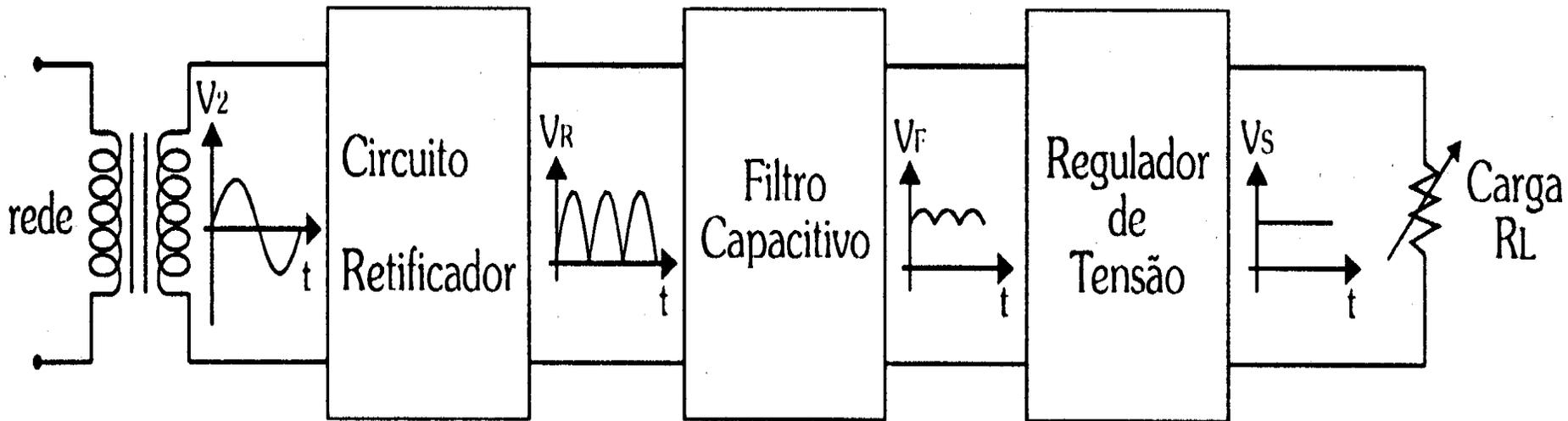


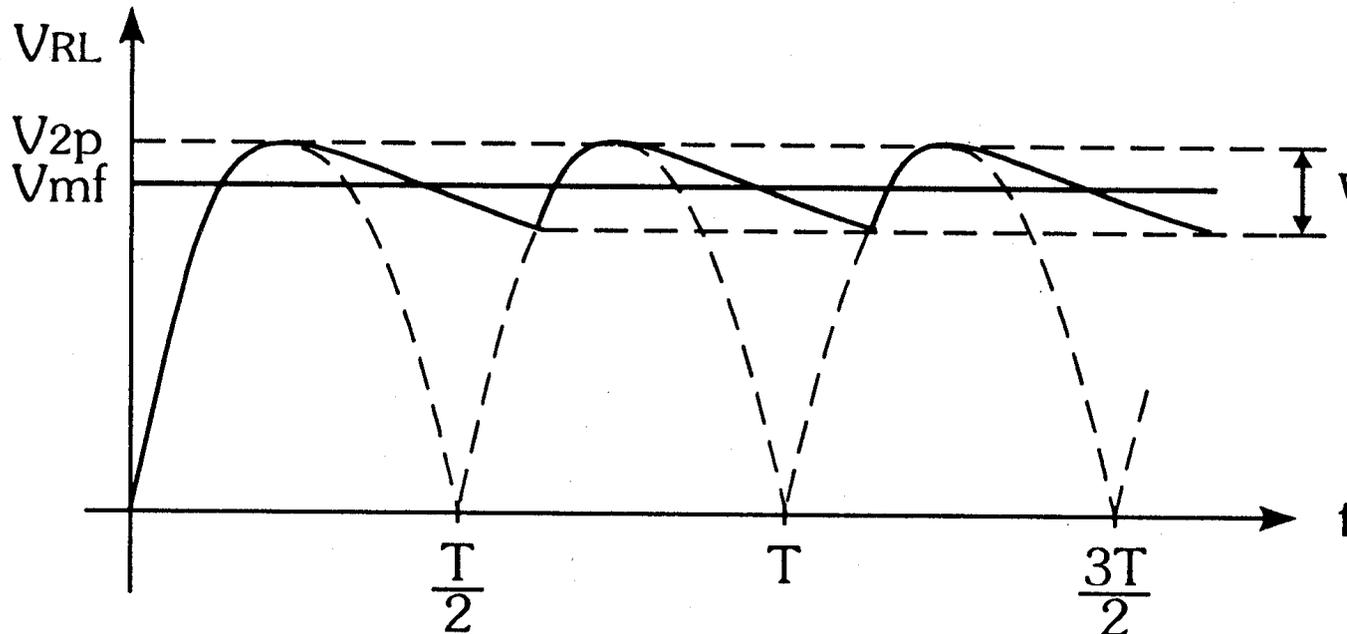
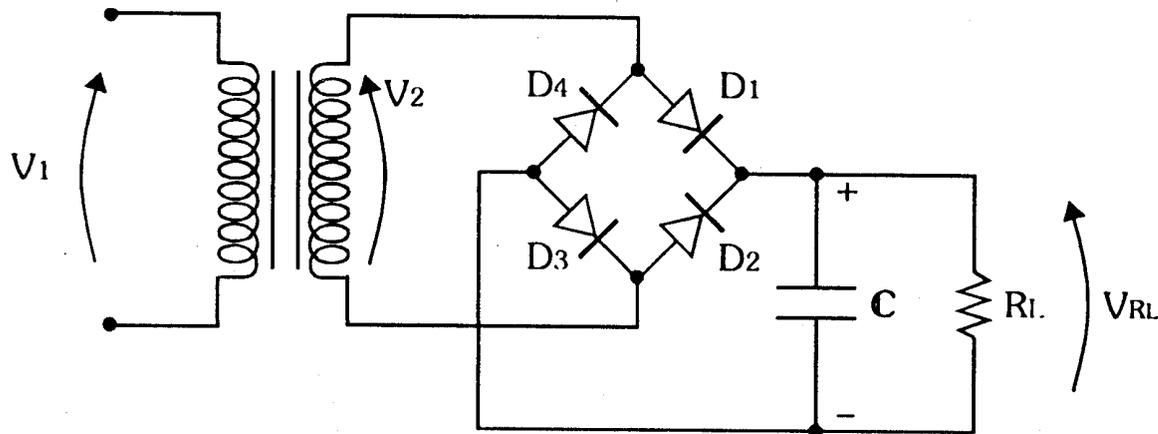
4. Reguladores de tensão

