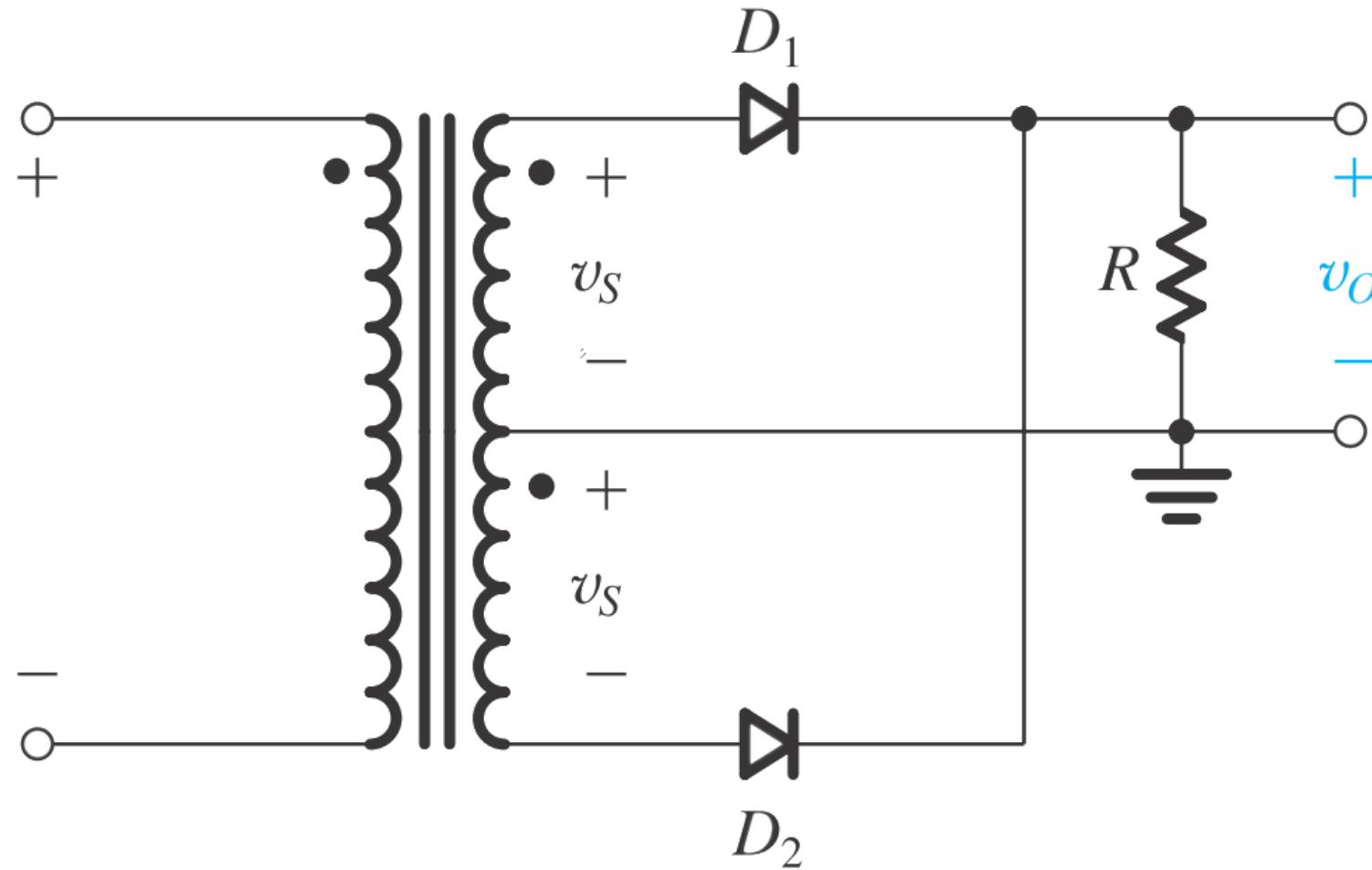


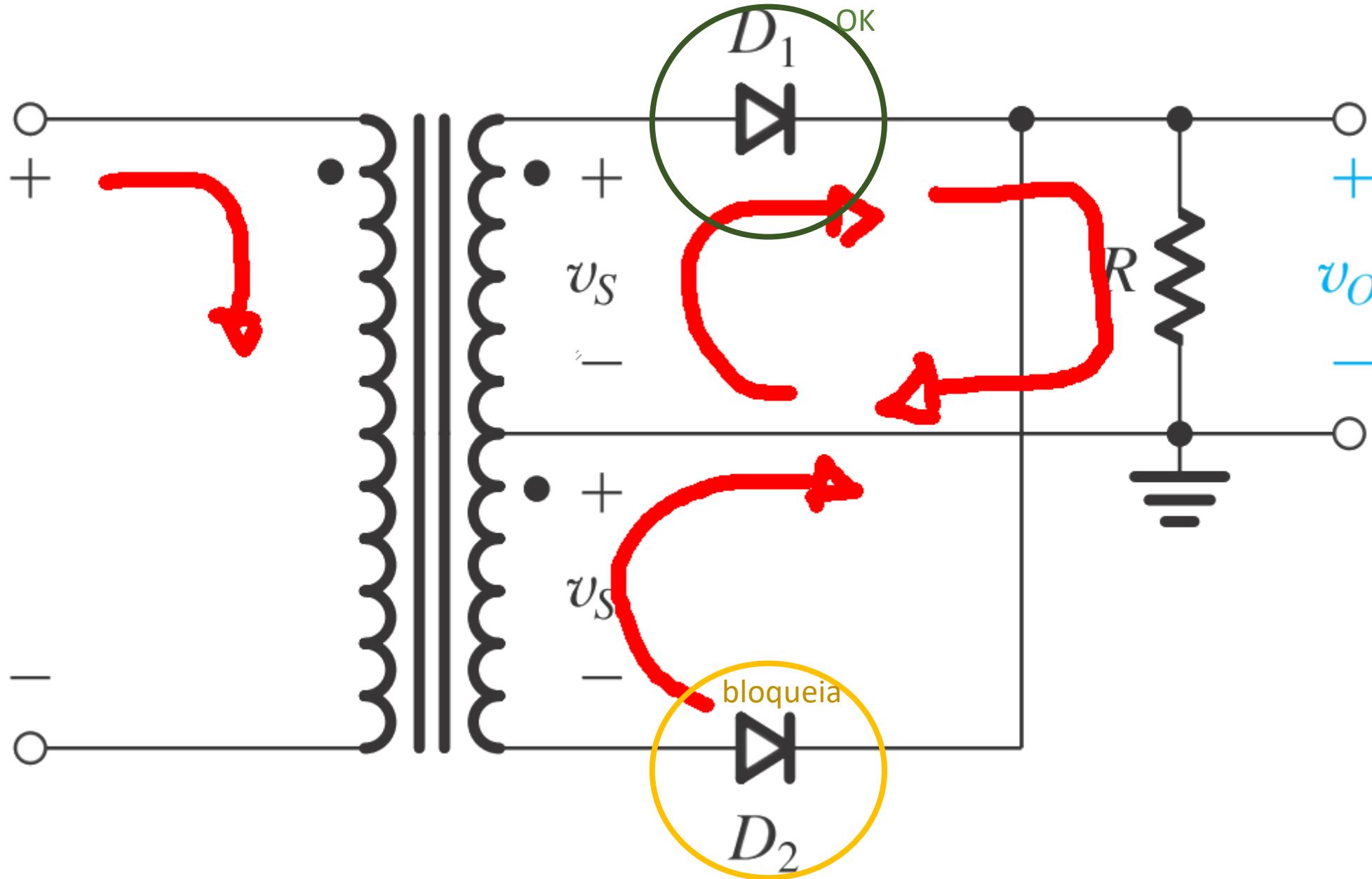
Aproveitamento da onda

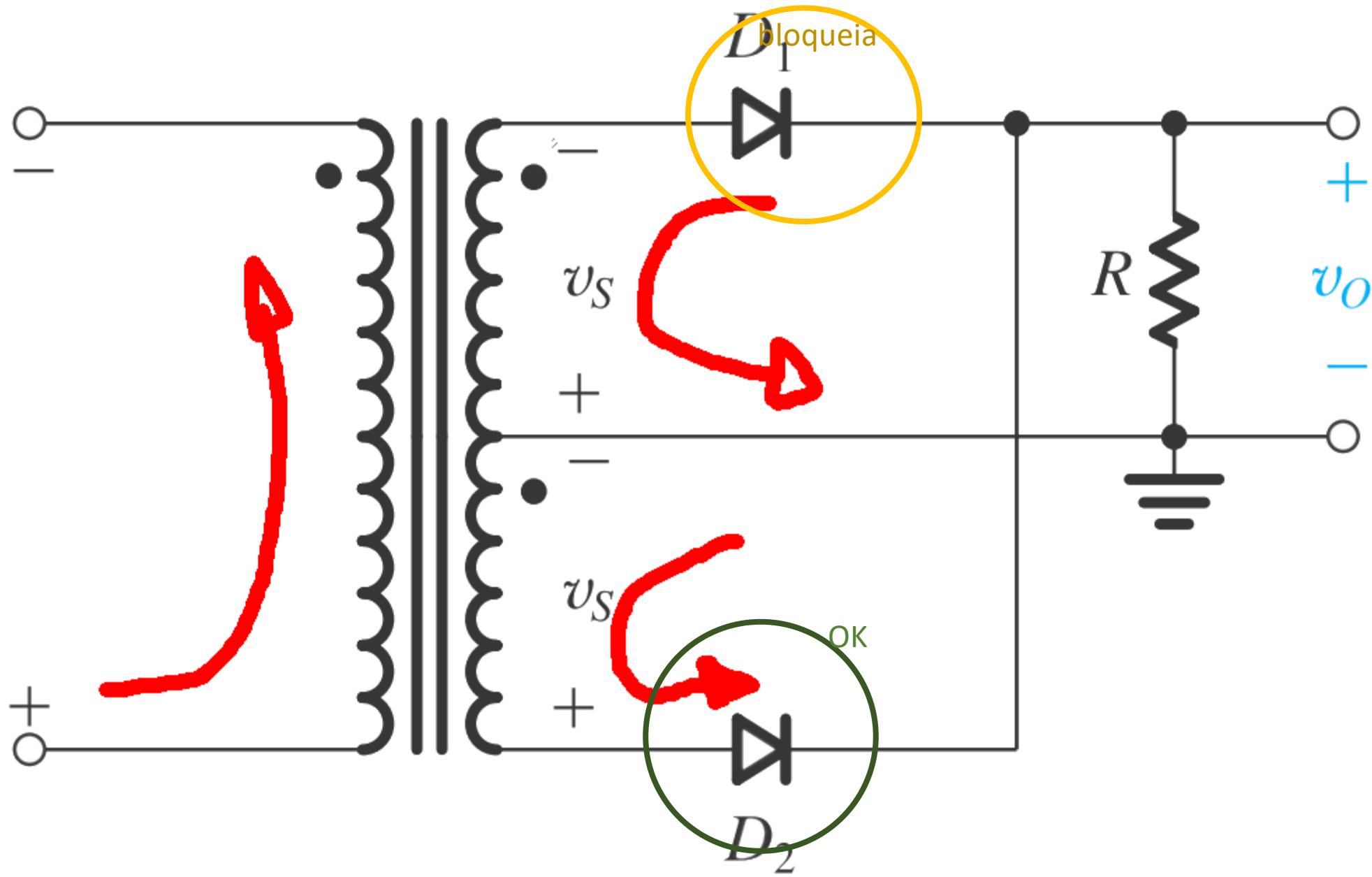
- Apesar de funcional, o retificador de meia onda aproveita apenas metade da senóide
- Um circuito capaz de aproveitar a senóide na sua totalidade faz mais sentido
- Para isso é aplicado o retificador de onda completa, que pode ser construído de duas formas:
 - Aplicando um transformador com derivação central
 - Aplicando uma ponte retificadora

