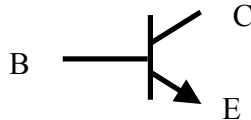


## Circuitos reguladores de tensão com diodo zener e transistor bipolar de junção

### 1) Noções sobre o transistor bipolar de junção (TBJ)

símbolo do TBJ NPN:



É um dispositivo de três terminais em que a corrente através de um deles (base B) controla a corrente através dos outros dois (coletor C e emissor E). Se polarizado na região ativa, a corrente de coletor e de emissor são versões amplificadas da corrente de base. Para os fins deste projeto basta-nos saber que o transistor bipolar de junção vai funcionar como um amplificador de corrente na região ativa valendo as relações:

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = I_C + I_B = (\beta + 1)I_B$$

(sendo  $\beta$  um ganho da ordem de centenas informado pelo fabricante; depende do nível de corrente)

$$V_{BE} = 0,6 \text{ a } 0,7 \text{ volts}$$

(transistores de silício NPN)

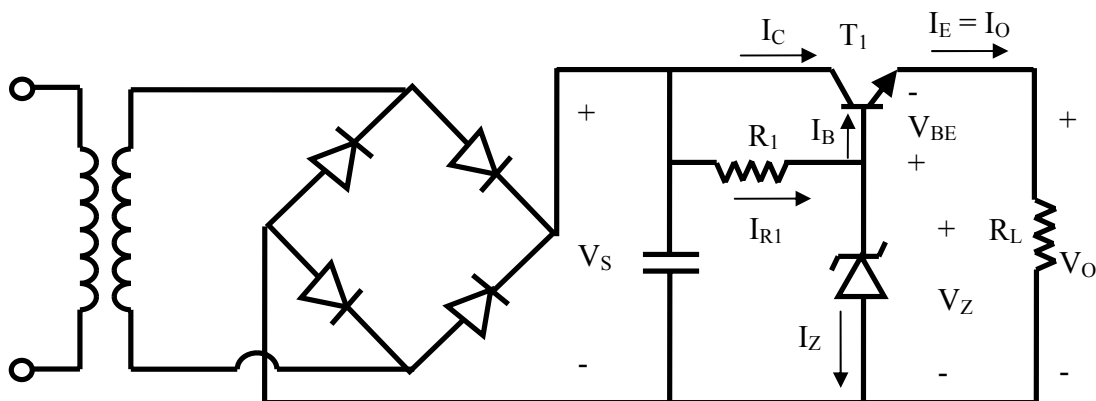
Além disto, para operar na região ativa, deve ser observada a seguinte condição:

$$V_{CE} > V_{CESAT} = 0,2 \text{ volts}$$

(transistores de silício NPN)

### 2) Arquitetura de regulador para fonte de tensão não ajustável

A seguinte arquitetura de regulador, embora forneça uma tensão fixa na saída servirá para o melhor entendimento da arquitetura do item 3.



$V_S$ , tensão de entrada do estágio regulador, é a tensão na saída do retificador filtrado, portanto apresenta uma ondulação devida à carga e descarga periódicas do capacitor. Consideremos que  $V_S$  oscila entre os valores  $V_{Smin}$  e  $V_{Smáx}$ .

A tensão de saída é:  $V_O = V_Z - V_{BE}$

Este valor é aproximadamente constante (varia quase imperceptivelmente com a corrente de carga  $I_O$ ), mas deve-se observar que, em se desejando uma tensão de saída de 12 volts (por exemplo), a tensão nominal do zener deve ser um pouco maior (12,6 a 12,7 volts). Uma alternativa é associar em série ao zener um diodo semiconductor comum com o catodo conectado ao catodo do zener. Neste caso a queda de tensão no diodo compensa a queda entre a base e emissor do TBJ.

Para o circuito funcionar corretamente a corrente  $I_Z$  deve ficar entre os valores  $I_{Zmin}$  e  $I_{Zmáx}$  que limitam a porção linear da característica volt-ampère na região de ruptura, onde o zener pode operar como regulador (tensão quase constante com a corrente) em segurança (ou seja, sem risco de se sobreaquecer por efeito Joule). Deve-se recordar que  $I_{Zmin}$  é a corrente na fronteira do joelho com a porção linear da curva e que  $I_{Zmáx} = P_{máx}/V_Z$ .

$$I_Z = I_{R1} - I_B = \frac{V_S - V_Z}{R_1} - \frac{I_O}{\beta + 1}$$

Piores casos:

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad V_S = V_{Smin} \text{ e } I_O = I_{Omáx}: \quad I_Z &= \frac{V_{Smin} - V_Z}{R_1} - \frac{I_{Omáx}}{\beta + 1} > I_{Zmin} \\ \text{(ii)} \quad V_S = V_{Smáx} \text{ e } I_O = 0: \quad I_Z &= \frac{V_{Smáx} - V_Z}{R_1} < I_{Zmáx} \end{aligned}$$

Da condição (i) determina-se o máximo valor de  $R_1$  e da condição (ii) determina-se o mínimo valor de  $R_1$ . Esta resistência deve ser escolhida entre estes dois valores.

$V_{Smáx}$  deve ser o pico da tensão no secundário do transformador, descontada a queda de tensão no retificador.  $V_{Smin}$  pode ser calculada de forma aproximada (“dente de serra”) conhecendo-se a constante RC do filtro. Como R (da constante RC) é a representação da carga na saída do retificador filtrado, pode-se adotar um valor mínimo (pior caso: maior *ripple*) avaliado de forma aproximada e bastante conservativa a partir de:  $R_{min} = V_{Smin}/(I_O + I_Z)_{max}$ .