Fonte de alimentação estabilizada



Fonte de Alimentação Estabilizada

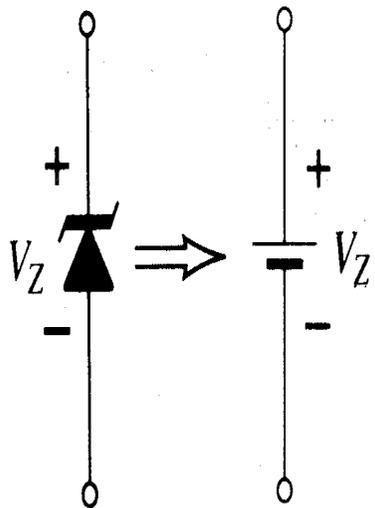
Filtro capacitivo



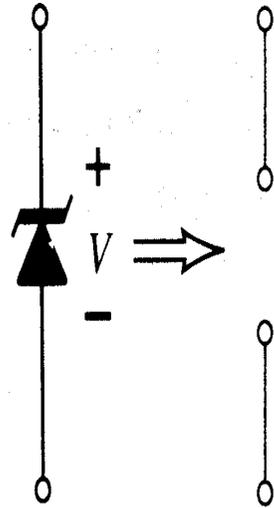
$V_r = \text{Ripple}$

$$V_r = \frac{V_{mf}}{f \cdot R_L \cdot C}$$

DIODOS ZENER

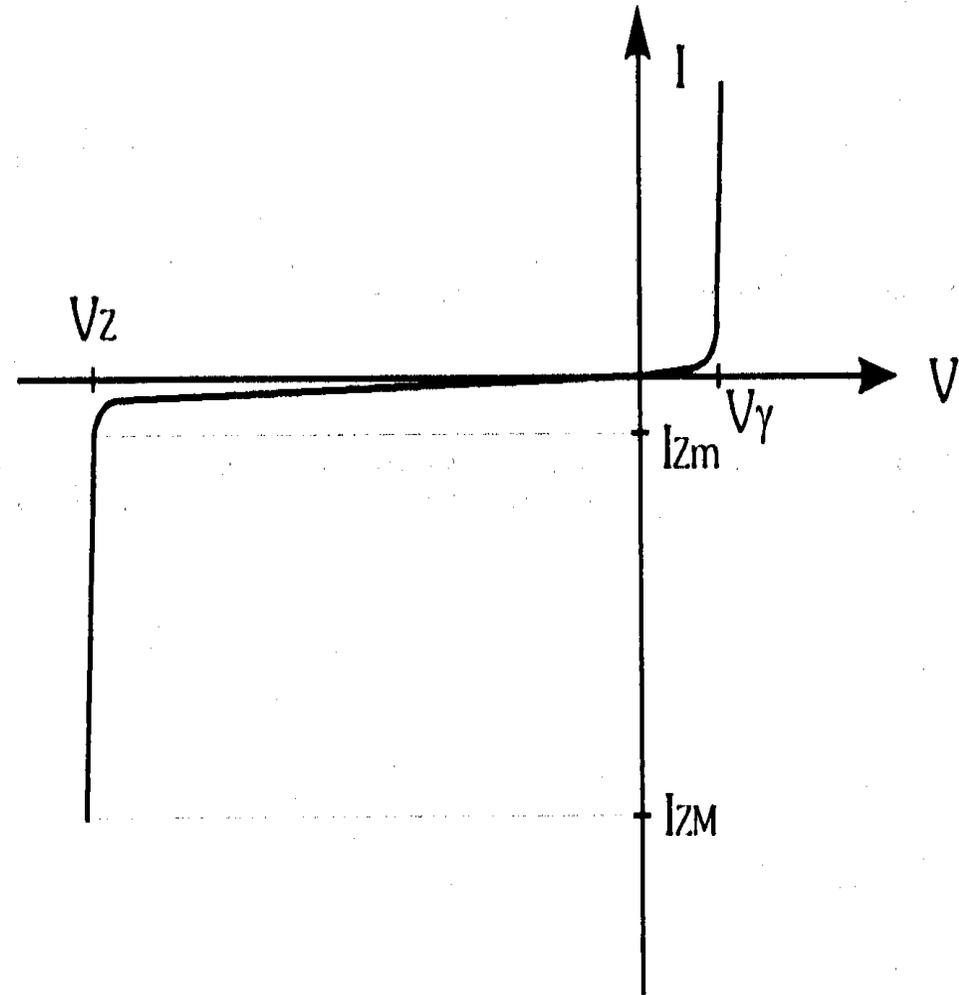


"on"