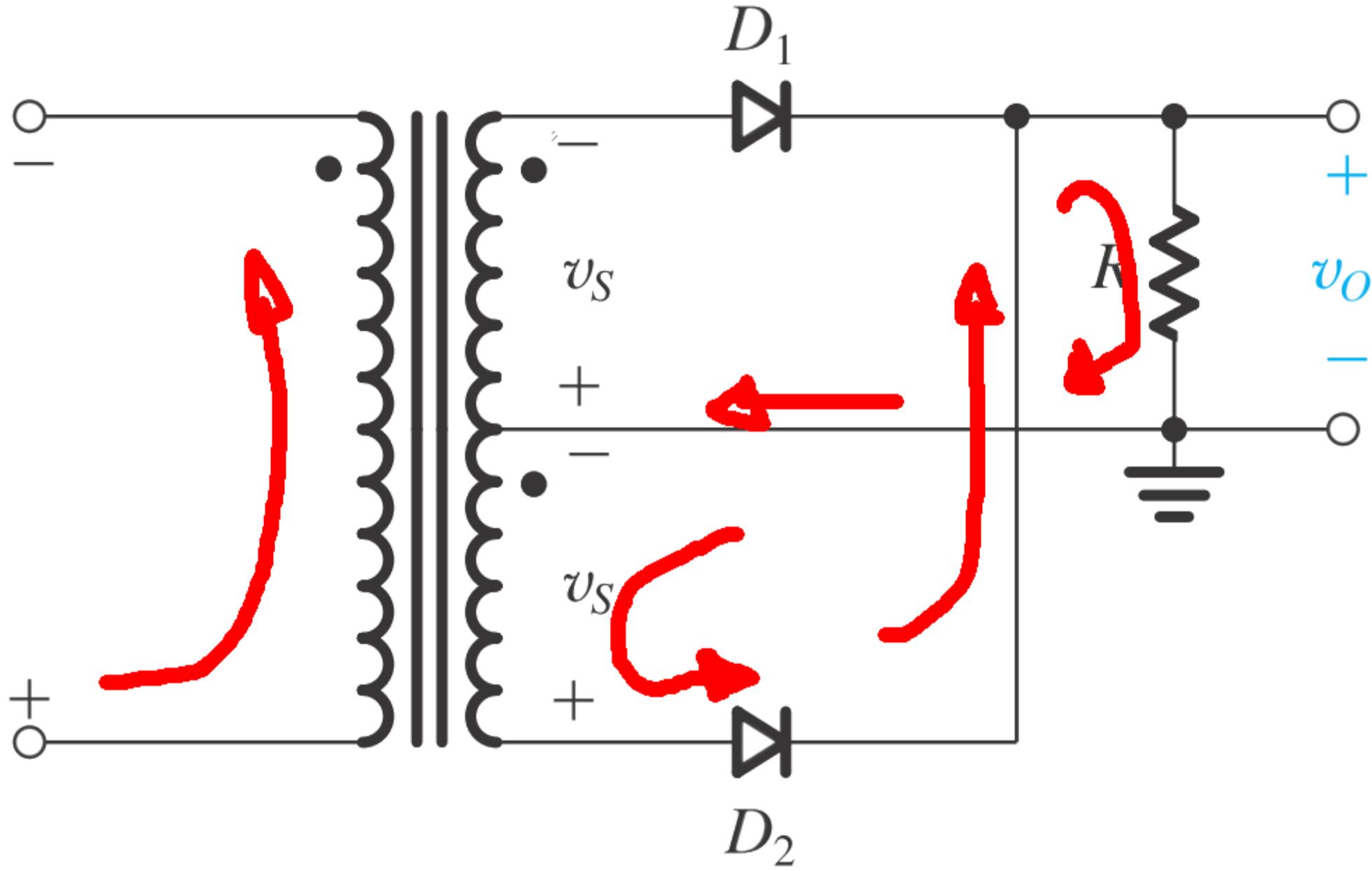
Transformador com derivação central

- Duas formas de onda exatamente iguais nas saídas

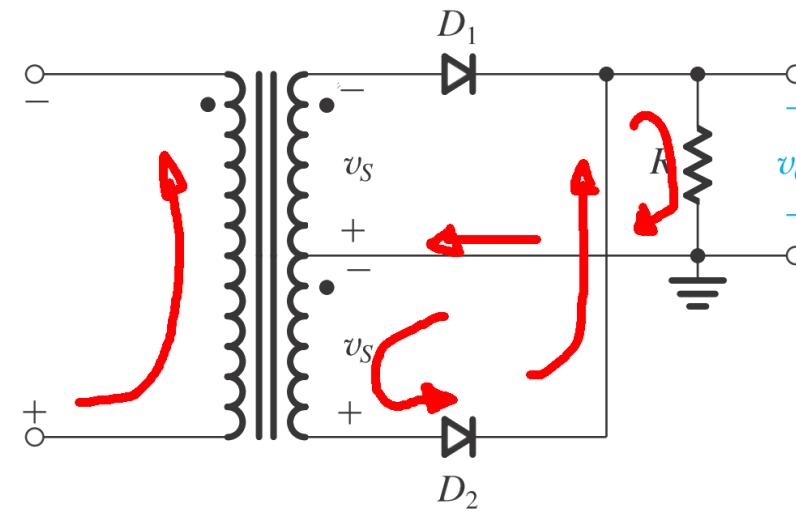
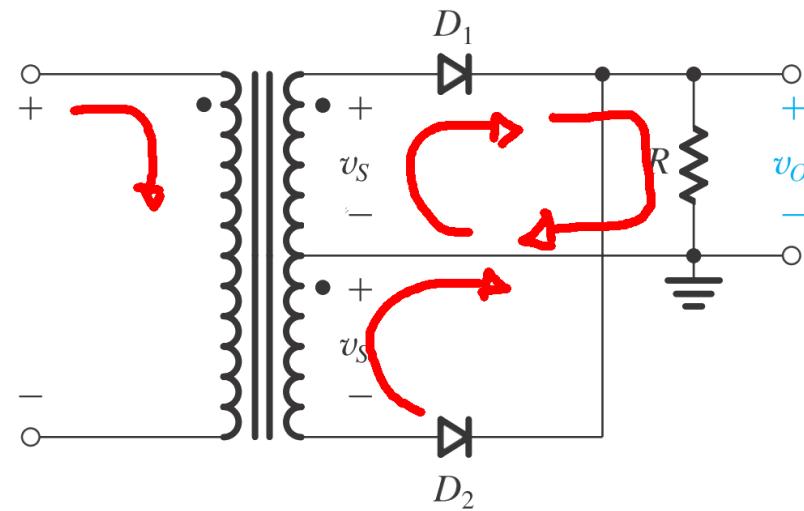








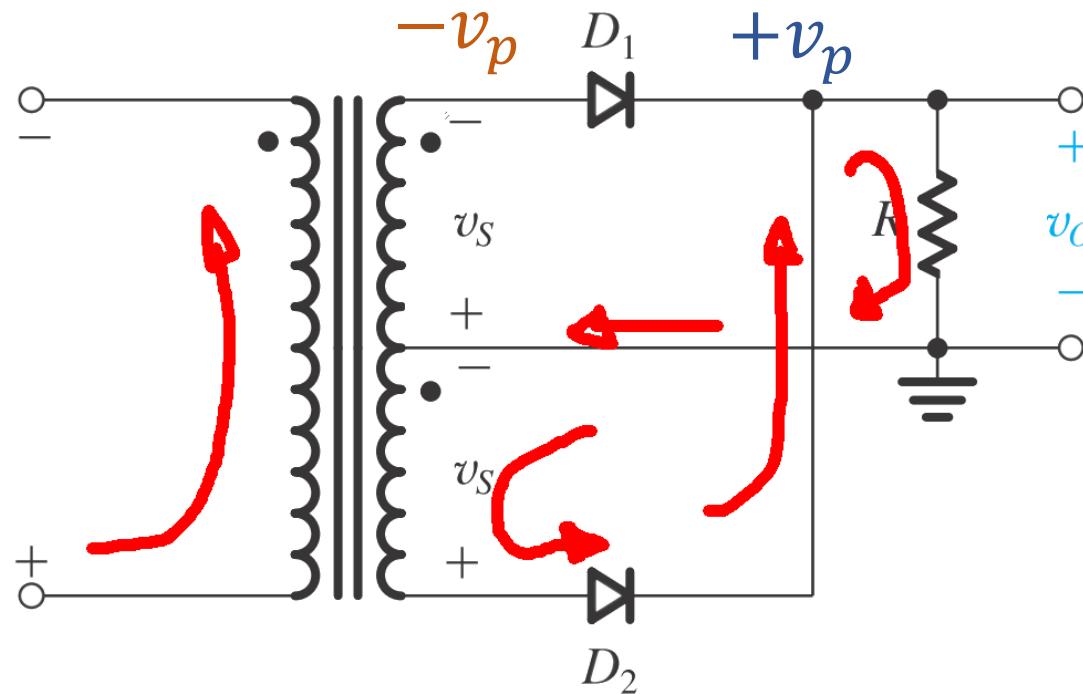
Portanto, nos dois semi-ciclos há condução



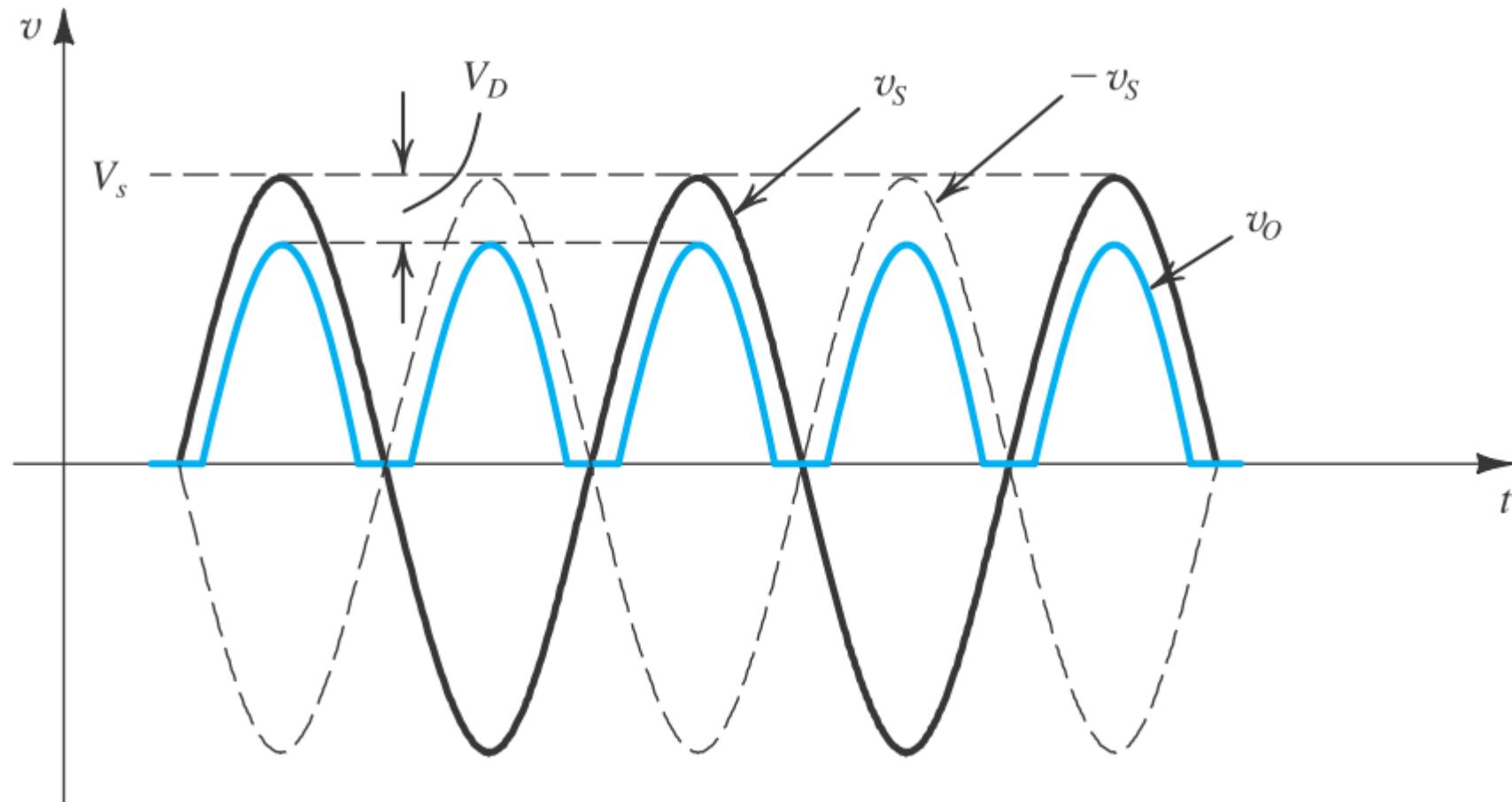
O sentido de corrente na carga é sempre positivo

