

Apostila básica sobre

Diodos Zener

Esta simples apostila foi desenvolvida visando ajudar quem já começou a conhecer eletrônica a ter uma visão geral sobre diodos zeners.

Ela é baseada em cálculos matemáticos, raciocínio lógico envolvendo o funcionamento deste tipo de diodo, além de anos de prática em bancada, fazendo manutenção e desenvolvimento.

Espero que ela possa ser útil.

Qualquer dúvida ou crítica (sempre serão bem vindas) envie um e-mail para:

lbertini.ops@zaz.com.br

Diodes Zeners

①

Diodes zeners são diodes que, devido a características especiais em sua construção (dopagem), podem ser utilizados como reguladores de tensão.

Estes diodes quando polarizados reversamente oferecem uma resistência a circulação de corrente até um certo valor de tensão, a partir deste valor eles começam a conduzir e, se devidamente polarizados, mantêm a tensão sobre eles com este valor

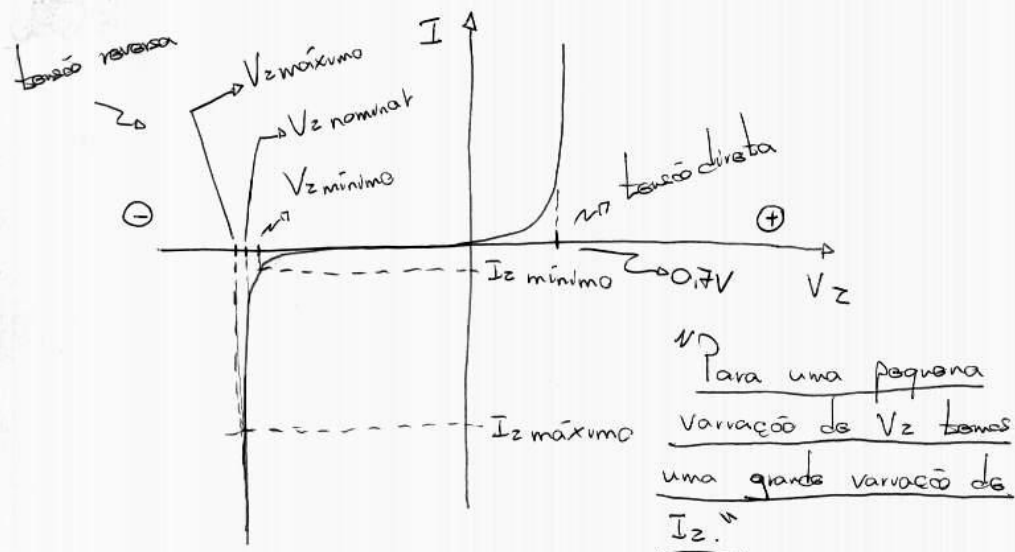
fixo.

Existem diodes zener que começam a conduzir com diversos valores de tensão reversa. Encontra-se no mercado diodes zeners desde, por exemplo, 2,4V até 100V de tensão de condução reversa.

Também podemos encontrar diodes com várias potências, sendo as mais comuns as seguintes:

- 0,4W.
- 0,5W.
- 1,0W.
- 5W.

A curva característica de um diodo zener ^②
é semelhante a mostrada abaixo:



A tensão reversa em que o diodo zener
começa a conduzir é chamada de tensão
zener (V_Z) e a corrente que circula
através dele de corrente zener (I_Z).

Normalmente utilizamos a simbologia abaixo
para representarmos um diodo zener.



(3)

Os fabricantes de diodos zener normalmente fornecem a tensão nominal de mesmo e a sua potência. Com estes dois parâmetros podemos encontrar a sua corrente máxima.

$$P_{Z\text{máx}} = V_Z \times I_{Z\text{máx}}$$

$$I_{Z\text{máx}} = \frac{P_{Z\text{máx}}}{V_Z}$$

Quando polarizamos um diodo zener devemos sempre levar em conta estas três grandezas:

$P_{Z\text{máx}}$ = Potência máxima do zener.

V_Z = tensão de condução nominal do zener.

$I_{Z\text{máx}}$ = corrente máxima do zener.

Podemos também obter a corrente mínima do zener (corrente a partir da qual ele perde suas características de estabilizar uma tensão) como sendo 10% de $I_{Z\text{máx}}$, portanto:

$$I_{Z\text{min}} = 10\% I_{Z\text{máx}} = \frac{I_{Z\text{máx}}}{10}$$

(4)

Na prática a finalidade de um diodo zener é estabilizar uma tensão DC (contínua) de forma que esta tensão possa alimentar corretamente uma carga qualquer.