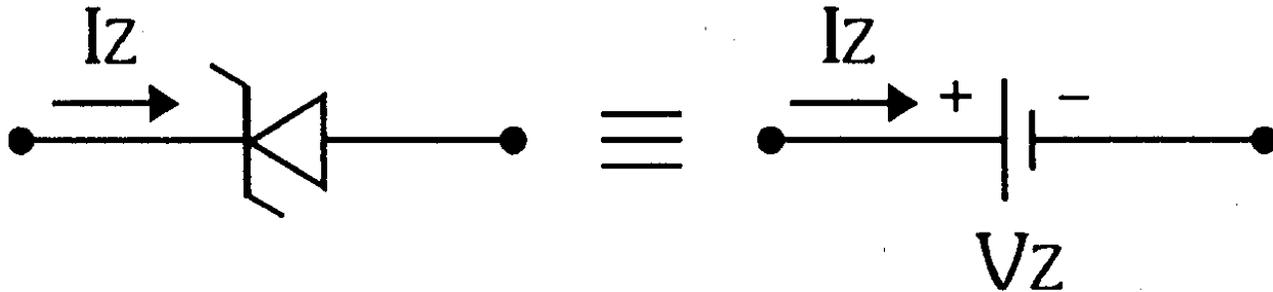
$(V_Z > V > 0V)$

"off"

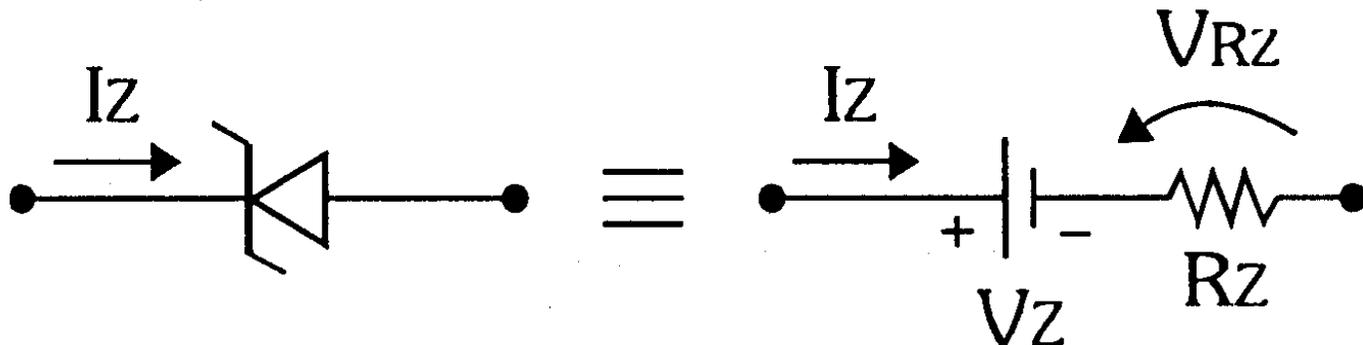


MODELOS DO DIODO ZENER

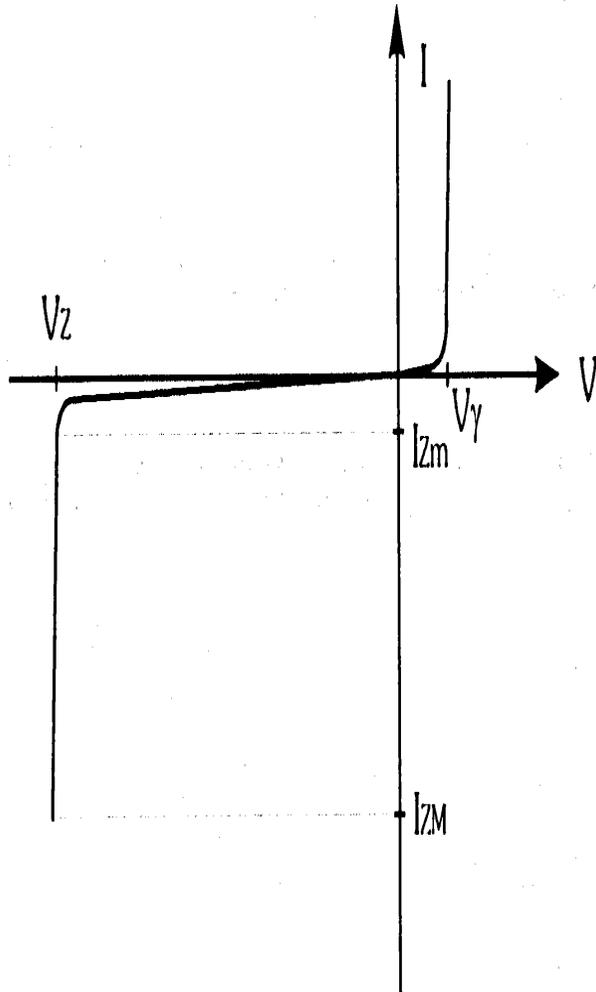
■ MODELO IDEAL



■ MODELO LINEAR



Características do diodo zener



1) V_γ - Tensão de condução na polarização direta ($V_\gamma = 0,7 \text{ V}$)

2) V_z - Tensão zener (dada pelo fabricante)

Como V_z sofre uma pequena variação em função de I_z , o fabricante fornece um valor obtido por uma corrente de teste I_{zT} (considerada como a corrente zener mínima).