Tensão reversa

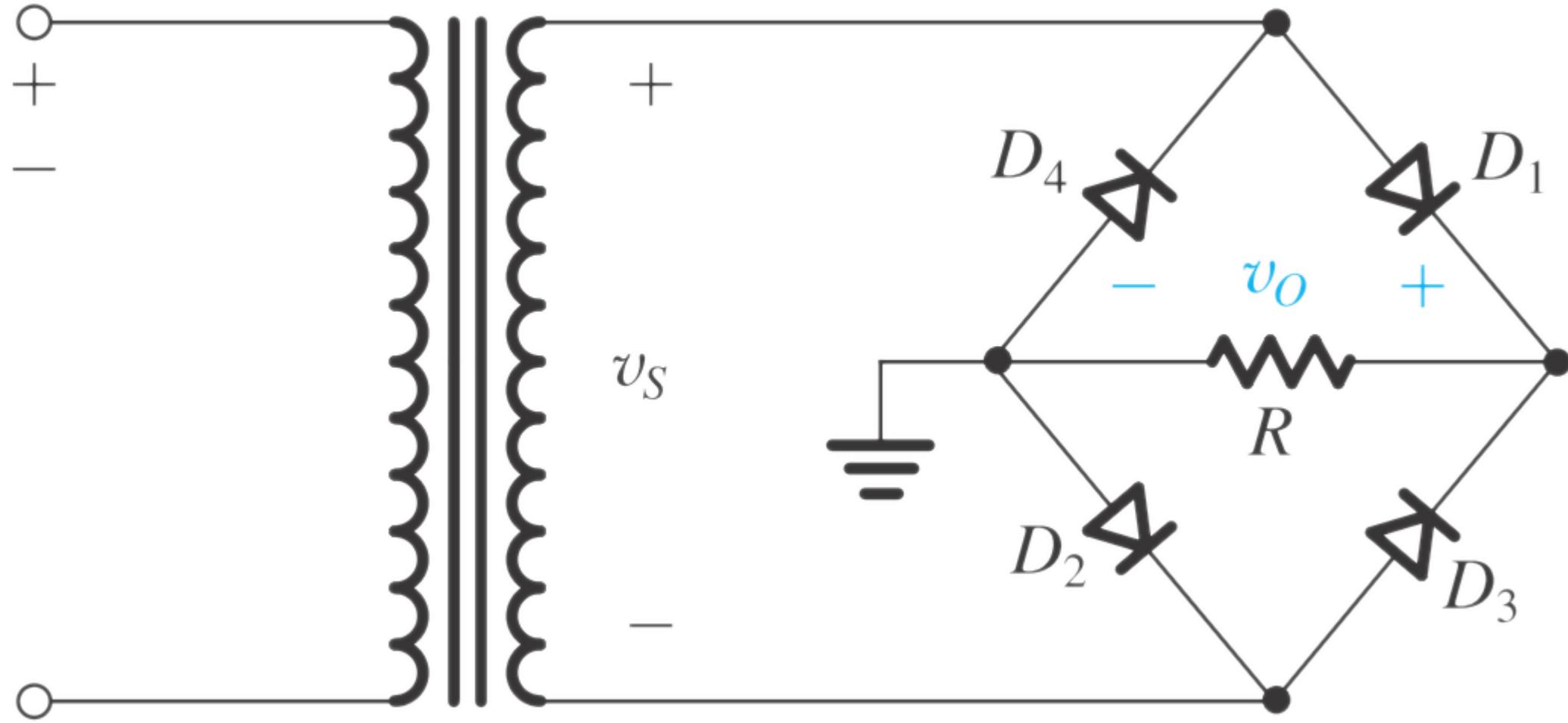
- Note que agora a tensão reversa máxima nos diodos é o dobro da tensão de pico
- Ao mesmo tempo que a tensão em um terminal é máxima, no outro é mínima!