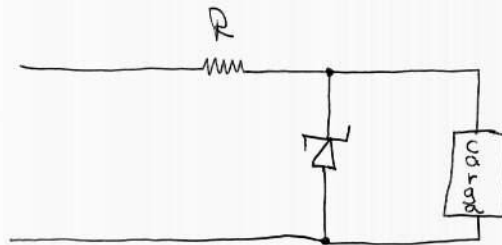
Embora a situação acima seja a mais comum para o uso de diodos zeners, podemos utilizá-los em outras funções, exemplos:

- como supressor de transientes
- como gatilho para condução ou disparo de transistores, Triacs ou SCRs.
- etc.

Veremos exemplos de circuitos e aplicações destes circuitos durante a leitura desta apostila.

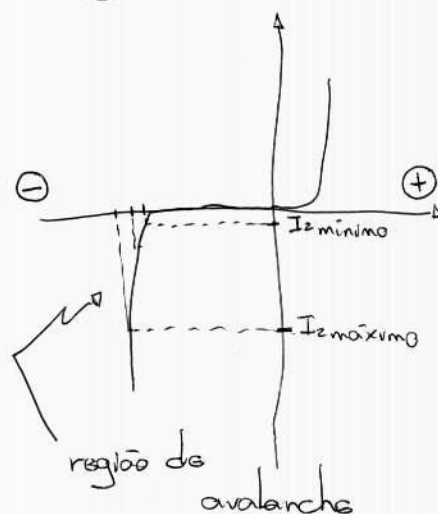
Como podemos ver pela curva do zener temos uma grande variação de corrente entre $I_{z\text{mínimo}}$ e $I_{z\text{máximo}}$ para uma pequena variação da tensão V_z (na prática, muitas vezes, só consideramos a tensão V_z nominal). Devido a isto conseguimos facilmente fazer um regulador de tensão usando um diodo zener ou simplesmente zener.

5
No circuito abaixo vemos um exemplo de um regulador usando um zener e um resistor.



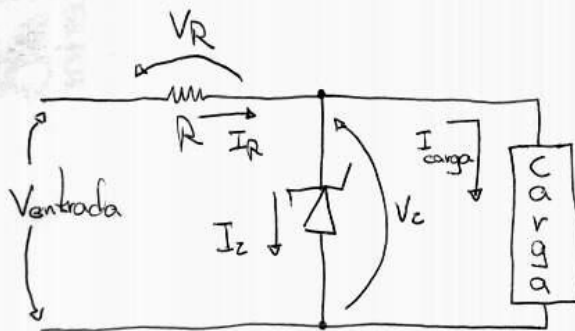
Convm lembrar aqui que a região entre I_{zmin} e I_{zmax} é chamada de região de avalanche.

Vej a Figura abaixo:



Cálculo do circuito apresentado

(6)



Supondo um zener de 9,1V e 1W de potência e uma tensão de entrada de 12V vamos fazer os cálculos, mas antes devemos conhecer a corrente que a carga consome.

Supondo uma carga de 180Ω teremos uma corrente (I_{carga}) de:

$$V_z = R \cdot I_{carga}$$

$$I_{carga} = \frac{V_z}{R} = \frac{9,1V}{180}$$

$$I_{carga} \approx 50mA$$

Como a carga está em paralelo com o zener ela terá, sobre ela, a mesma tensão do zener.

Calculamos agora o valor de $I_{z\max}$ e $I_{z\min}$:

$$I_{z\max} = \frac{P_z}{V_z}$$

$$I_{z\max} = \frac{1}{9,1} \approx 109mA$$

7

$$e \quad I_{zmin} = \frac{I_{emax}}{10}$$

$$I_{zmin} = \frac{109 \text{ mA}}{10} = 10,9 \text{ mA} \rightarrow \text{Adotamos, praticamente, } I_{emin} \text{ como } I_{emax}/10.$$

Esta consideração normalmente oferece resultados satisfatórios.

Para calcularmos o valor de R é só aplicarmos a Lei de Kirchhoff que resulta no seguinte:

$$R = \frac{V_{entrada} - V_z}{I_z + I_{carga}}$$

→ Mas que valor adotamos para I_z ? Normalmente a média entre I_{emax} e I_{emin} :

$$I_z = \frac{I_{emax} + I_{emin}}{2} = \frac{109 + 10,9}{2}$$

$$I_z \approx 60 \text{ mA}$$

$$R = \frac{V_{entrada} - V_z}{I_{zmedio} + I_{carga}}$$

$$R = \frac{12 - 9,1}{60 \text{ mA} + 50 \text{ mA}} = \frac{2,9}{110 \text{ mA}} = \frac{2,9}{0,11} = 27 \Omega //$$

Precisamos agora calcular a potência de R:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(2,9)^2}{27} = \frac{8,41}{27} \approx 0,31W \text{ na}$$

prática, adotamos um resistor de potência maior, portanto $R = 27\Omega \times 0,5W$.

Este exemplo que mostramos usa valores fixos de tensão e corrente, mas este caso é quase impossível na prática.

Normalmente temos a tensão de entrada variando e ou a corrente de carga variando. É exatamente para isto que usamos o zener, com ele conseguiremos manter a tensão sobre a carga fixa, independente das variações da tensão na entrada do circuito ou de variações de corrente na própria carga.