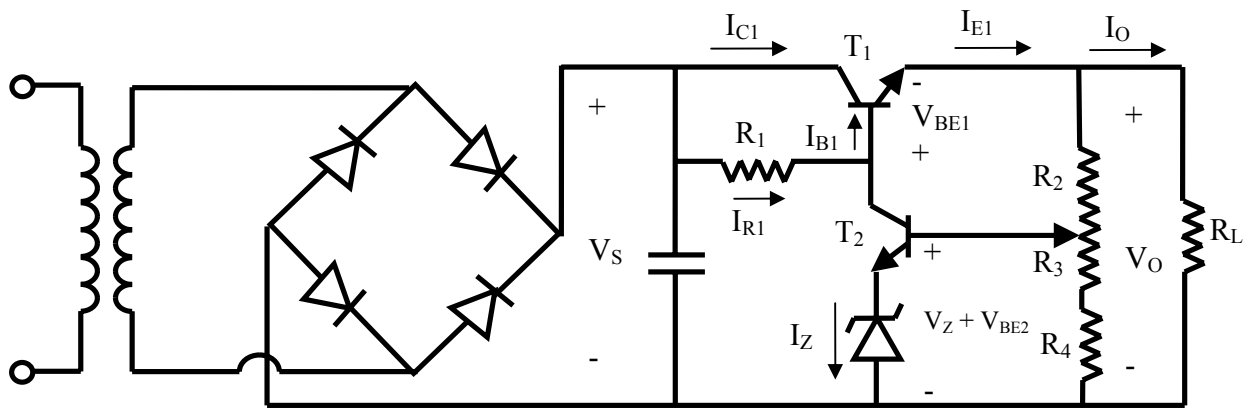
Finalmente, o TBJ só vai funcionar na região ativa se  $V_{CE} > 0,2$  volts, logo:

$$V_{Smin} - V_O > 0,2 \text{ volts.}$$

Esta condição pode ser utilizada para dimensionar o capacitor do filtro, juntamente com o *ripple*. O *ripple*  $r_1$  na saída do filtro é bem maior que o *ripple*  $r_2$  na saída do regulador. Para este último existe uma especificação. O coeficiente de estabilização do regulador pode ser utilizado para calcular  $r_1$  a partir do  $r_2$  especificado. Na falta de dados para avaliar o coeficiente de estabilização, pode-se conferir os valores do *ripple* através de simulação.

### 3) Arquitetura de regulador para fonte de tensão ajustável

A seguinte arquitetura de regulador é uma sugestão para a implementação da fonte solicitada. Alternativamente pode-se utilizar retificação de onda completa com dois diodos e transformador com derivação central ou retificação de meia onda.



Quanto à análise do regulador, a introdução do transistor  $T_2$  insere várias alterações. Desprezando a corrente de base de  $T_2$ :

$$V_Z + V_{BE2} = \frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4} V_O$$

$$V_O = \left( 1 + \frac{R_2}{R_3 + R_4} \right) (V_Z + V_{BE2})$$

O potenciômetro permite o ajuste da tensão de saída. Para limitar a variação, foi acrescentado o resistor  $R_4$  fixo. O valor mínimo da tensão de saída é  $V_Z + V_{BE2}$ .

O dimensionamento de  $R_1$  também é modificado:

$$I_Z = I_{E2} = \frac{\beta_2 + 1}{\beta_2} I_{C2} \cong I_{C2} = I_{R1} - I_{B1}$$

$$I_Z = \frac{V_S - V_O - V_{BE1}}{R_1} - \frac{1}{\beta_1 + 1} \left( \frac{V_O}{R_2 + R_3 + R_4} + I_O \right)$$

Na expressão acima, estamos desprezando a corrente de base de  $T_2$ , o que é razoável se o ganho  $\beta_2$  é grande.

Piores casos:

$$(i) \quad V_S = V_{Smin}, I_O = I_{Omax} \text{ e } V_O = V_{Omax}:$$

$$I_Z = \frac{V_{Smin} - V_{Omax} - V_{BE1}}{R_1} - \frac{1}{\beta_1 + 1} \left( \frac{V_{Omax}}{R_2 + R_3 + R_4} + I_{Omax} \right) > I_{Zmin}$$

$$(ii) \quad V_S = V_{Smáx}, I_O = 0 \text{ e } V_O = V_{Omin}:$$

$$I_Z = \frac{V_{Smáx} - V_{Omin} - V_{BE1}}{R_1} - \frac{1}{\beta_1 + 1} \left( \frac{V_{Omin}}{R_2 + R_3 + R_4} \right) < I_{Zmáx}$$

Utilizando-se as condições (i) e (ii) determina-se a faixa adequada de valores para  $R_1$ .

Para os transistores  $T_1$  e  $T_2$  operarem na região ativa ( $V_{CE1}, V_{CE2} > 0,2$  volts), devemos ter:

$$V_{Smin} - V_O > 0,2 \text{ volts}$$

$$V_{BE1} + V_O - V_Z > 0,2 \text{ volts}$$

As observações relativas a  $V_{Smáx}$  e  $V_{Smin}$  do item (2) são válidas aqui, exceto que para se avaliar o valor mínimo da resistência de carga equivalente vista pelo retificador filtrado, pode-se fazer de forma bastante conservativa:

$$R_{min} \cong \frac{V_{Smin}}{\left( I_O + \frac{V_O}{R_2 + R_3 + R_4} + I_Z \right)_{máx}}$$