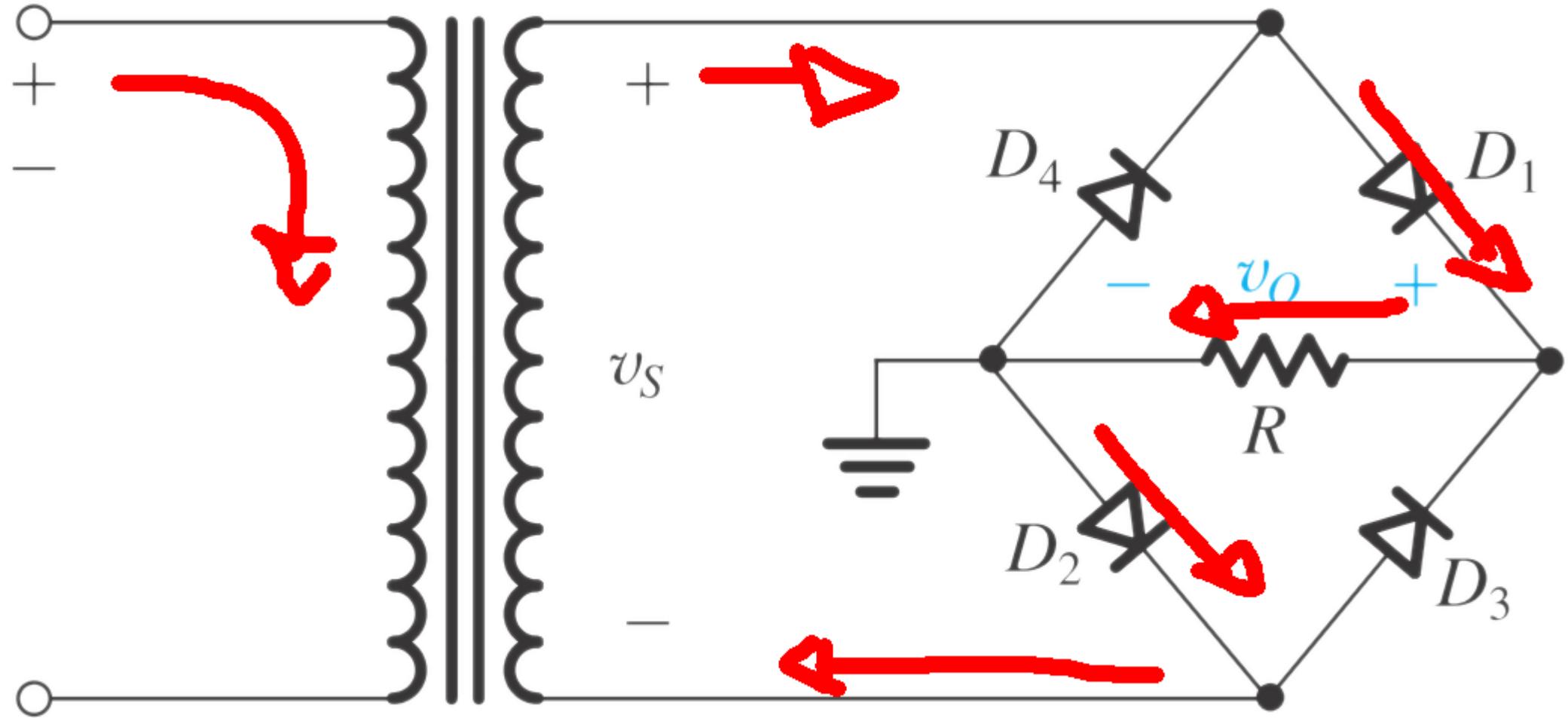


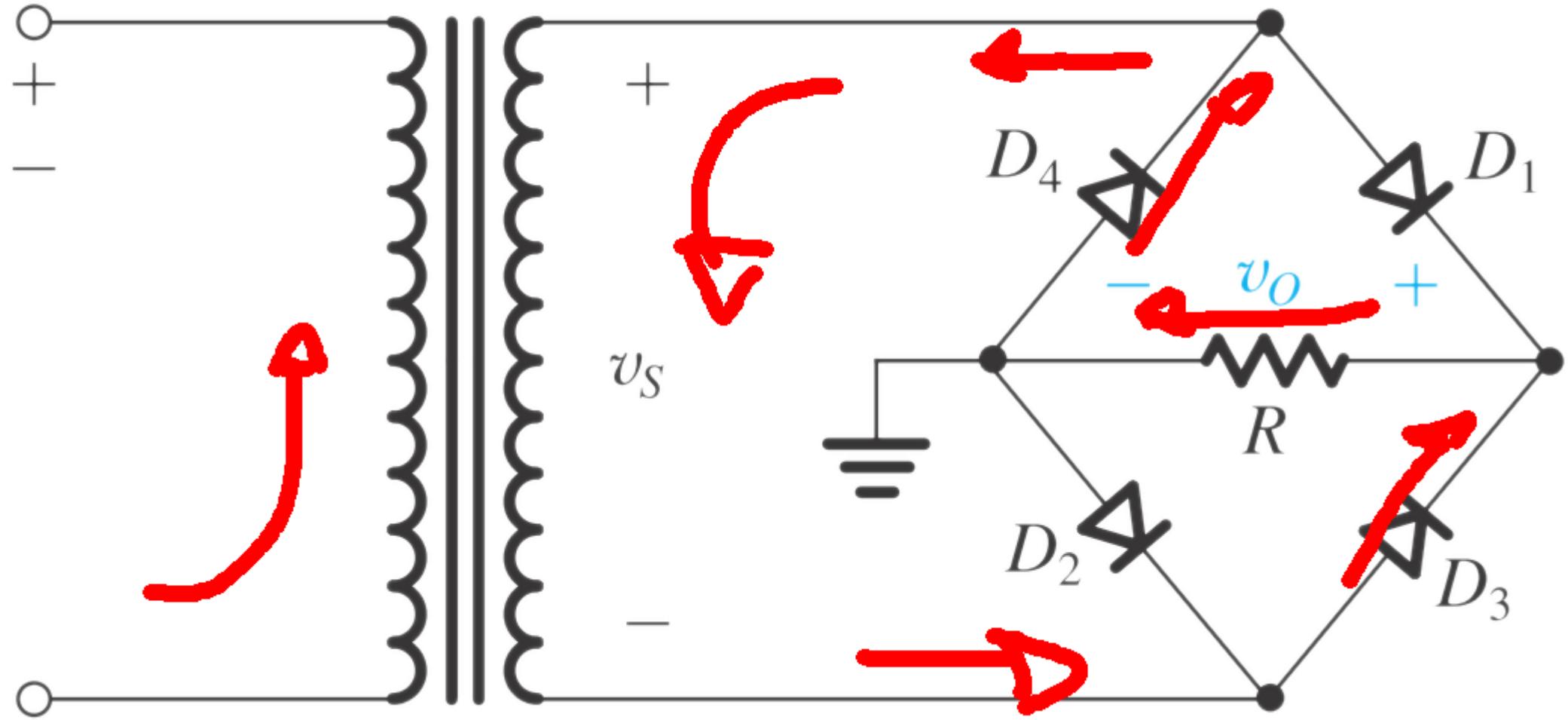
Forma de onda na saída

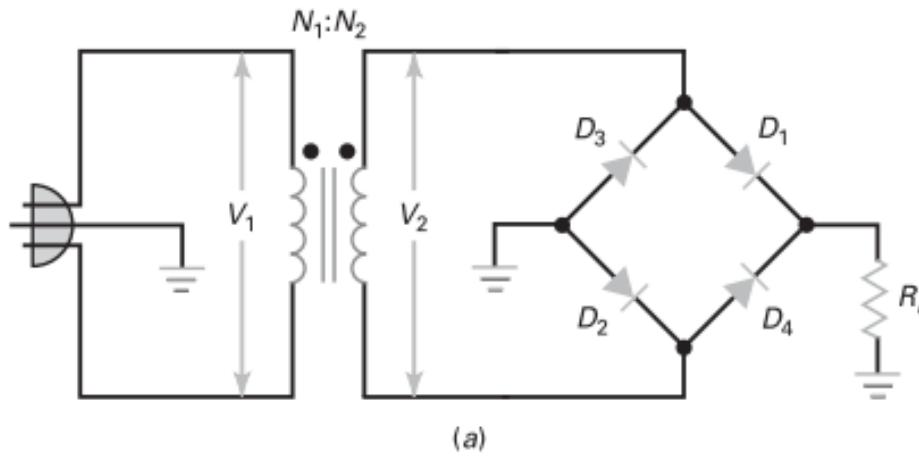


Retificador em ponte

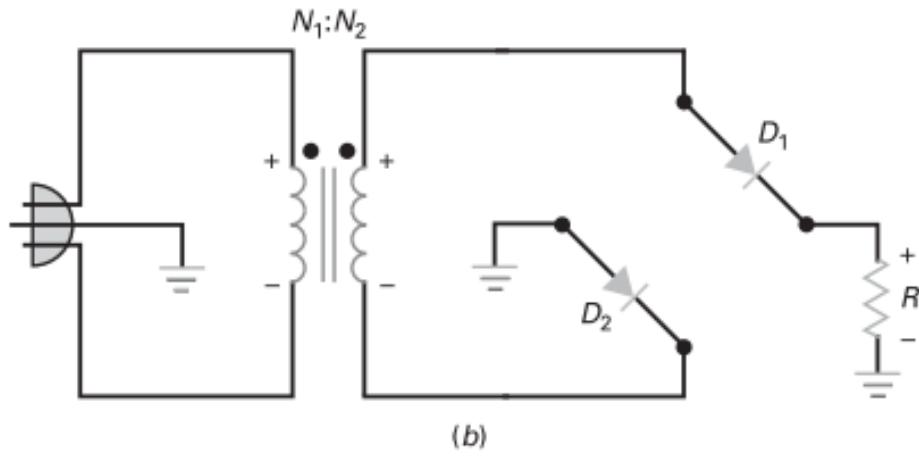




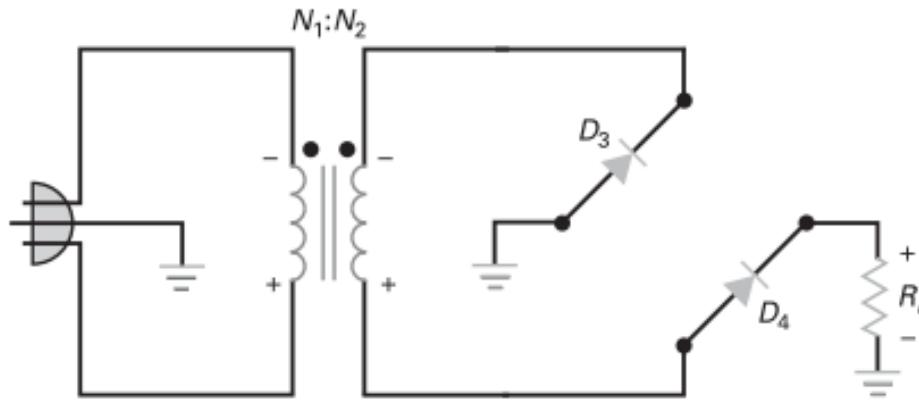




(a)



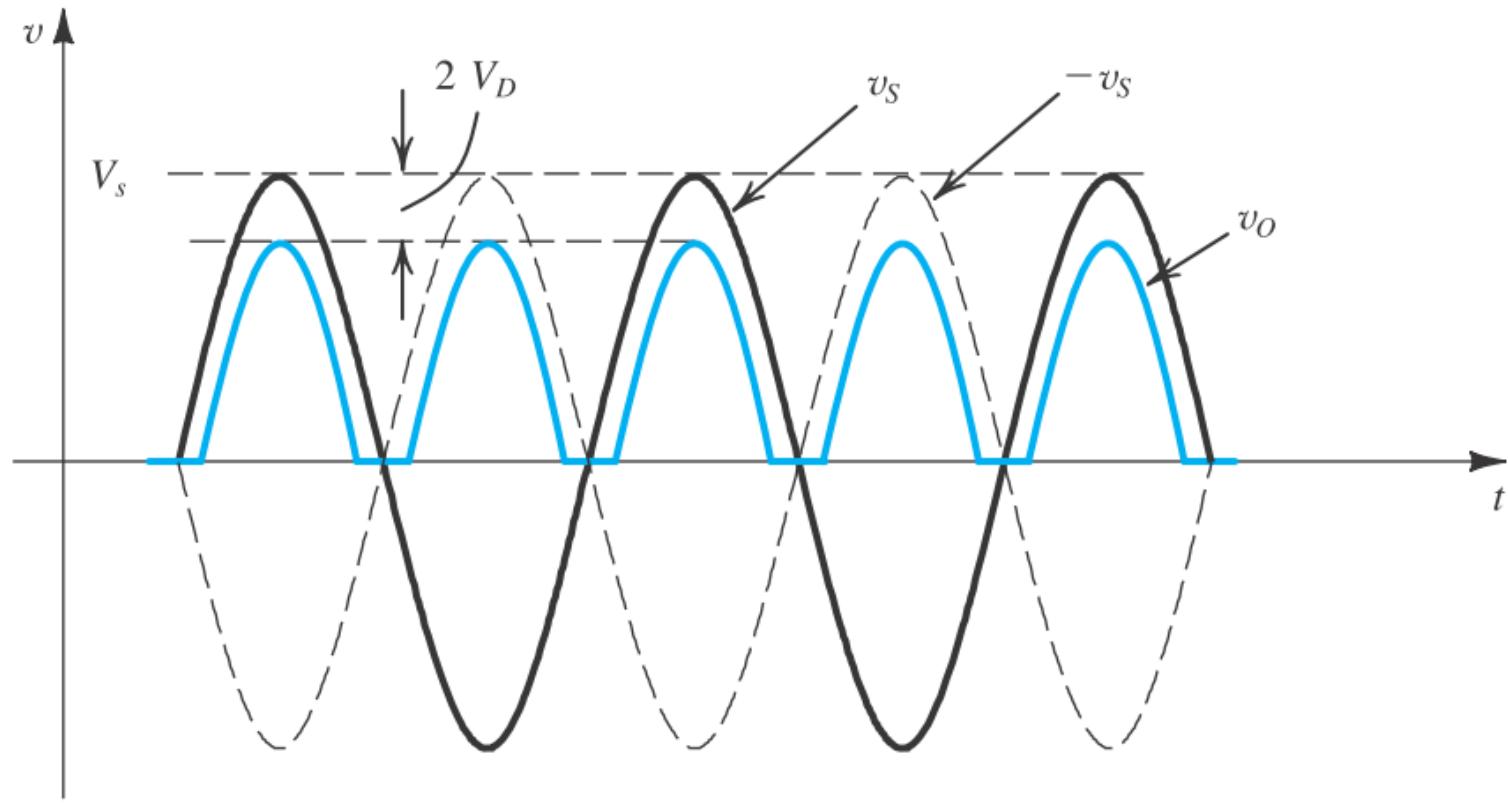
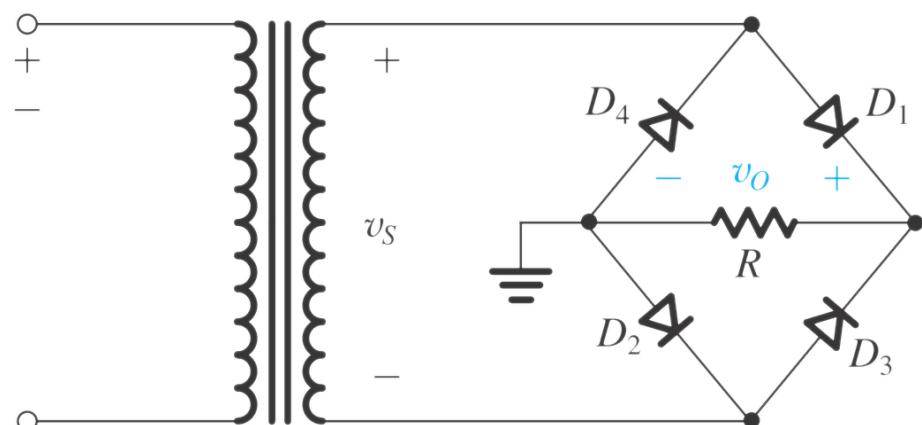
(b)



(c)

Retificador em ponte

- Sem necessidade de terminação central
- A tensão de saída é sempre positiva, para os dois semi-ciclos
- A queda é de dois diodos