3) I_{zM} - Corrente zener máxima (dada pelo fabricante)

4) I_{zm} ou I_{zK} - Corrente zener mínima ou corrente zener de teste

Caso não seja dado o valor de I_{zK} , considera-se I_{zm} como sendo 10% de I_{zM} , ou seja:

$$I_{zm} = 0,1 \cdot I_{zM}$$

5) P_{zM} - Potência zener máxima (dada pelo fabricante)

O diodo zener dissipa esta potência quando sua corrente atinge o valor I_{zM} , ou seja:

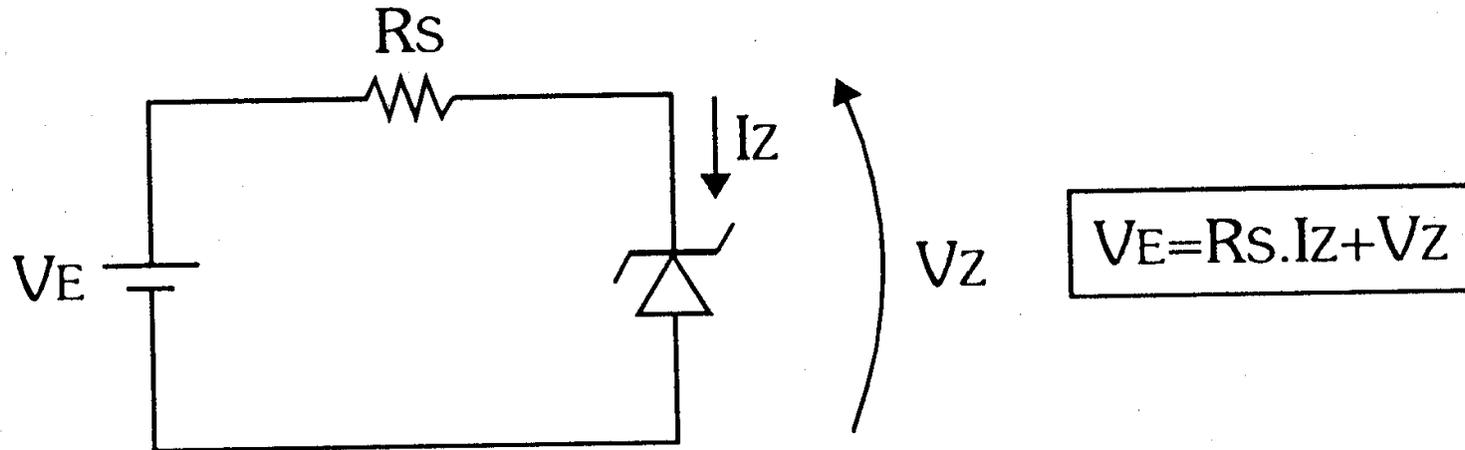
$$P_{zM} = V_z \cdot I_{zM}$$

6) R_z - Resistência zener (dada pelo fabricante)

Esta resistência reflete a pequena variação de V_z em função de I_z e pode ser calculada por:

$$R_z = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z}$$

DIODO ZENER COMO REGULADOR DE TENSÃO



- 1) O diodo zener **não regula** caso a **corrente** que passa por ele seja **menor** que a corrente zener mínima I_{Zm} . Esta condição limita o valor mínimo da tensão de entrada (V_{Em}) e o valor máximo da resistência limitadora de corrente (R_{SM}), ou seja:

$$V_{Em} = R_{SM} \cdot I_{Zm} + V_Z$$

- 2) O diodo zener se **danifica** caso a **corrente** que passa por ele seja **maior** que a corrente zener máxima I_{ZM} , ou caso a **potência dissipada** por ele seja **maior** que a potência zener máxima P_{ZM} . Esta condição limita o valor máximo da tensão de entrada (V_{EM}) e o valor mínimo da resistência limitadora de corrente (R_{Sm}), ou seja:

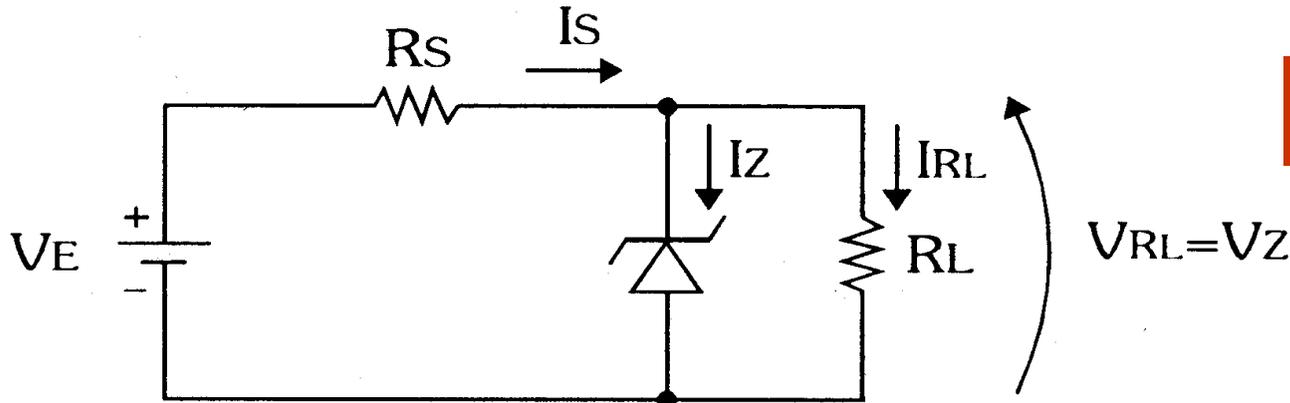
$$V_{EM} = R_{Sm} \cdot I_{ZM} + V_Z$$

DIODO ZENER COMO REGULADOR DE TENSÃO

- CIRCUITOS COM $R_L = \text{constante}$ e $V_E = \text{constante}$
- CIRCUITOS COM $R_L = \text{variável}$ e $V_E = \text{constante}$
- CIRCUITOS COM $R_L = \text{constante}$ e $V_E = \text{variável}$
- CIRCUITOS COM $R_L = \text{variável}$ e $V_E = \text{variável}$

$V_E = \text{variável} \rightarrow \text{Ripple}$

CIRCUITOS COM $R_L = \text{constante}$ e $V_E = \text{constante}$



$$R_{Sm} \leq R_s \leq R_{SM}$$

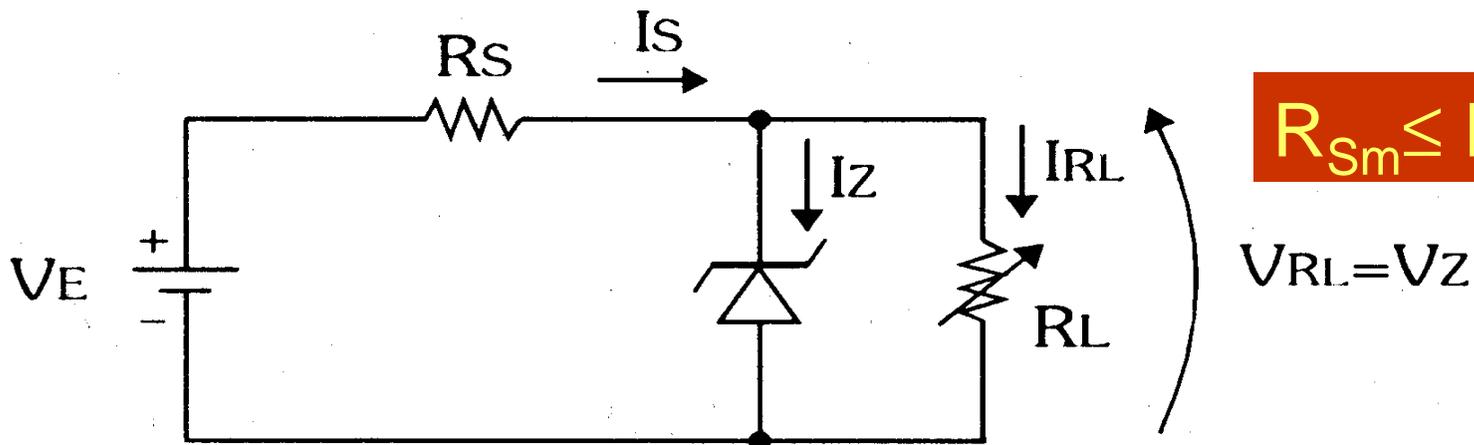
- Corrente zener mínima $I_{zm} \rightarrow R_{SM}$ (máximo)

$$R_{SM} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Zm} + I_{RL}}$$

- Corrente zener máxima $I_{zM} \rightarrow R_{sm}$ (mínimo)

$$R_{Sm} = \frac{V_E - V_Z}{I_{zM} + I_{RL}}$$

CIRCUITOS COM $R_L = \text{variável}$ e $V_E = \text{constante}$



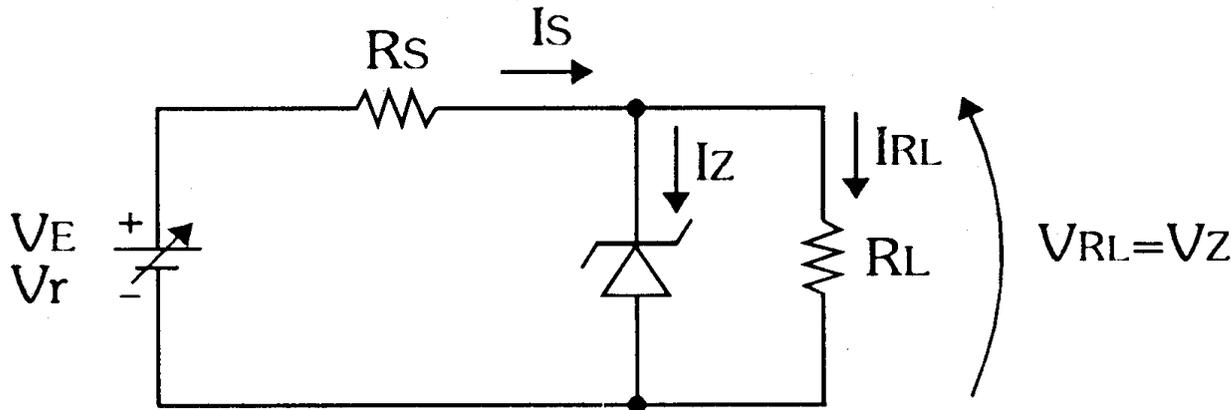
- Corrente zener mínima I_{zm} \rightarrow R_{SM} (máximo)