Vamos supor um circuito semelhante ao abaixo com as seguintes características:

$$V_{\text{entrada}} = 12V \pm 20\%$$

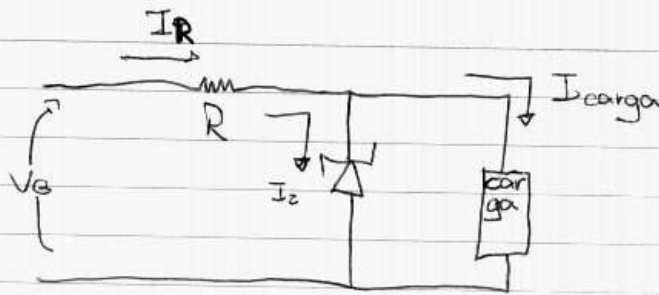
$$I_{\text{carga máx}} = 70mA$$

$$I_{\text{carga mín}} = 0mA$$

$$V_z = 8V$$

$$P_z = 1W$$

9



Agora iremos calcular o valor de $R_{\max}$ e $R_{\min}$ para as extremas máximas e mínimas de tensão de entrada e para as extremas máximas e mínimas de corrente de carga. Para isto devemos primeiro calcular a variação da tensão de entrada, saber a variação da corrente da carga e os valores de $I_{z\max}$ e $I_{z\min}$.

$$V_{\text{entrada}} = 12V \pm 20\%$$

$$V_{\text{entrada máx}} = 12V + 20\% = 12V + 2,4 = 14,4V_{//}$$

$$V_{\text{entrada mín}} = 12V - 20\% = 12 - 2,4 = 9,6V_{//}$$

$I_{\text{carga mínimo}} = 0mA$, o que corresponde a tirarmos a carga do circuito

$I_{\text{carga máximo}} = 70mA$, o valor adotado. Este valor dependerá das características da carga.

10

$$I_{zm\acute{a}x} = \frac{P_z}{V_z} = \frac{1}{8} = 125mA$$

$$I_{zmin} = \frac{I_{zm\acute{a}x}}{10} = \frac{125}{10} = 12,5mA$$

Vamos agora a elaboraçaõ das fórmulas que nos permitirão calcular o valor de $R_{m\acute{a}x}$ e R_{min} de forma a tirarmos a média entre estes dois valores, e termos um valor correto para R . Podemos chegar a estas equações de duas formas, matematicamente, ou usando o raciocínio lógico e a compreensão do circuito. Vamos optar pela segunda forma.

$$R_{min} = \frac{V_{em\acute{a}x} - V_z}{I_{zm\acute{a}x} + I_{cargamin}}$$

Mas de onde saiu esta fórmula?

O mínimo valor de R deve ser tal que com a máxima tensão de entrada e com a mínima corrente da carga o valor da corrente não ultrapasse $I_{zm\acute{a}x}$, pois isto "queimaria" o diodo zener.

$$R_{\max} = \frac{V_{\min} - V_z}{I_{z\min} + I_{\text{carga}\max}}$$

O máximo valor de R , deve ser tal que com a mínima tensão de entrada e a máxima corrente da carga, ainda possa pelo zener $I_{z\min}$ de forma que ele consiga estabilizar a tensão.

Observação: Um diodo zener só é capaz de estabilizar uma tensão se a corrente que passe através dele esteja entre $I_{z\min}$ e $I_{z\max}$ (veja a curva do zener).

Cálculos:

$$R_{\min} = \frac{V_{\max} - V_z}{I_{z\max} + I_{\text{carga}\min}}$$

$$R_{\min} = \frac{14,4 - 8}{125\text{mA} + 0}$$

$$R_{\min} = \frac{6,4}{0,125} = 51,2\Omega$$

(12)

$$R_{\max} = \frac{V_{B\min} - V_z}{I_{z\min} + I_{\text{carga max}}}$$

$$R_{\max} = \frac{9,6 - 8}{12,5\text{mA} + 70\text{mA}}$$

$$R_{\max} = \frac{1,6}{0,0825} = 19,5\Omega //$$

Epa, está errado!