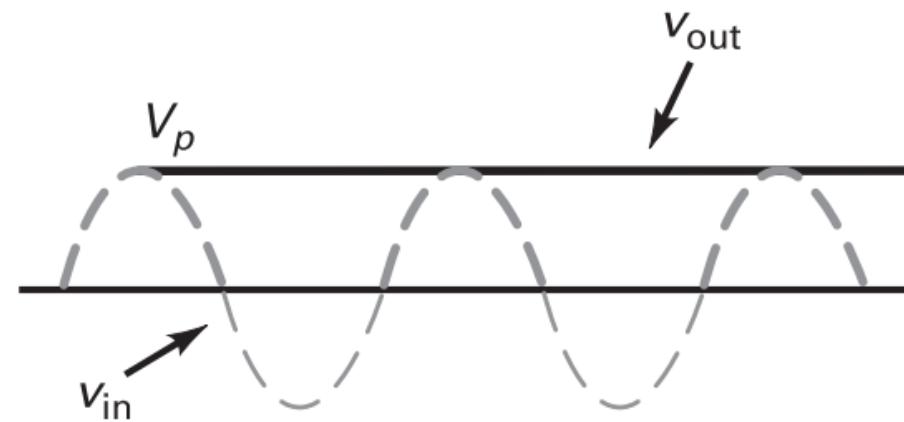
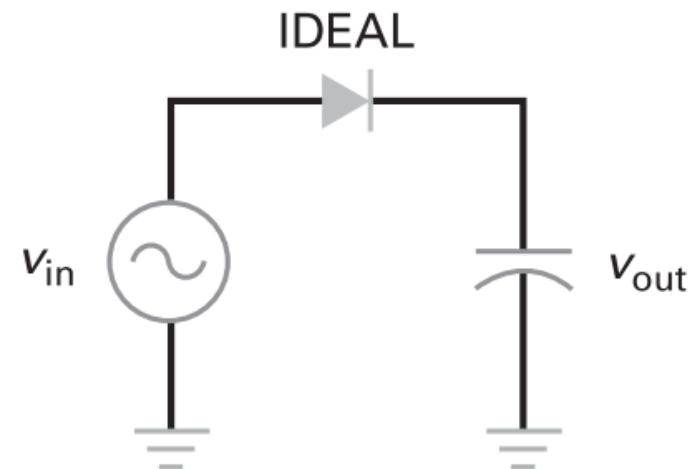


Formas CC de saída

- Apesar de apresentarem formas de onda CC na saída, estas formas apresentam muitas distorções
- Espera-se de uma fonte CC uma forma de onda com valor CC constante e não pulsante como apresentado

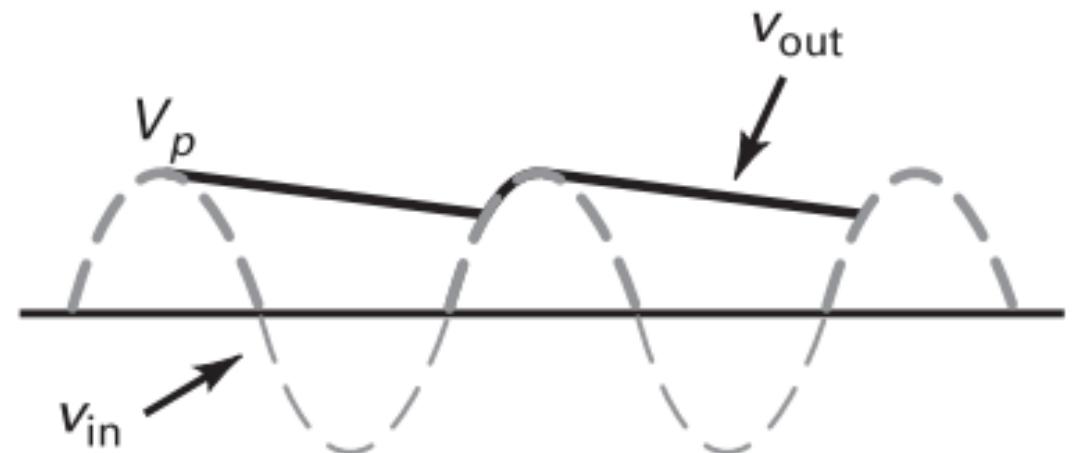
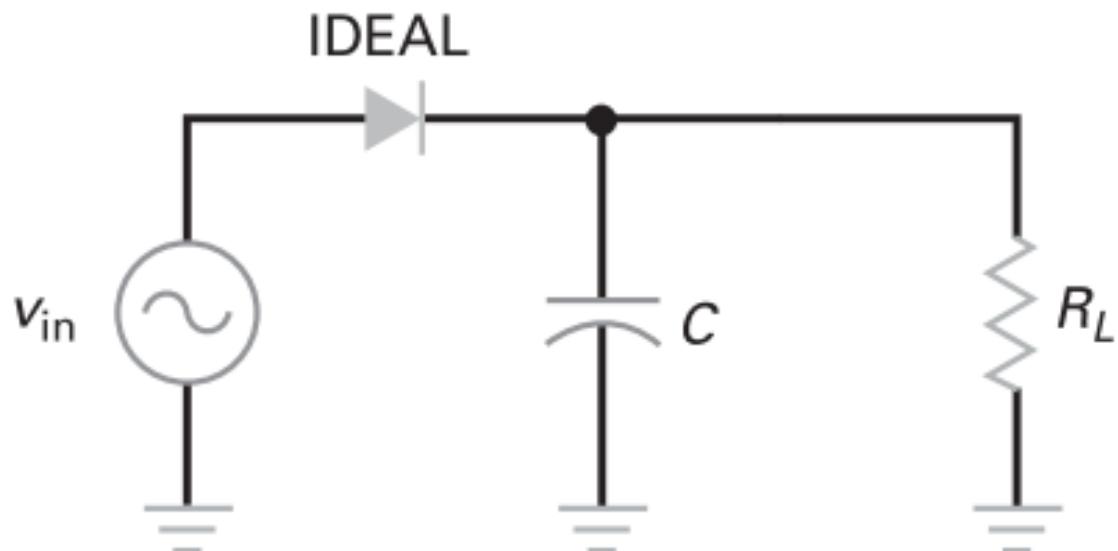
Formas CC de saída

- Apesar de apresentarem formas de onda CC na saída, estas formas apresentam muitas distorções
- Espera-se de uma fonte CC uma forma de onda com valor CC constante e não pulsante como apresentado
- A solução está em acoplar um capacitor à saída do retificador, de forma a filtrar a forma de onda de saída



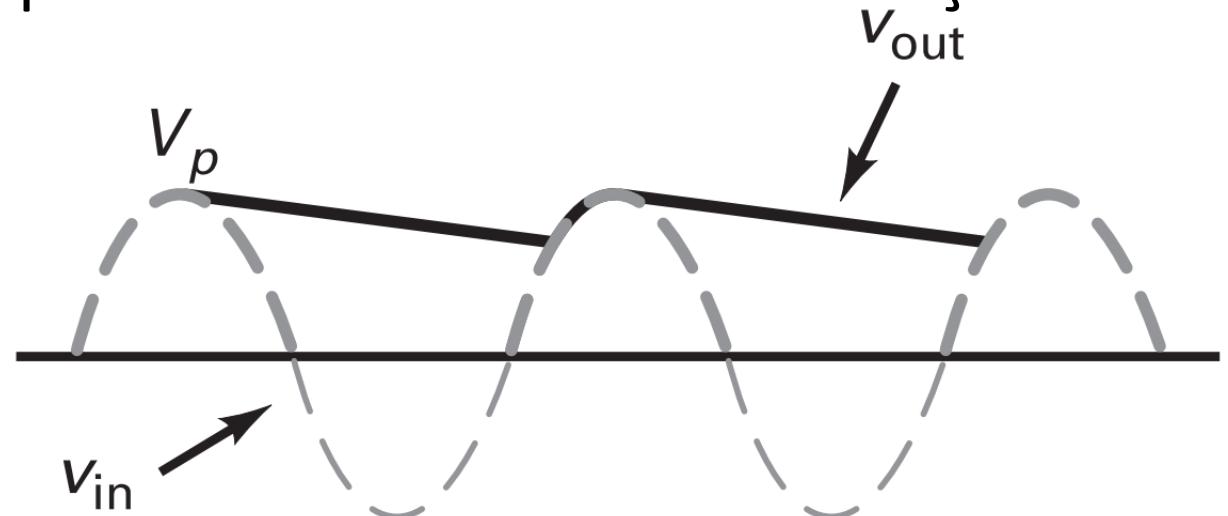
Retificador de pico

- Nesta configuração, o capacitor alimenta a carga durante o período que a tensão vinda da fonte for menor que a tensão no capacitor, voltando a carregar no pico da onda de entrada.



Relembrando o comportamento do capacitor

- O capacitor apresenta um comportamento diferencial na relação tensão-corrente
- $I_C = C \frac{d\nu}{dt}$
- Aproximando:
- $I_C = C \frac{\Delta\nu}{\Delta t}$
- Portanto, aproximando para uma corrente constante na carga, a variação de tensão na saída é $\Delta\nu$ no tempo Δt entre os picos de retificação
- Note que para retificador de onda completa, o período seria metade!

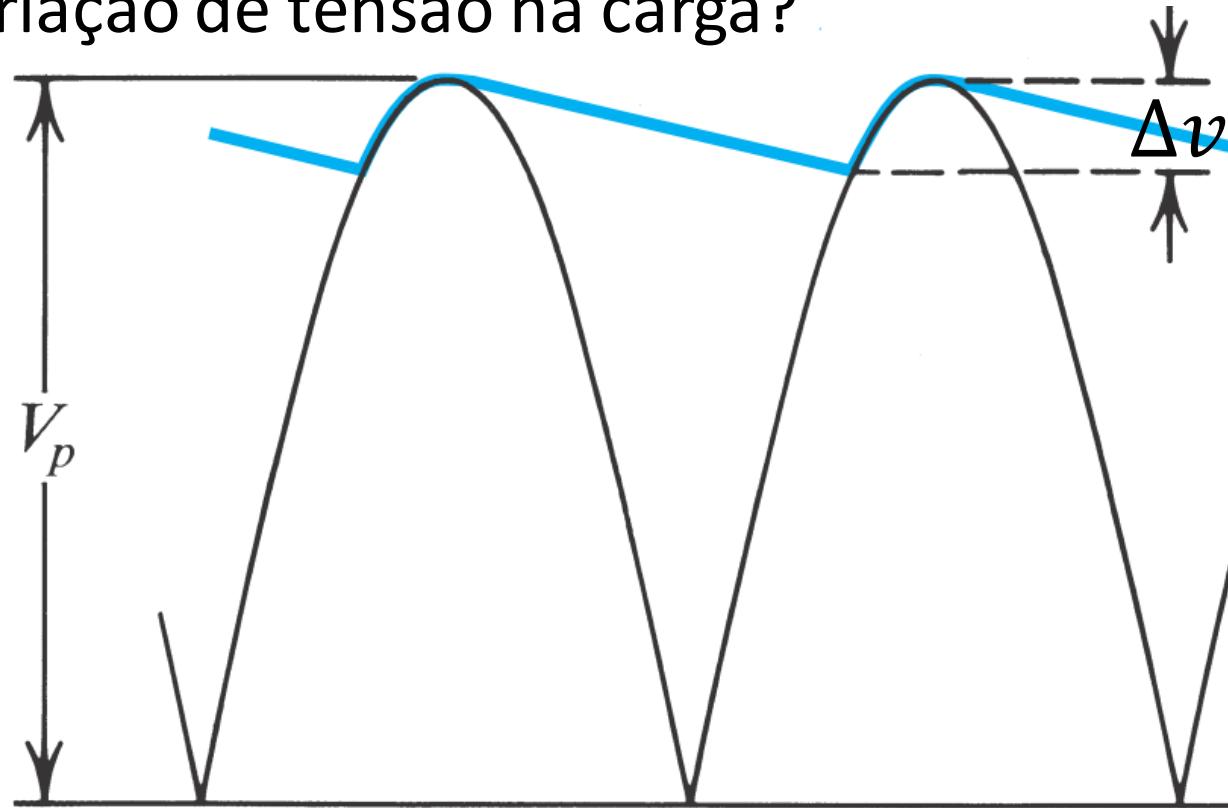


Exemplo

- Uma carga constante de 100mA é alimentada por um retificador de onda completa com $v_p=20V$ e capacitor de $680\mu F$, qual a variação de tensão na carga?