$$R_{SM} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Zm} + I_{RLM}}$$

- Corrente zener máxima I_{zM} \rightarrow R_{sm} (mínimo)

$$R_{Sm} = \frac{V_E - V_Z}{I_{zM} + I_{RLm}}$$

CIRCUITOS COM $R_L = \text{constante}$ e $V_E = \text{variável}$



$$R_{SM} \leq R_s \leq R_{SM}$$

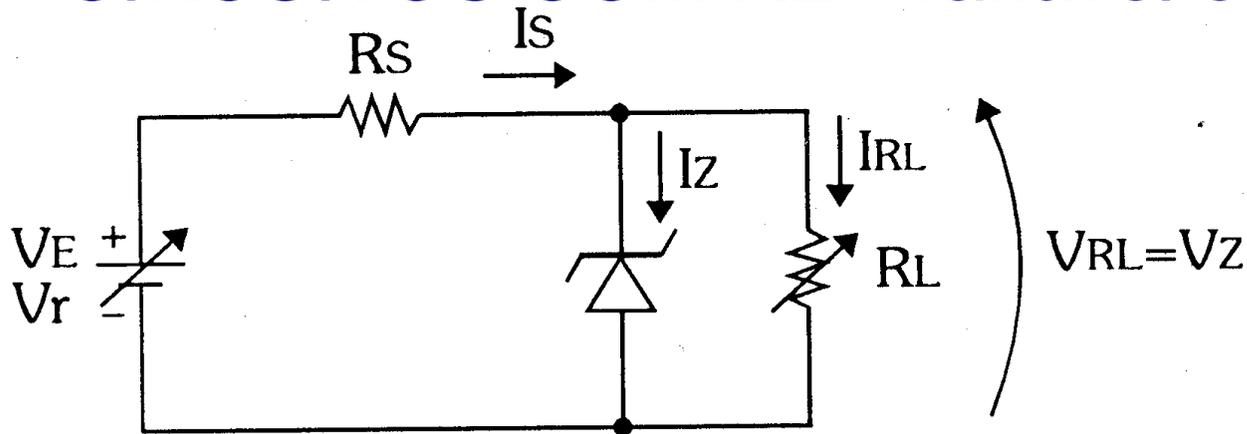
- Corrente zener mínima $I_{zm} \rightarrow R_{SM}$ (máximo)

$$R_{SM} = \frac{V_{Em} - V_Z}{I_{Zm} + I_{RL}}$$

- Corrente zener máxima $I_{zM} \rightarrow R_{sm}$ (mínimo)

$$R_{SM} = \frac{V_{EM} - V_Z}{I_{ZM} + I_{RL}}$$

CIRCUITOS COM $R_L = \text{variável}$ e $V_E = \text{variável}$



$$R_{SM} \leq R_s \leq R_{SM}$$

- Corrente zener mínima $I_{zm} \rightarrow R_{SM}$ (máximo)

$$R_{SM} = \frac{V_{Em} - V_Z}{I_{Zm} + I_{RLM}}$$

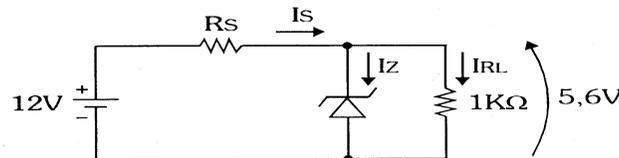
- Corrente zener máxima $I_{zM} \rightarrow R_{sm}$ (mínimo)

$$R_{SM} = \frac{V_{EM} - V_Z}{I_{ZM} + I_{RLm}}$$

Exercícios

CIRCUITOS COM $R_L = \text{constante}$ e $V_E = \text{constante}$

Determinar R_s do regulador de tensão utilizado para que uma fonte de 12V possa ser ligada em um circuito que represente uma carga de $1K\Omega$ e cuja tensão de alimentação seja de 5,6V.



