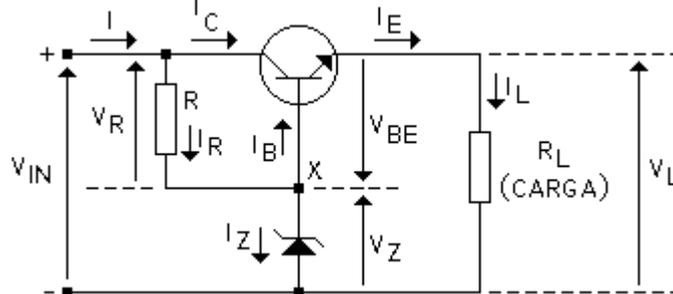


# REGULADORES DE TENSÃO

## REGULADOR SÉRIE:



O regulador série é na realidade uma fonte de alimentação regulada mais sofisticada em relação aos reguladores que utilizam apenas diodo zener.

O diodo zener atua apenas como elemento de referência enquanto que o transistor é o elemento regulador ou de controle. Observa-se que o transistor está em série com a carga, daí o nome *regulador série*.

### FUNCIONAMENTO:

- A tensão de saída estará disponível na carga ( $V_L$ ), então:  $V_L = V_Z - V_{BE}$
- Como  $V_Z \gg V_{BE}$  podemos aproximar:  $V_L = V_Z$
- Sendo  $V_Z$  constante, a tensão no ponto "x" será constante
- Caso  $V_{IN}$  aumente podemos analisar o que acontece aplicando LKT:

$$V_{IN} = V_R + V_Z, \text{ mas } V_R = V_{CB}, \text{ logo: } V_{IN} = V_{CB} + V_Z \\ V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

Portanto, quando  $V_{IN}$  aumenta, como  $V_Z$  é constante,  $V_{CB}$  também aumentará provocando um aumento de  $V_{CE}$ , de modo a suprir a variação na entrada, mantendo  $V_L$  constante.

$$V_L = V_{IN} - V_{CE}$$

Então: se  $V_{IN}$  aumenta  $\rightarrow V_{CE}$  aumenta  $\rightarrow V_L$  não se altera

- Caso  $V_{IN}$  diminua podemos analisar o que acontece aplicando LKT, obedecendo aos mesmos princípios adotados anteriormente. Neste caso  $V_{CB}$  diminui.

Com a diminuição de  $V_{IN} \rightarrow V_{CE}$  diminui  $\rightarrow V_L$  não se altera

### LIMITAÇÕES:

#### Valores mínimos e máximos de $V_{IN}$

Como  $V_{IN} = V_R + V_Z$  e  $V_R = R \cdot I_R$  mas  $I_R = I_Z + I_B$

então:

$$V_{IN} = R(I_Z + I_B) + V_Z$$

Para  $V_{IN}$  mínima temos:  $V_{IN(MIN)} = R(I_{Z(MIN)} + I_{B(MAX)})$

Portanto, abaixo do valor mínimo de entrada o diodo zener perderá suas características de estabilização.

Para  $V_{IN}$  máxima temos:  $V_{IN(MAX)} = R(I_{Z(MAX)} + I_{B(MIN)})$

Acima do valor máximo de entrada o diodo zener perderá também suas características de estabilização e será danificado.

### CONDIÇÕES PARA UM PROJETO:

Alguns parâmetros devem ser observados para que o circuito opere em condições normais sem danificar seus componentes.

➤ **Tensão de entrada máxima:**

$$V_{IN(MAX)} = (I_{B(MIN)} + I_{Z(MAX)}) \cdot R + V_Z \quad (I)$$

Na pior condição  $R_L = \infty$  (carga aberta), logo  $I_{B(MIN)} = 0$

$$V_{IN(MAX)} = R \cdot (I_{Z(MAX)}) + V_Z$$

onde:  $I_{Z(MAX)} = \frac{P_{Z(MAX)}}{V_Z}$

➤ **Tensão de entrada mínima:**

$$V_{IN(MIN)} = (I_{B(MAX)} + I_{Z(MIN)}) \cdot R + V_Z \quad (II)$$

De ( I ) tiramos:  $I_{Z(MAX)} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_Z}{R} \quad (III)$

De ( II ) tiramos:  $I_{Z(MIN)} + I_{B(MAX)} = \frac{V_{IN(MIN)} - V_Z}{R} \quad (IV)$