Como podemos perceber $R_{\max}$ mostrou um valor menor do que $R_{\min}$. Quando isto acontece é porque a potência do zener escolhido é pequena. Vamos escolher um zener de 8V e 5W e refazer estes cálculos.

$$R_{\min} = \frac{V_{B\max} - V_z}{I_{z\max} + I_{\text{carga min}}}$$

$$R_{\min} = \frac{14,4 - 8}{0,625 + 0}$$

$$R_{\min} = \frac{6,4}{0,625} = 10,24\Omega //$$

$$I_{z\max} = \frac{P_z}{V_z} = \frac{5}{8}$$

$$I_{z\max} = 625\text{mA} //$$

$$I_{z\min} = \frac{I_{z\max}}{10} = \frac{625\text{mA}}{10}$$

$$I_{z\min} = 62,5\text{mA} //$$

$$R_{\max} = \frac{V_{\min} - V_z}{I_{z\min} + I_{\text{carga}\max}}$$

$$R_{\max} = \frac{9,6 - 8}{0,0625 + 0,07} = \frac{1,6}{0,1325}$$

$$R_{\max} = 12,07 \Omega$$

Vamos agora tirar a média e conferir se está certo.

$$R_{\text{médio}} = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2} = \frac{12,07 + 10,24}{2} = \frac{22,31}{2}$$

$$R_{\text{médio}} = 11,15 \Omega$$

Vamos agora ver se com a máxima tensão de entrada e com a mínima corrente de carga a corrente pelo zener não será maior do que $I_{z\max}$.

$$I_R = \frac{V_{\max} - V_z}{R_{\text{médio}}} = \frac{14,4 - 8}{11,15} = \frac{6,4}{11,15} = 573 \text{ mA}$$

$I_R = 573 \text{ mA}$ que é menor do que $I_{z\max} = 625 \text{ mA}$.

Vamos agora ver se com a mínima tensão de entrada e com a máxima corrente de carga a corrente pelo zener não será

(14)

menor do que I_{zmin} .

$$I_R = \frac{V_{emin} - V_z}{R_{medio}} = \frac{9,6 - 8}{11,15} = \frac{1,6}{11,15}$$

$$I_R = 143 \text{ mA}$$

I_R é maior do que I_{zmin} que é igual a $62,5 \text{ mA}$.

Podemos então usar este resistor (escolhendo o valor comercial mais próximo), mas antes precisamos calcular a sua potência. Eu aconselho calcular isto usando as piores condições, ou seja, a máxima tensão de entrada.

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(6,4)^2}{11,15} = \frac{40,96}{11,15} = 3,7 \text{ W} \quad \text{usamos sempre}$$

um valor de potência maior:

$$R = 11,15 \Omega \times 3,7 \text{ W} \quad \text{vira comercialmente}$$

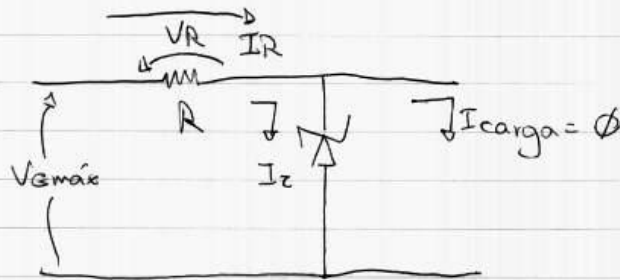
$$R = 12 \Omega \times 5 \text{ W}.$$

Analisamos estas coisas.

Se com $R = 11,15 \Omega$ e com a tensão máxima a corrente máxima que passa por ele é

(15)

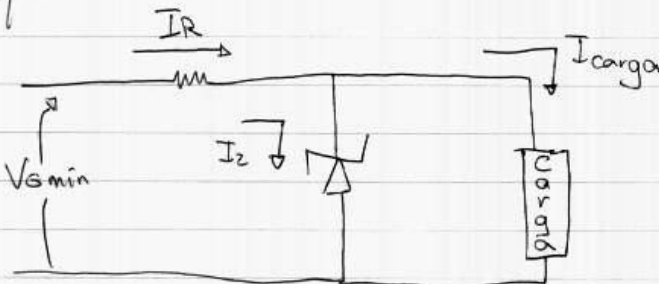
Igual a 573mA , podemos até tirar a carga que o zener não "queimará" pois sua máxima corrente é 625mA



$I_R = I_z + I_{\text{carga}}$ e como não há carga, $I_{\text{carga}} = 0$

$I_R = I_z$. Ou seja toda a corrente que passa por R passará pelo zener.

No outro caso, com a tensão mínima e a corrente máxima da carga, vejamos o que acontece:



$I_R = I_z + I_{\text{carga máx}}$

$I_z = I_R - I_{\text{carga máx}} = 143\text{mA} - 70\text{mA} = 73\text{mA}$

16

A corrente que "sobrar" para passar pelo zener é de 73mA , portanto maior do que $I_{Z\text{min}}$ que é igual a $62,5\text{mA}$.

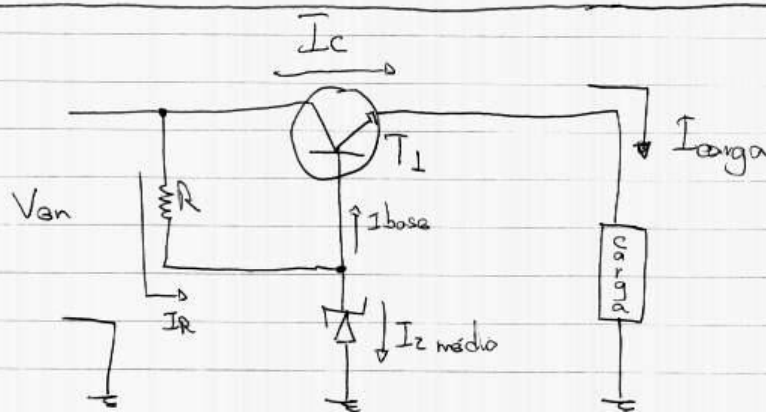
Podemos perceber que em qualquer condição o zener estabilizará a tensão.