Especificações do Diodo Zener:

$$V_Z = 5,6V$$

$$I_{ZM} = 100mA$$

Redutor de Tensão com Carga Fixa

- Condição de I_{Zm} :

$$I_{Zm} = 0,1 \cdot I_{ZM} \Rightarrow I_{Zm} = 0,1 \times 100 \times 10^{-3} \Rightarrow I_{Zm} = 10mA$$

$$I_{RL} = \frac{V_Z}{R_L} \Rightarrow I_{RL} = \frac{5,6}{1000} \Rightarrow I_{RL} = 5,6mA$$

$$R_{SM} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Zm} + I_{RL}} \Rightarrow R_{SM} = \frac{12 - 5,6}{(10 + 5,6) \times 10^{-3}} \Rightarrow R_{SM} = 410\Omega$$

- Condição de I_{ZM} :

$$R_{Sm} = \frac{V_E - V_Z}{I_{ZM} + I_{RL}} \Rightarrow R_{Sm} = \frac{12 - 5,6}{(100 + 5,6) \times 10^{-3}} \Rightarrow R_{Sm} = 61\Omega$$

Portanto, R_s deve ser: $61\Omega \leq R_s \leq 410\Omega$

Valor comercial escolhido: $R_s = 330\Omega$

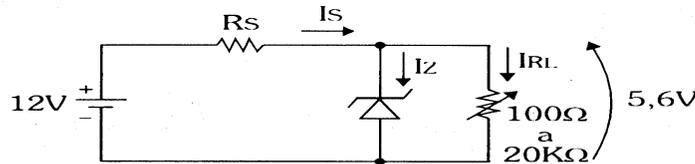
Fixado o valor de R_s , pode-se calcular a potência dissipada por ele no circuito:

$$P_{RS} = \frac{V_{RS}^2}{R_S} \Rightarrow P_{RS} = \frac{(12 - 5,6)^2}{330} \Rightarrow P_{RS} = 124mW$$

Portanto, R_s pode ser um resistor de 1/2W.

CIRCUITOS COM $R_L = \text{variável}$ e $V_E = \text{constante}$

Para a mesma fonte do Exemplo de Aplicação anterior e utilizando o mesmo diodo zener, determinar R_S do regulador de tensão para um circuito cuja tensão de alimentação seja de 5,6V, mas que represente uma carga variável entre 100Ω e $20K\Omega$.



Especificações do Diodo Zener:

$$\begin{aligned} V_Z &= 5,6V \\ I_{ZM} &= 100mA \\ I_{zm} &= 10mA \end{aligned}$$

Redutor de Tensão com Carga Variável

- Condição de I_{zm} :

$$I_{RLM} = \frac{V_Z}{R_{Lm}} \Rightarrow I_{RLM} = \frac{5,6}{100} \Rightarrow I_{RLM} = 56mA$$

$$R_{SM} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Zm} + I_{RLM}} \Rightarrow R_{SM} = \frac{12 - 5,6}{(10 + 56) \times 10^{-3}} \Rightarrow R_{SM} = 97\Omega$$

- Condição de I_{ZM} :

$$I_{RLm} = \frac{V_Z}{R_{Lm}} \Rightarrow I_{RLm} = \frac{5,6}{20 \times 10^3} \Rightarrow I_{RLm} = 0,28mA$$

$$R_{Sm} = \frac{V_E - V_Z}{I_{ZM} + I_{RLm}} \Rightarrow R_{Sm} = \frac{12 - 5,6}{(100 + 0,28) \times 10^{-3}} \Rightarrow R_{Sm} = 64\Omega$$

Portanto, R_S deve ser: $64\Omega \leq R_S \leq 97\Omega$

Valor comercial escolhido: $R_S = 82\Omega$

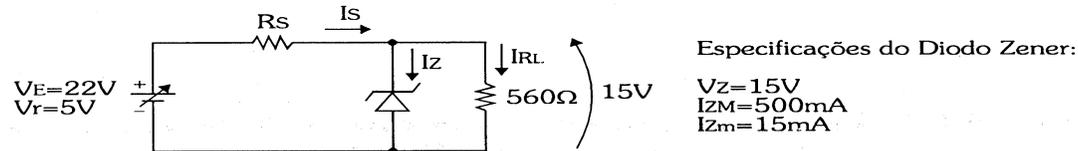
Fixado o valor de R_S , pode-se calcular a potência dissipada por ele no circuito:

$$P_{RS} = \frac{V_{RS}^2}{R_S} \Rightarrow P_{RS} = \frac{(12 - 5,6)^2}{82} \Rightarrow P_{RS} = 499,5mW$$

Portanto, R_S pode ser um resistor de 1W.

CIRCUITOS COM $R_L = \text{constante}$ e $V_E = \text{variável}$

Uma fonte de alimentação foi projetada para alimentar uma carga de 560Ω com tensão de $15V$. Porém, o sinal de saída do filtro capacitivo corresponde a uma tensão de $22V$ com ripple de $5V$. Determinar R_S do regulador de tensão que elimina o ripple desta fonte e estabiliza sua tensão em $15V$.



- Eliminação do Ripple de uma Fonte para uma Carga Fixa

- Condição de I_{Zm} :

$$I_{RL} = \frac{V_Z}{R_L} \Rightarrow I_{RL} = \frac{15}{560} \Rightarrow I_{RL} = 26,79 \text{ mA}$$

$$V_{Em} \equiv V_E - \frac{V_r}{2} \Rightarrow V_{Em} = 22 - \frac{5}{2} \Rightarrow V_{Em} = 19,5V$$

$$R_{SM} = \frac{V_{Em} - V_Z}{I_{Zm} + I_{RL}} \Rightarrow R_{SM} = \frac{19,5 - 15}{(15 + 26,79) \times 10^{-3}} \Rightarrow R_{SM} = 108\Omega$$