Dividindo ( III ) e ( IV ) temos:

$$\frac{I_{Z(MAX)}}{I_{Z(MIN)} + I_{B(MAX)}} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_Z}{V_{IN(MIN)} - V_Z}$$

## PROJETO

Projetar uma fonte de alimentação estabilizada com diodo zener e transistor com as seguintes características:

Tensão de saída ( $V_L$ ): 6V  
Corrente de saída máxima ( $I_{L(MAX)}$ ): 1,5A  
Tensão de entrada ( $V_{IN}$ ): 12V  $\pm$  10%

### Escolha do transistor

O transistor a ser utilizado deverá obedecer as seguintes características:

$$V_{CBO} > V_{IN(MAX)} \rightarrow \text{no caso } 13,2V$$

$$I_{C(MAX)}^1 > I_{L(MAX)} \rightarrow \text{no caso } 1,5A$$

$$P_{C(MAX)}^2 > (V_{IN(MAX)} - V_L) \cdot I_{C(MAX)}$$

Supondo que o transistor escolhido seja o BD235, que de acordo com o manual do fabricante tem as especificações:

$$V_{CBO(MAX)} = 45V$$

$$I_{C(MAX)} = 2A$$

$$P_{C(MAX)} = 25W$$

$$\beta > 40 < 250$$

Neste caso, o valor mínimo de beta é 40 e o máximo 250. Para que o projeto funcione sem problemas adota-se o beta de menor valor.

O transistor escolhido atende as exigências quanto a  $V_{CBO(MAX)}$  e  $I_{C(MAX)}$ . No entanto é preciso verificar se a potência que será dissipada pelo coletor será suficiente para este projeto.

Verificando a potência que será dissipada pelo coletor:

$$P_{C(MAX)} = (V_{IN(MAX)} - V_L) \cdot I_{C(MAX)}$$

$$I_{C(MAX)} = I_{E(MAX)} - I_{B(MAX)}$$

$$I_{E(MAX)} = I_{L(MAX)} \rightarrow I_{C(MAX)} = I_{L(MAX)} - I_{B(MAX)}$$

$$I_{B(MAX)} = \frac{I_{C(MAX)}}{\beta_{(MIN)}} \quad \text{logo:} \quad I_{C(MAX)} = I_{L(MAX)} - \frac{I_{C(MAX)}}{\beta_{(MIN)}}$$

$$I_{C(MAX)} = \frac{I_{L(MAX)}}{1 + \frac{1}{\beta_{(MIN)}}} = \frac{1,5}{1 + \frac{1}{40}} = \frac{1,5}{1 + 0,025} = \frac{1,5}{1,025} = 1,46A$$

$$P_{C(MAX)} = (13,2V - 6V) \cdot 1,46A = 10,5W$$

*O transistor escolhido atenderá as necessidades do projeto quanto a dissipação de potência, por estar abaixo da potência máxima especificada pelo fabricante. Torna-se necessário entretanto o uso de um dissipador adequado para evitar sobreaquecimento do transistor.*

### **Escolha do diodo zener:**

Levando-se em conta que  $V_L = V_Z - V_{BE}$  e que  $V_{BE} \approx 0,7V$ , se adotarmos um diodo zener com tensão nominal de 6V, então na carga teremos 5,3V. O ideal então é adotar um diodo zener com 6,7V, porém este valor não é comercial. O valor comercial mais próximo encontrado é o BYXC6V8, que tem uma tensão nominal de 6,8V e  $P_{Z(MAX)}$  igual a 500mW com  $I_{Z(MIN)} = 8mA$ .

$$I_{Z(MAX)} = \frac{0,5W}{6,8V} = 73,53mA$$

Teremos então na carga 6,1V valor este, perfeitamente aceitável.