Todos estes cálculos se simplificam quando sabemos a corrente de carga. É normalmente quase nunca trabalhamos com um zener diretamente paralelo com a carga, é comum o uso de transistores OT que permite trabalhar com zeners de potência menor ($0,4\text{W}$, $0,5\text{W}$ ou 1W).

Vermos isto em outros circuitos práticos.

Circuitos e equações:

- Zener estabilizando um transistor de driver de corrente



(17)

Podemos perceber que a corrente de carga de zener será I_b que polarizará o transistor de forma que este forneça uma corrente muito maior para a carga da fonte:

Cálculos:

$$V_{en} = 20 \pm 20\%$$

$$\beta_{T1} = 100$$

$$I_{carga} = 1A$$

$$V_z = 12V$$

$$P_z = 1W$$

Podemos perceber pelo circuito que I_{carga} é praticamente igual a I_c .

$$\text{Sabendo-se que } I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{1}{100} = 10mA.$$

$$I_b = 10mA //$$

$$V_{en_{\max}} = 20 + 20\% = 24V //$$

$$V_{en_{\min}} = 20 - 20\% = 16V //$$

$$I_{z_{\text{médio}}} = \frac{I_{z_{\max}} + I_{z_{\min}}}{2}$$

$$I_{z_{\text{médio}}} = \frac{84mA + 84mA}{2} \approx 46mA //$$

$$I_{z_{\max}} = \frac{P_z}{V_z} = \frac{1}{12} \approx 84mA //$$

$$I_{z_{\min}} = \frac{84mA}{10} = 8,4mA //$$

Como a corrente I_b é muito pequena perto da corrente máxima do zener podemos facilitar os cálculos, e também adotar a $V_{nominal}$, desprezando as porcentagens, além de trabalhar com $I_{zmédio}$. (18)

$$R = \frac{V_{nominal} - V_z}{I_{zmédio}}$$

$$R = \frac{20 - 12}{46mA} = \frac{8}{46mA}$$

$R = 173 \Omega$ então adotaremos um valor comercial $\rightarrow 180 \Omega$

Vamos ver agora se nas piores condições de V_E e I_b causaremos algum dano ao zener com o valor de $R = 180 \Omega$.

$$I_z = \frac{V_{emáx} - V_z}{R} = \frac{24 - 12}{180} = \frac{12}{180} \approx 67mA < I_{zmax}(84mA)$$

$$I_z = \frac{V_{emin} - V_z}{R} = \frac{16 - 12}{180} = \frac{4}{180} \approx 22mA > I_{zmin}(8.4mA)$$

Podemos ver que nas piores condições de V_E a corrente não passa o

(19)
valor de $I_{emáx}$ e nem é menor do que $I_{emín}$.
Ou seja o zener trabalhará dentro da sua
Faixa de operação.

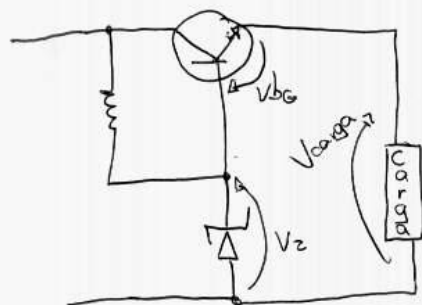
Valor agora calcular a potência de R , para
isto usaremos a $V_{emáx}$ pois assim teremos certeza
que ele suportará todas as outras condições.

$$P_R = \frac{(V)^2}{R} = \frac{(12)^2}{180} = \frac{144}{180} = 0,8W$$

adotaremos por segurança e, para uma maior durabili-
dade, uma potência superior.

$$R = 180\Omega \times 2W.$$

A tensão de saída deste regulador será:

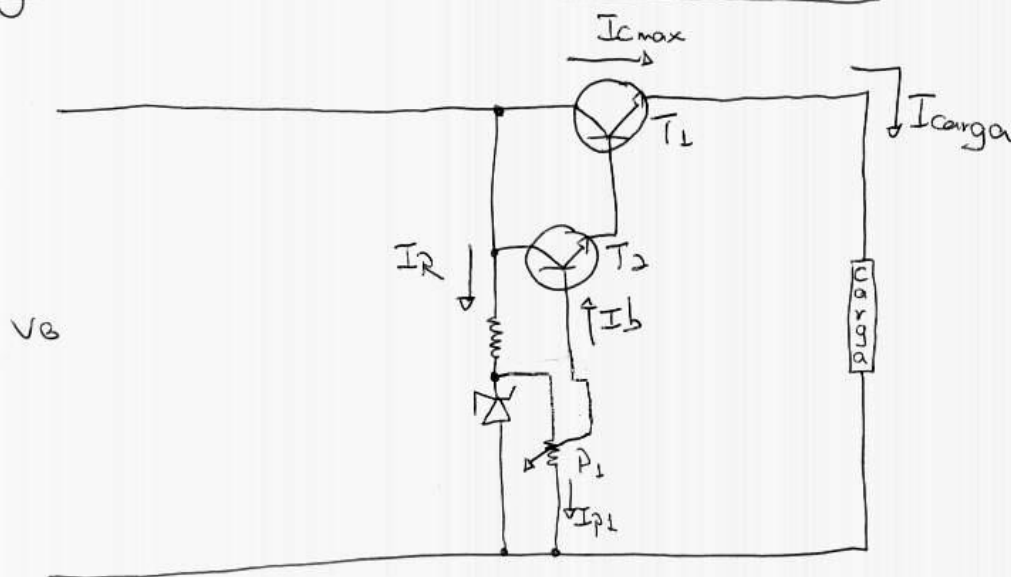


20

$$V_{carga} = -V_{be} + V_{zener}$$

$$V_{carga} = V_{saída} = -0,7 + 12V = 11,3V$$

- Zener estabilizando uma configuração darlington com ajuste do valor da tensão de saída.



Dados da Fonte:

$$V_B = 12V \pm 10\%$$

$$I_{cmax} = 2A$$

$$\beta_{T1} = 20$$

$$\beta_{T2} = 100$$

$$Z_{ener} = 15 \times 1W$$

Vamos iniciar os cálculos:

21

$$V_{\text{max}} = 20 + 10\% = 22V //$$

$$V_{\text{min}} = 20 - 10\% = 18V //$$

$$I_{\text{zmax}} = \frac{P_z}{V_z} = \frac{1}{15} = 67mA$$

$$I_{\text{zmin}} = \frac{I_{\text{zmax}}}{10} = \frac{67mA}{10} = 6.7mA$$

$$I_{\text{zmédio}} = \frac{I_{\text{zmax}} + I_{\text{zmin}}}{2} = \frac{67mA + 6.7mA}{2}$$

$$I_{\text{zmédio}} = 37mA //$$

$$\beta_{\text{Total}} = \beta_{T1} \times \beta_{T2} = 20 \times 100$$

$$\beta_{\text{Total}} = 2000$$

$$I_b = \frac{I_{\text{zmáx}}}{\beta_{\text{total}}} = \frac{2}{2000} = 1mA //$$

Agora devemos calcular o valor de I_{p1} , na prática obtemos $I_{p1} = I_b \times 10$

$$I_{p1} = I_b \times 10 = 1mA \times 10 = 10mA //$$

Para facilitar nesses cálculos no valor de R vamos obter a seguinte equação:

$$R = \frac{V_{\text{nominal}} - V_z}{I_{z\text{médio}}}$$

$$R = \frac{20 - V_z}{37\text{mA}} = \frac{20 - 15}{37\text{mA}}$$

$$R = \frac{5}{0,037} = 135\Omega$$

Adotaremos o valor comercial mais próximo:

$$R = 150\Omega$$

Vejamos agora se nos extremos de V_E o zener não será danificado ou se deixará de circular pelo mesmo a corrente mínima para estabilização.

$$I_{z_{\text{Vemáx}}} = \frac{V_{\text{emáx}} - V_z}{150} = \frac{22 - 15}{150} = \frac{7}{150} \approx 46\text{mA}$$

46mA é menor do que $I_{z\text{máx}}$ (67mA), mesmo somando-se
 $I_{p\text{máx}} = 10\text{mA}$ ainda não atingiremos $I_{z\text{máx}}$:
 $46\text{mA} + 10\text{mA} = 56\text{mA} < 67\text{mA}$.

$$I_{z_{\text{Vemin}}} = \frac{V_{\text{emin}} - V_z}{150} = \frac{18 - 15}{150} = \frac{3}{150} = 20\text{mA}$$

20mA é maior do que $I_{z\text{min}}$ (6,7mA), mesmo subtraindo-se
 $I_{p\text{máx}} = 10\text{mA}$ não atingiremos $I_{z\text{min}}$:

(23)

$$20\text{mA} - 10\text{mA} = 10\text{mA} > 6,7\text{mA} (I_{\text{emiss}})$$

Este mesmo procedimento pode ser aplicado no exemplo anterior.

Podemos perceber que o zener funcionará corretamente.