Exemplo

- Uma carga constante de 100mA é alimentada por um retificador de onda completa com $v_p=20V$, $f=60Hz$ e capacitor de $680\mu F$, qual a variação de tensão na carga?



Exemplo

- Note que por ser onda completa, a frequência de picos é o dobro da frequência da senóide de entrada
- Com uma carga constante de 100mA, aplicamos $I_C = C \frac{\Delta v}{\Delta t}$

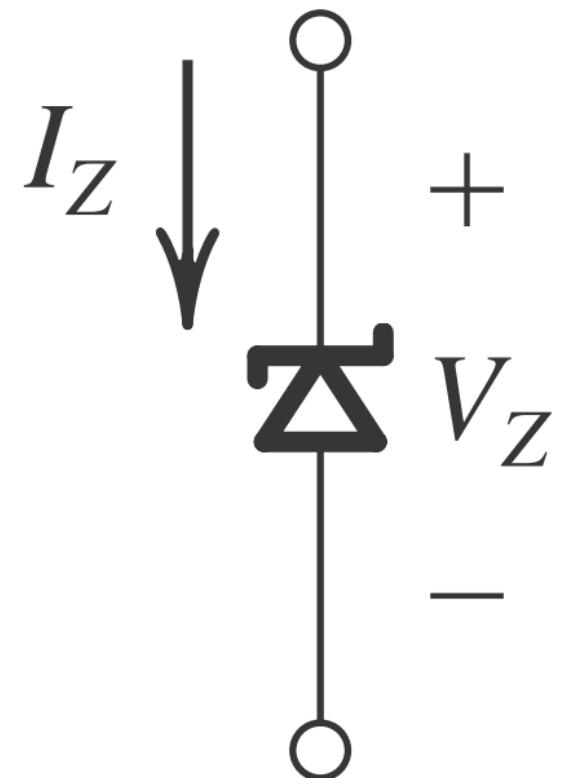
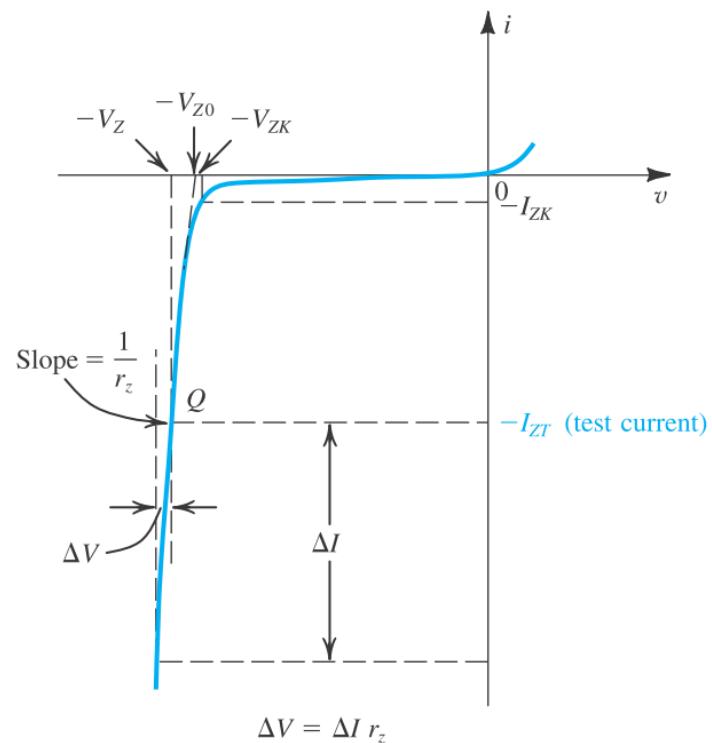
$$100mA = 680\mu F \frac{\Delta v}{\frac{1}{120}}$$

$$\Delta v = 1,2255V$$



Diodo Zener

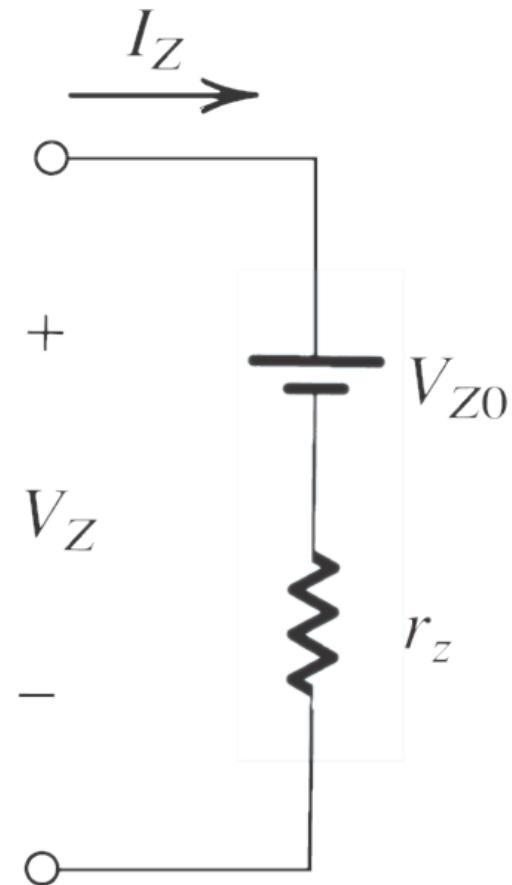
- Um tipo especial de diodo que é utilizado para fornecer referências de tensão com valores variados
- Este tipo de diodo opera na região de ruptura reversa



Diodo Zener

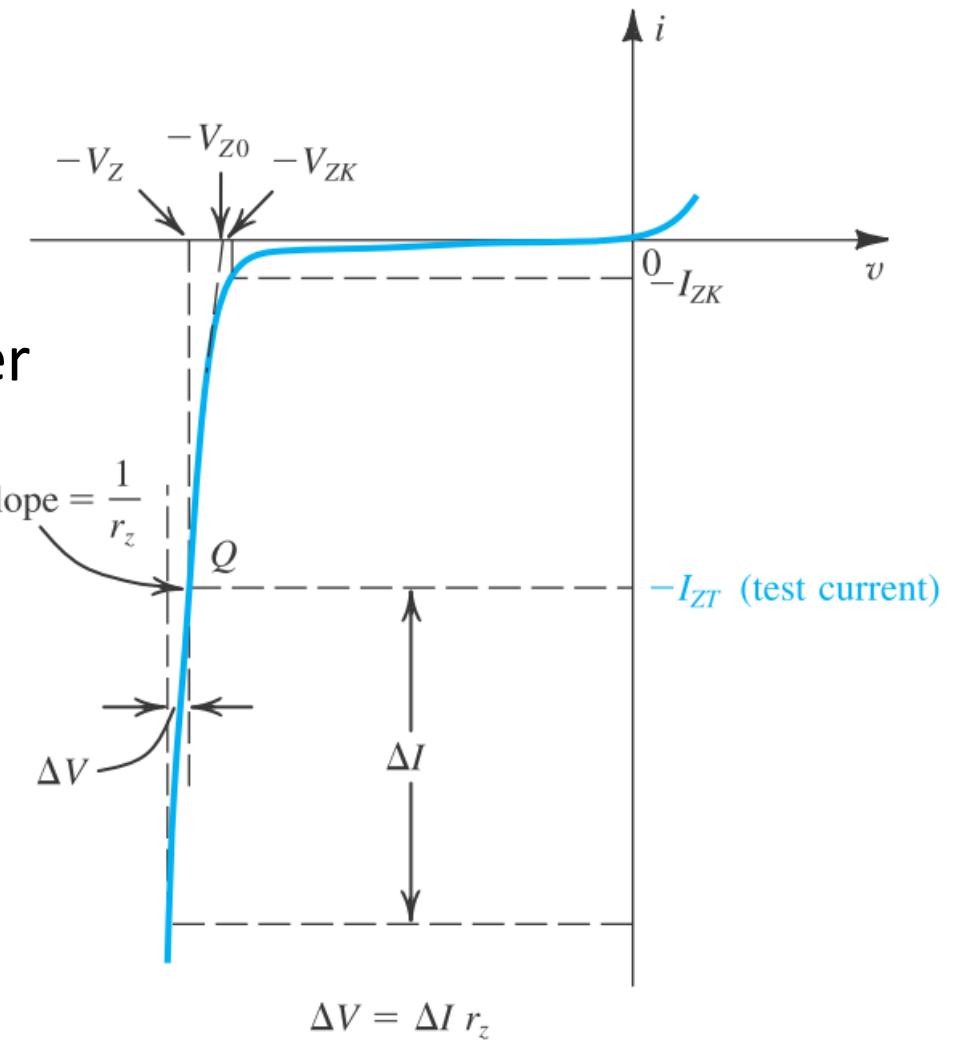
- O modelo para representar o diodo Zener é o do tipo bateria

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



Diodo Zener

- Parâmetros de projeto:
- V_{Z0} → cruzamento em zero da reta do modelo
- V_{ZK} → Tensão mínima para operação em modo Zener
- I_{ZK} → Corrente mínima para operação em modo Zener
- r_z → ‘resistência’ do modelo, define a relação $V*I$
- I_{ZT} → corrente que define a tensão nominal do diodo

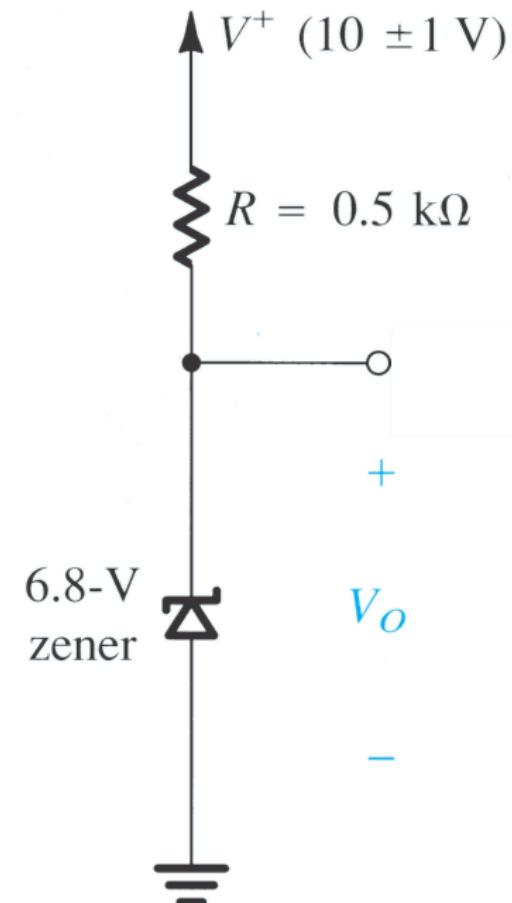


Diodo Zener

- Na região de polarização direta o diodo Zener se comporta como um diodo normal
- Na região de polarização reversa o diodo Zener trabalha na região de ruptura para fornecer um valor de tensão constante com magnitudes variadas dependendo de sua construção
- Apesar de projetado para trabalhar na região de ruptura, se exceder a potência de projeto ele irá estragar
- O Zener será apresentado pelo parâmetros V_z , I_z , r_z e I_{zK}
- Exemplo: Zener com $V_z=6,8V$ em $I_z=5mA$, $r_z=20\Omega$ e $I_{zK}=0,2mA$