- Condição de I_{ZM} :

$$V_{EM} \equiv V_E + \frac{V_r}{2} \Rightarrow V_{EM} = 22 + \frac{5}{2} \Rightarrow V_{EM} = 24,5V$$

$$R_{Sm} = \frac{V_{EM} - V_Z}{I_{ZM} + I_{RL}} \Rightarrow R_{Sm} = \frac{24,5 - 15}{(500 + 26,79) \times 10^{-3}} \Rightarrow R_{Sm} = 18\Omega$$

Portanto, R_S deve ser: $18\Omega \leq R_S \leq 108\Omega$

Valor comercial escolhido: $R_S = 47\Omega$

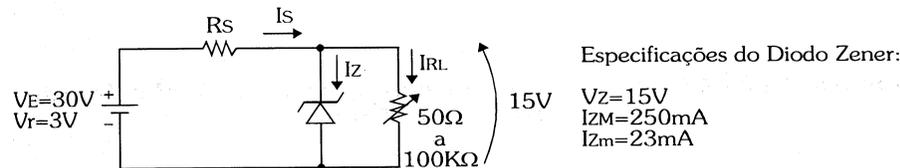
Fixado o valor de R_S , pode-se calcular a potência dissipada por ele no circuito no pior caso, ou seja, quando a tensão V_E é máxima:

$$P_{RSM} = \frac{V_{RSM}^2}{R_S} \Rightarrow P_{RSM} = \frac{(24,5 - 15)^2}{47} \Rightarrow P_{RS} = 1,92W$$

Portanto, R_S pode ser um resistor de $2W$.

CIRCUITOS COM $R_L = \text{variável}$ e $V_E = \text{variável}$

Uma fonte de alimentação possui uma tensão média de saída de 30V com ripple de 3V. Determinar R_s do regulador de tensão que elimina o ripple desta fonte e estabiliza sua tensão em 15V, sabendo-se que ela será utilizada para alimentar cargas de 50Ω até $100K\Omega$ e que o diodo zener do circuito tem as especificações dadas abaixo.



Eliminação do Ripple de uma Fonte para uma Carga Variável

- Condição de I_{Zm} :

$$I_{RLM} = \frac{V_Z}{R_{Lm}} \Rightarrow I_{RLM} = \frac{15}{50} \Rightarrow I_{RLM} = 300\text{mA}$$

$$V_{Em} \equiv V_E - \frac{V_r}{2} \Rightarrow V_{Em} = 30 - \frac{3}{2} \Rightarrow V_{Em} = 28,5\text{V}$$

$$R_{SM} = \frac{V_{Em} - V_Z}{I_{Zm} + I_{RLM}} \Rightarrow R_{SM} = \frac{28,5 - 15}{(23 + 300) \times 10^{-3}} \Rightarrow R_{SM} = 42\Omega$$

- Condição de I_{ZM} :

$$I_{RLm} = \frac{V_Z}{R_{Lm}} \Rightarrow I_{RLm} = \frac{15}{100 \times 10^3} \Rightarrow I_{RLm} = 150\mu\text{A}$$

$$V_{EM} \equiv V_E + \frac{V_r}{2} \Rightarrow V_{EM} = 30 + \frac{3}{2} \Rightarrow V_{EM} = 31,5\text{V}$$

$$R_{SM} = \frac{V_{EM} - V_Z}{I_{ZM} + I_{RLm}} \Rightarrow R_{SM} = \frac{31,5 - 15}{250 \times 10^{-3} + 150 \times 10^{-6}} \Rightarrow R_{SM} = 66\Omega$$

Pelos resultados obtidos, pode-se verificar que este regulador é **impossível** de ser montado, pois a resistência mínima é maior que a resistência máxima exigidas pelas condições do projeto. ↓

Isto aconteceu pelo fato de o projeto prever uma variação muito grande para a carga, enquanto que o diodo zener escolhido tem uma faixa estreita de variação de corrente reversa. Uma forma de contornar este problema é escolher um diodo zener de maior potência, ou seja, que permite variação maior de sua corrente reversa.

Será adotado, então, o diodo com as especificações abaixo:

$$V_Z = 15\text{V}$$

$$I_{ZM} = 700\text{mA}$$

$$I_{Zm} = 30\text{mA}$$

- Condição de I_{Zm} :

$$R_{SM} = \frac{V_{Em} - V_Z}{I_{Zm} + I_{RLM}} \Rightarrow R_{SM} = \frac{28,5 - 15}{(30 + 300) \times 10^{-3}} \Rightarrow R_{SM} = 41\Omega$$

- Condição de I_{ZM} :

$$R_{SM} = \frac{V_{EM} - V_Z}{I_{ZM} + I_{RLm}} \Rightarrow R_{SM} = \frac{31,5 - 15}{700 \times 10^{-3} + 150 \times 10^{-6}} \Rightarrow R_{SM} = 24\Omega$$

Agora, pode-se observar que o regulador é possível de ser implementado.

Portanto, R_s deve ser: $24\Omega \leq R_s \leq 41\Omega$

Valor comercial escolhido: $R_s = 33\Omega$

Fixado o valor de R_s , pode-se calcular a potência dissipada por ele no circuito no pior caso, ou seja, quando a tensão V_E é máxima:

$$P_{RSM} = \frac{V_{RSM}^2}{R_s} \Rightarrow P_{RSM} = \frac{(31,5 - 15)^2}{33} \Rightarrow P_{RSM} = 8,25\text{W}$$

Portanto, R_s pode ser um resistor de 10W.