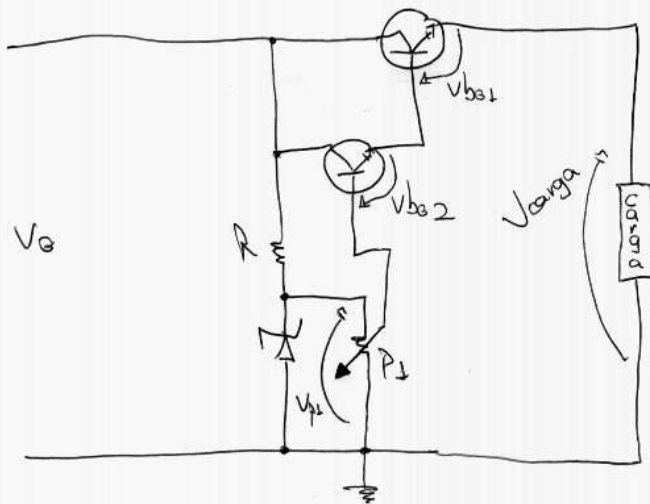
Vamos agora calcular a potência de R:

$$P_R = \frac{(V)^2}{R} = \frac{(7)^2}{150} = \frac{49}{150} = 0,32\text{W} \rightarrow \text{"Sempre usando a maior tensão sobre o R."}$$

Adotaremos, por segurança um valor maior:

$$R = 150\Omega \times 1\text{W}.$$

A tensão na saída variará de acordo com o ajuste do cursor de P_1 .



$$V_{\text{saída}} = V_{\text{carga}}$$

(24)

$V_{\text{saída mínima}} = 0 \text{ Volts}$ e cursor de P_1 no terra.

$$V_{\text{saída máxima}} = V_{P1\text{max}} - V_{e1} - V_{e2}$$

$$V_{\text{saída máxima}} = 15 - 0,7 - 0,7$$

$$V_{\text{saída máxima}} = 13,6V //$$

A tensão de saída variará, de acordo com o ajuste de P_1 , entre: $0 - 13,6V //$.

Mas qual o valor de P_1 ? Lembrando da lei de Ohm: $V = R \cdot I$

$$R = \frac{V}{I} \Rightarrow P_1 = \frac{15V}{10mA} \quad \begin{array}{l} \text{e pois está em paralelo com o} \\ \text{zener} \\ \text{valor calculado anteriormente} \end{array}$$

$$P_1 = 1k5 \Omega //$$

Está pronto nosso projeto.

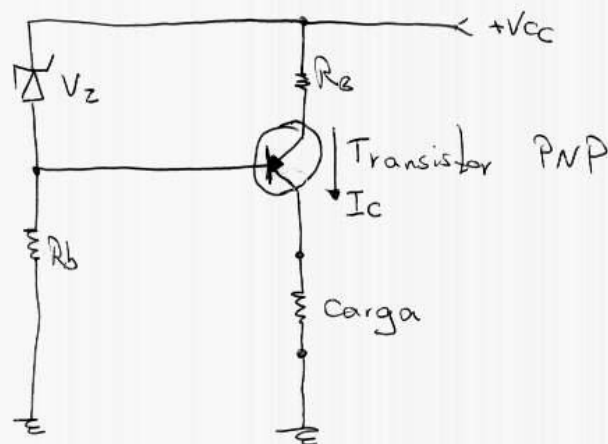
— Fonte de corrente com zener

Uma Fonte de corrente é um circuito que mantém a tensão, aproximadamente, fixa sobre a carga e que também mantém a corrente fixa.

Tema Fonte de corrente fixa e ajustável.

(25)

Circuitos e cálculos para uma Fonte Fixa



$$R_E = \frac{V_Z - V_{BE}}{I_C}$$

o I_C deve ser um valor adequado e que depende da carga.

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_Z}{I_{Z\text{médio}}}$$

o $I_{Z\text{médio}}$ deve ser previamente calculado.

R_E deve ter um valor baixo (no máximo alguns dezenas de ohms).

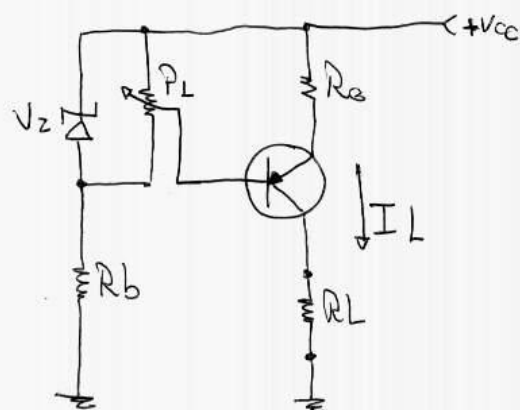
Circuitos e cálculos para uma Fonte ajustável

$$R_E = \frac{V_Z - V_{BE}}{I_L}$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_Z}{I_{Z\text{médio}}}$$