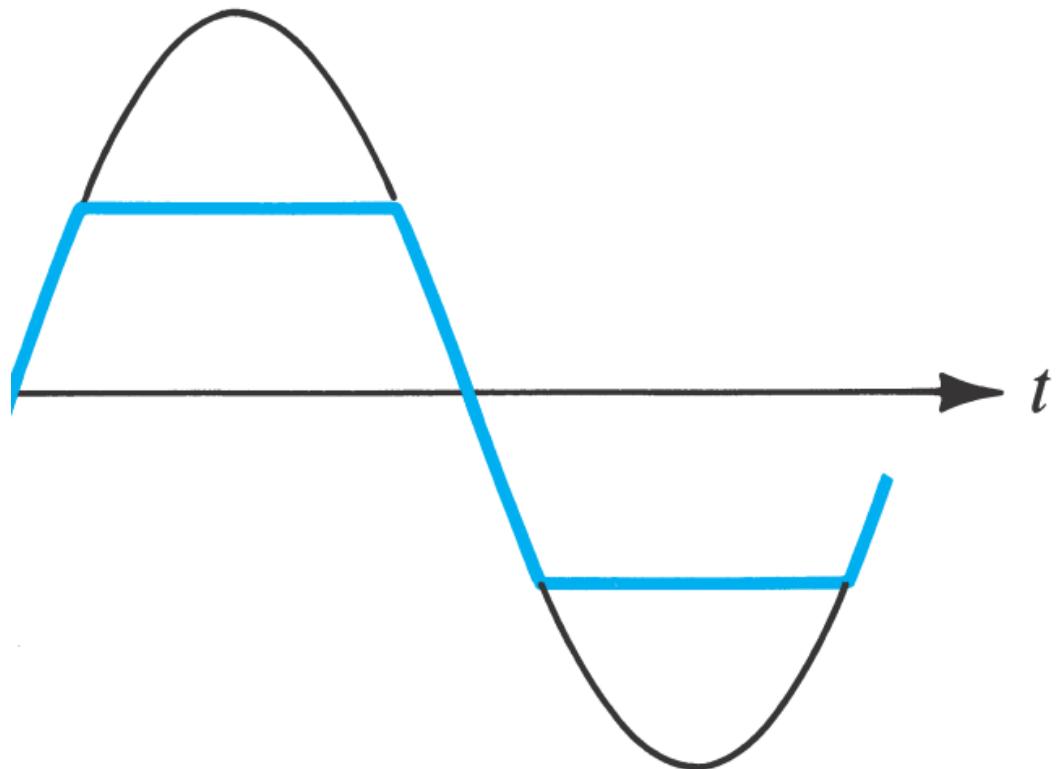
Exercício com diodo Zener

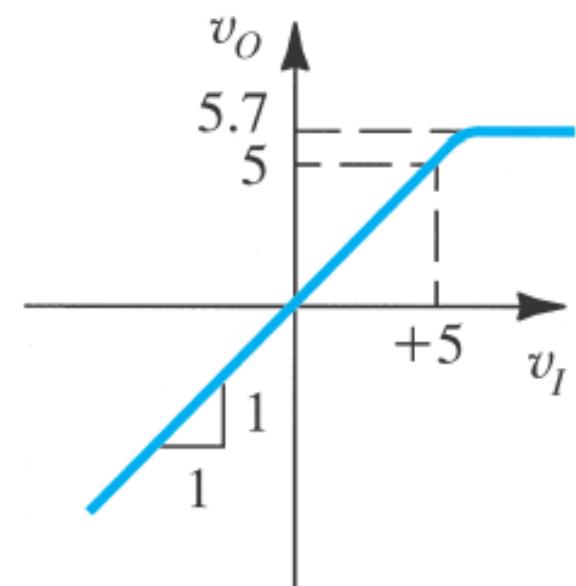
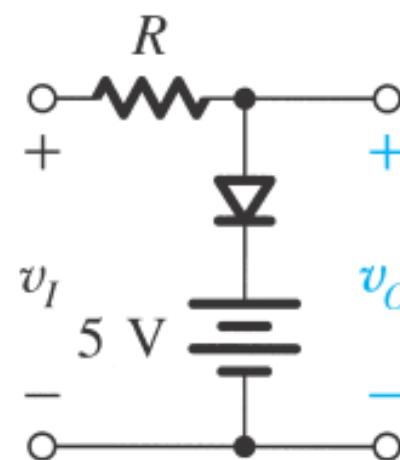
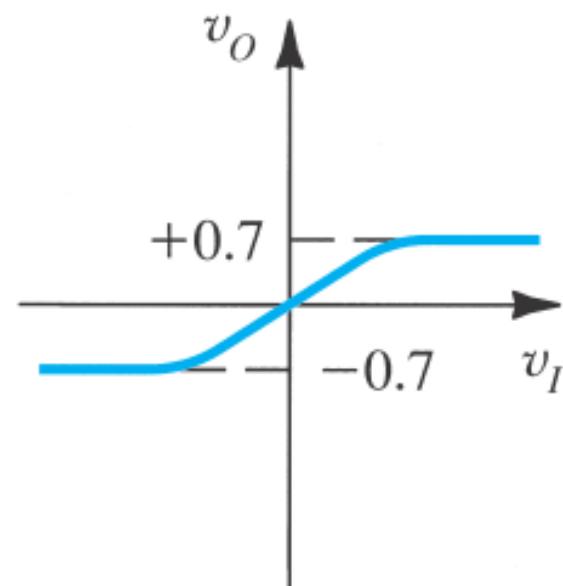
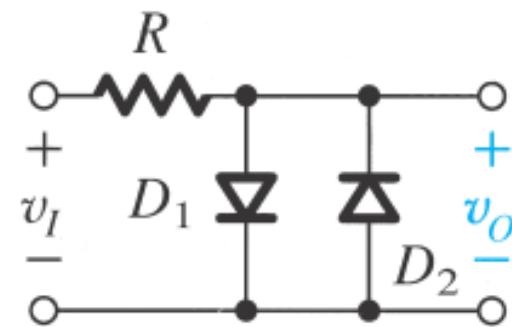
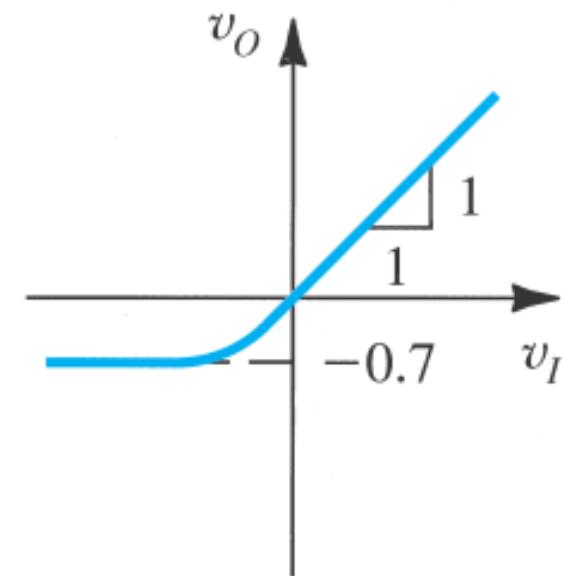
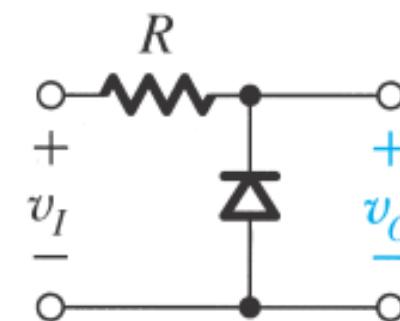
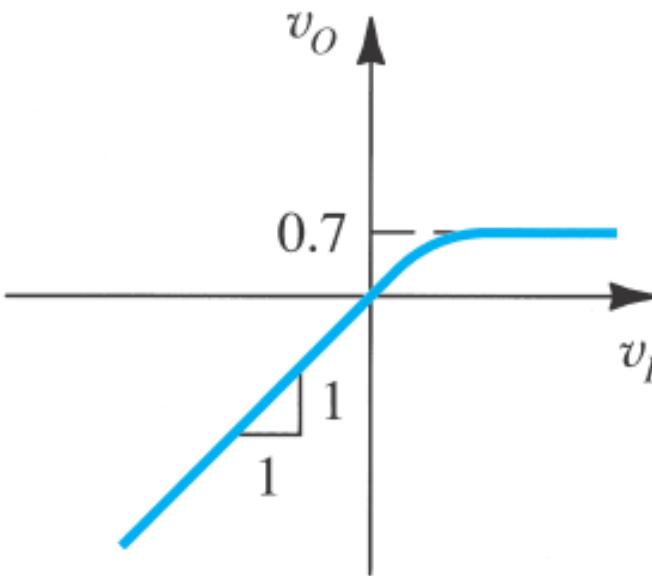
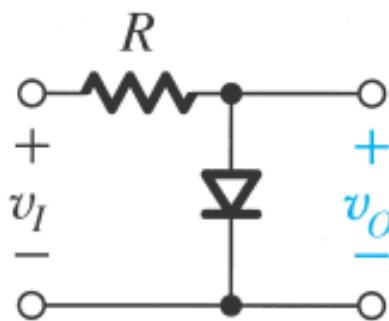
- Considere o Zener com $V_z=6,8\text{V}$ em $I_z=5\text{mA}$, $r_z=20\Omega$ e $I_{zK}=0,2\text{mA}$
- A fonte apresenta variação de 9 a 11V
- 1 Calcule a variação de tensão na saída (V_o)
- 2 Calcule qual seria a tensão exata de saída caso a fonte não apresentasse variação
- 3 Encontre a tensão de saída aplicando uma carga de 2k
- 4 Encontre qual a maior magnitude de corrente que pode ser drenada pelo terminal antes de perder o efeito zener no diodo

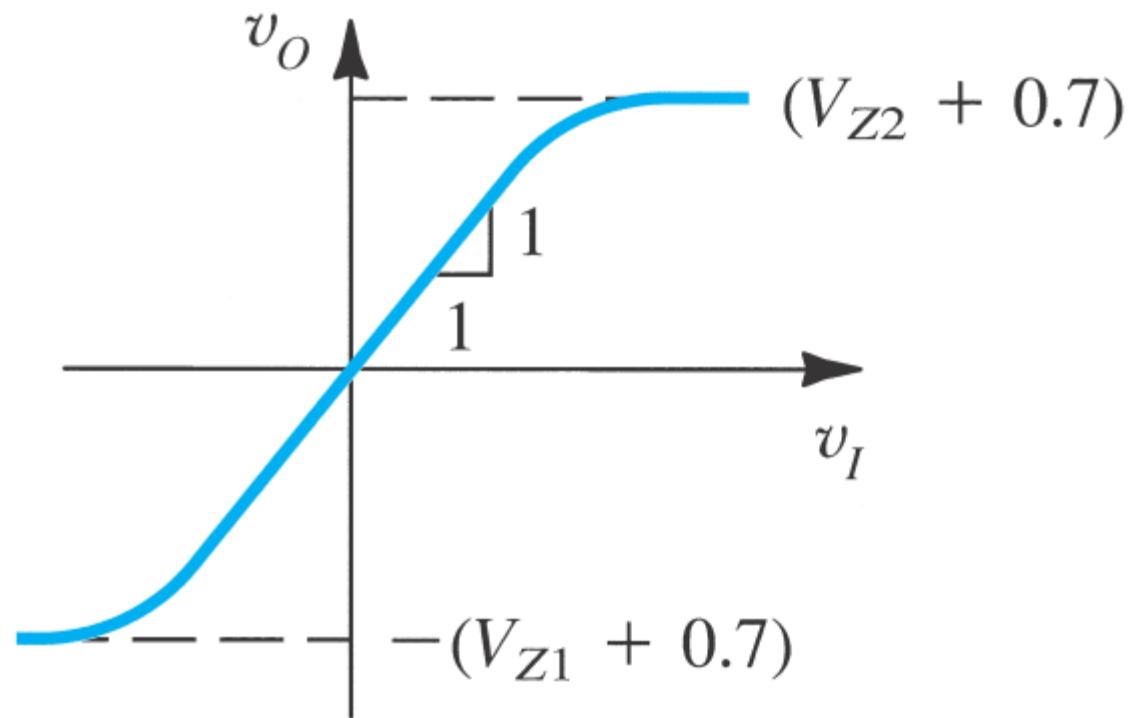
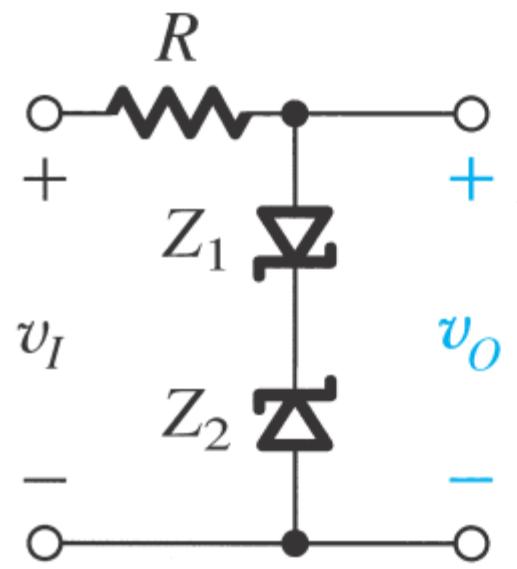


Circuitos limitadores

- Como o nome diz, são circuitos que limitam a excursão do sinal

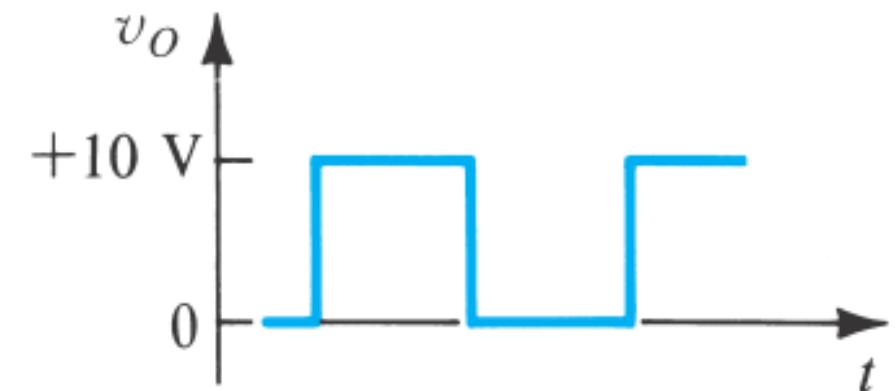
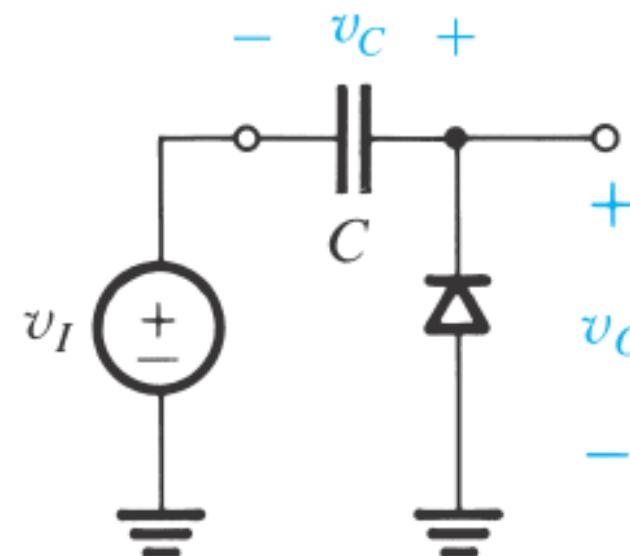
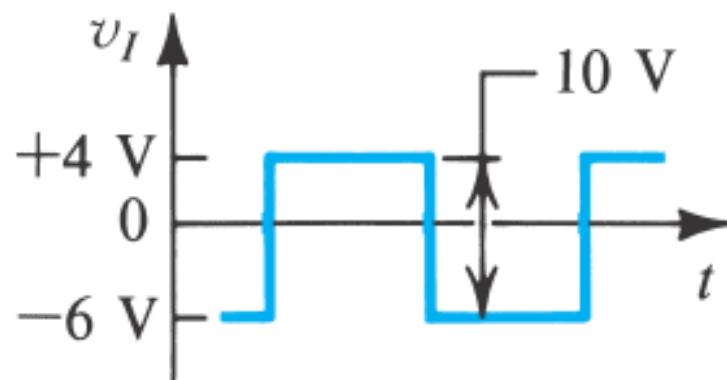






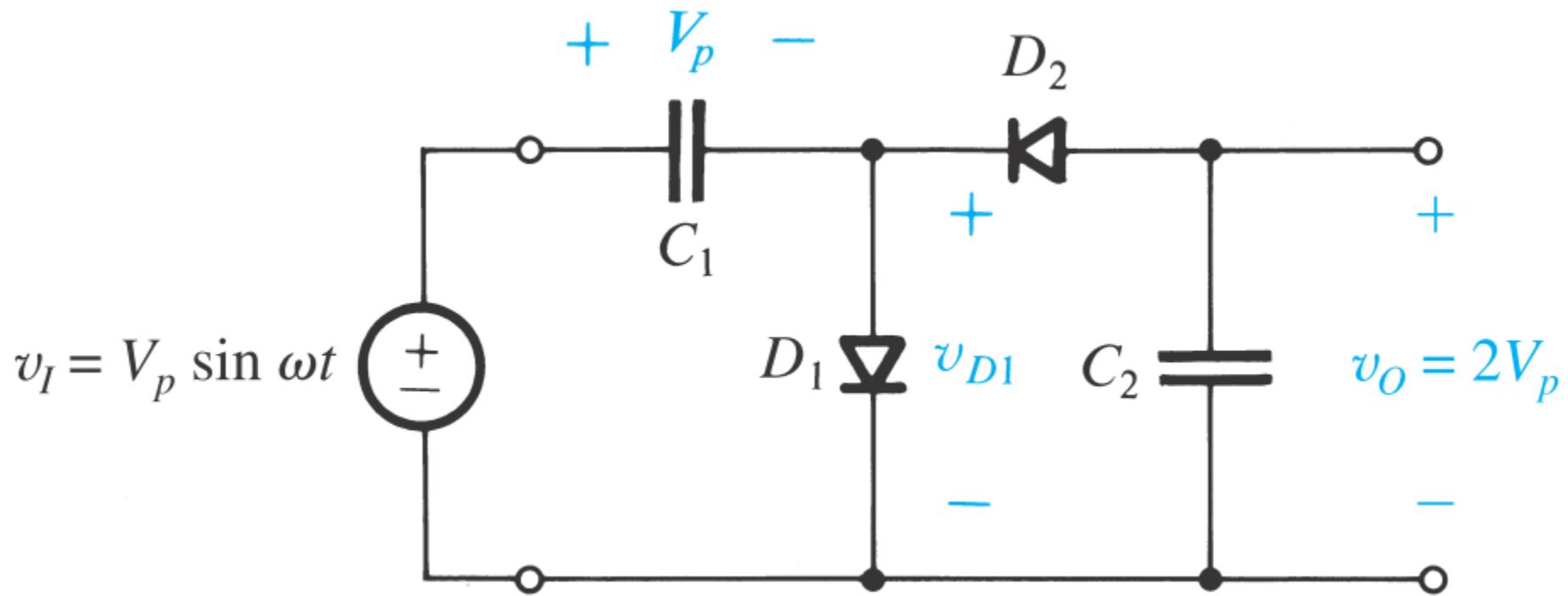
Circuito grampeador

- Também chamado de restaurador CC, recupera uma forma de onda para os patamares 0-V



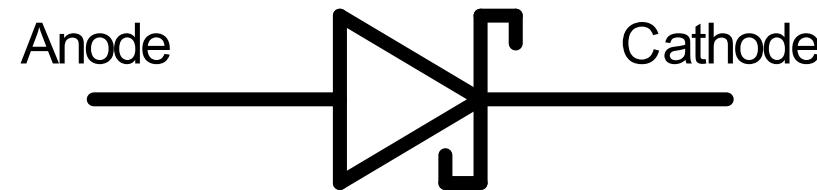
Dobrador de tensão

- Apresenta na saída uma tensão CC que é o dobro da tensão de pico do sinal de entrada



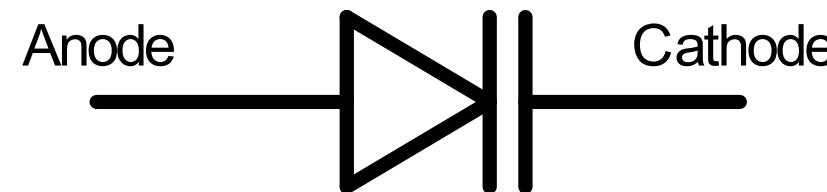
Tipos especiais de diodos

- Diodo de barreira Shottky
 - Formados por uma junção de metal a um semicondutor do tipo n moderadamente dopado, e não fortemente dopado como no diodo comum
 - Resultam em tempos de resposta menores e menor queda de tensão
 - Apresentam baixos valores de tensão reversa máxima
 - maior corrente de fuga reversa



Tipos especiais de diodos

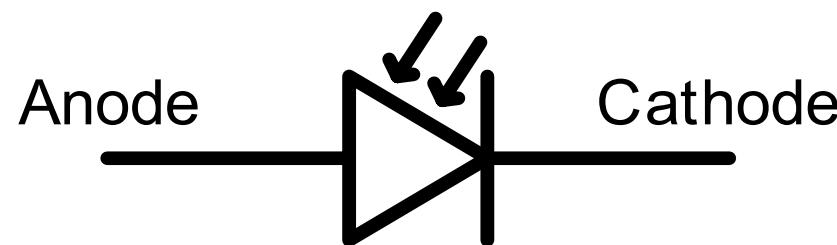
- Varactor
 - Aproveita a característica de acumulo de carga de uma junção pn polarizada reversamente
 - Se comporta como um capacitor controlado por tensão
 - Aplicados em sistemas sintonizadores de RF



Tipos especiais de diodos

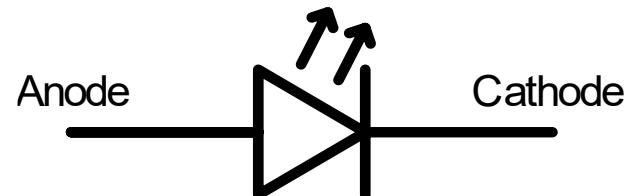
- Fotodiodo

- A luz incidente em uma junção pn reversamente polarizada aumenta a quantidade de portadores minoritários, assim aumentando a condutividade
- Aplicados como detector de luz



Tipos especiais de diodos

- LED
- Diodo emissor de luz
- Aproveita da característica dos elétrons de liberar fótons quando saltam de uma camada para outra



- Aplicados em conjunto com fotodiodos formam um fotodetector ou um optoacoplador