$$P_T = \frac{V_Z}{I_{P1}} \quad I_{P1} \approx \frac{I_L}{\beta}$$

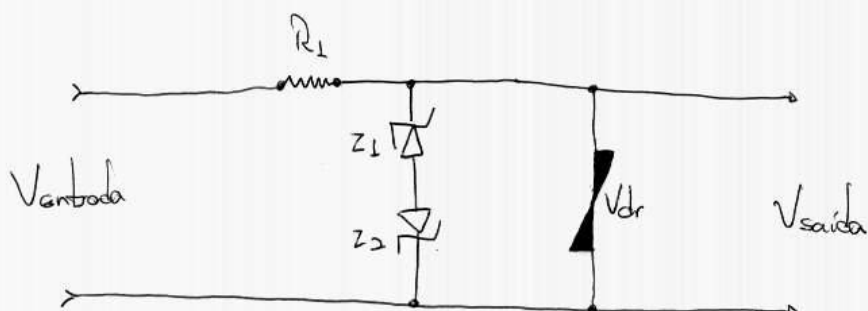
26



Ajustando-se P_L ajusta-se a corrente que circula pela carga.

R_e deve ter um valor baixo para influenciar, no mínimo, o valor de V_{cc} .

- Zener como supressor de picos de tensão ou transientes



(27)

Os diodos zeners, Z_1 e Z_2 , devem ter uma tensão maior do que a tensão de entrada ($V_{entrada}$), caso um pico de tensão venha pela alimentação eles começarão a conduzir, impedindo que este pico passe para a saída protegendo o que esteja ligado nela.

R_1 normalmente tem um valor baixo, alguns ohms.

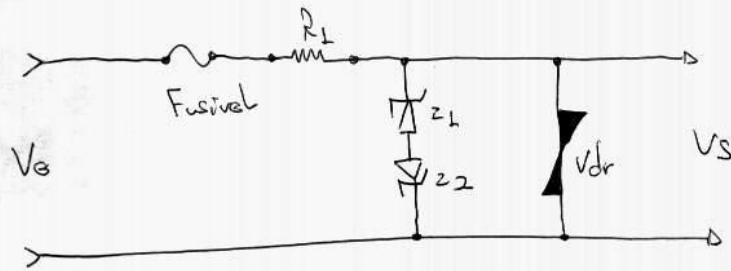
V_{dr} é um varistor que também atuará como proteção e que deve ser dimensionado corretamente.

Observe abaixo:

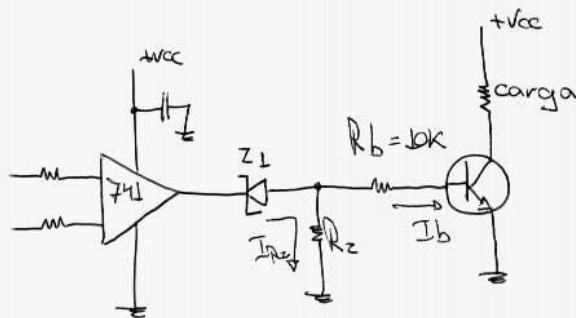
$$V_3 = 12V_{cc}$$

$$V_2 = 15 \text{ Volts}$$

Qualquer pico de tensão superior a $15,7V$ ($V_{Z1} + V_{Z2}$) será cortado ou limitado pelos zeners. Dependendo da intensidade do transiente estes zeners poderão abrir ou entrar em curto, por isto, se possível coloque um fusível em série com o circuito.



- Zener usado na comutação de transistores

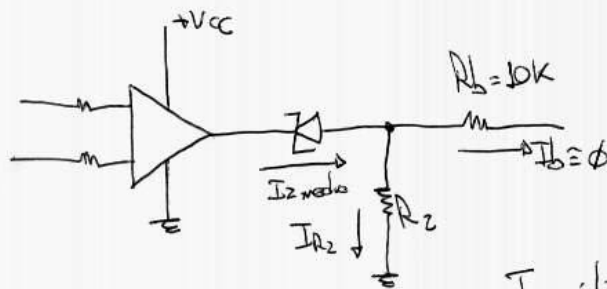


Alguns operacionais, quando alimentados com tensão assimétrica não apresentam ϕ Volts em sua saída de nenhuma forma, caso de deva comutar um transistor pode ser que o mesmo não ocorra. Para evitar que 1 ou 2 Volts presentes na saída do Operacional façam o transistor conduzir, podemos utilizar um zener.

Escolha do zener:

$$V_Z = \frac{V_{CC}}{2}$$

Como normalmente I_b é muito baixa (veja o valor de $R_b = 10k$) podemos simplificar o circuito e os cálculos. (29)



$$I_{z\text{ médio}} \approx I_{R2} \text{ pois } I_b \approx 0$$

$$R_2 = \frac{V_{cc} - V_z}{I_{z\text{ médio}}}$$

É importante verificar se o valor de $I_{z\text{ médio}}$ não é maior do que a máxima corrente de saída do Amplificador Operacional. Para minimizarmos este problema devemos utilizar, para esta função, zener de 0,4W ou 0,5W.

The End