<sup>1</sup>  $I_{C(MAX)}$  é a máxima corrente que o coletor pode suportar

<sup>2</sup>  $P_{C(MAX)}$  é a máxima potência de dissipação do coletor

Verificando se o diodo zener escolhido pode ser utilizado:

$$I_{Z(\text{MAX})} = \left( \frac{V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z}{V_{\text{IN}(\text{MIN})} - V_Z} \right) \cdot (I_{Z(\text{MIN})} + I_{B(\text{MAX})})$$

$$I_{B(\text{MAX})} = \frac{I_{C(\text{MAX})}}{\beta_{(\text{MIN})}} = \frac{1,46\text{A}}{40} = 36,5\text{mA}$$

$$I_{Z(\text{MAX})} = \left( \frac{13,2\text{V} - 6,8\text{V}}{10,8\text{V} - 6,8\text{V}} \right) \cdot (8\text{mA} + 36,5\text{mA})$$

$$I_{Z(\text{MAX})} = \frac{6,4\text{V}}{4\text{V}} \cdot 44,5\text{mA} = 71,2\text{mA}$$

Como  $I_{Z(\text{MAX})}$  teórico = 73,53mA e  $I_{Z(\text{MAX})} = 71,2\text{mA}$  o diodo zener escolhido pode ser utilizado.

### **Cálculo de R:**

Para a máxima de tensão de entrada:  $V_{\text{IN}(\text{MAX})} = 13,2\text{V}$

$$V_{\text{IN}(\text{MAX})} = R \cdot (I_{B(\text{MIN})} + I_{Z(\text{MAX})}) + V_Z$$

Na pior condição:  $R_L = \infty \rightarrow I_{B(\text{MIN})} = 0$

$$V_{\text{IN}(\text{MAX})} = (R \cdot I_{Z(\text{MAX})}) + V_Z$$

$$R = \frac{V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z}{I_{Z(\text{MAX})}} = \frac{13,2\text{V} - 6,8\text{V}}{73,53\text{mA}} = \frac{6,4\text{V}}{73,53\text{mA}} = 87,04\Omega$$

Para a mínima tensão de entrada:  $V_{\text{IN}(\text{MIN})} = 10,8\text{V}$

$$R = \frac{V_{\text{IN}(\text{MIN})} - V_Z}{I_{B(\text{MAX})} + I_{Z(\text{MIN})}} = \frac{10,8\text{V} - 6\text{V}}{36,5\text{mA} + 8\text{mA}} = \frac{4\text{V}}{44,5\text{mA}} = 89,89\Omega$$

Portanto R deverá ser maior do que 87,04Ω e menor do que 89,89Ω. Adotaremos o valor comercial mais próximo: 91Ω

Potência dissipada pelo resistor:

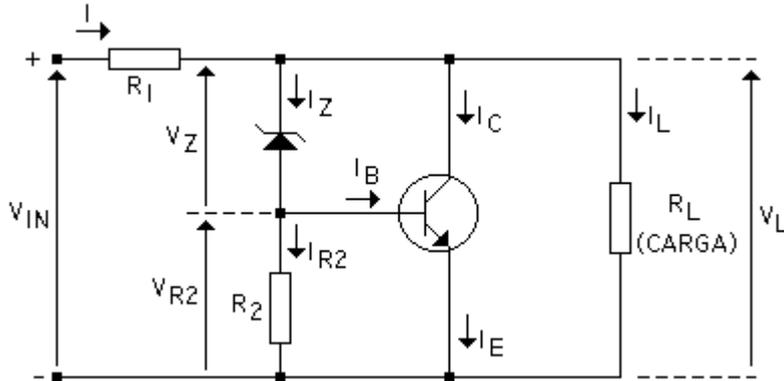
$$P = \frac{E^2}{R} \rightarrow P = \frac{(V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z)^2}{R} = \frac{(13,2\text{V} - 6\text{V})^2}{91} = \frac{(6,8\text{V})^2}{91} = 0,508\text{W}$$

Podemos adotar um valor comercial mais próximo: 1W

## REGULADOR PARALELO:

A exemplo do regulador série, o transistor atua como elemento de controle e o zener como elemento de referência.

Como a carga fica em paralelo com o transistor, daí a denominação *regulador paralelo*, cujo circuito é mostrado abaixo.



A análise do seu funcionamento segue basicamente os mesmos princípios do regulador série, no que diz respeito aos parâmetros do transistor e do diodo zener.

### FUNCIONAMENTO:

- $V_Z = V_{CB} \rightarrow$  como  $V_Z$  é constante,  $V_{CB}$  será constante
- $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$ , mas  $V_{CB} \gg V_{BE}$
- logo:  $V_{CE} = V_{CB}$ , onde  $V_{CE} = V_Z$

Ao variar a tensão de entrada dentro de certos limites, como  $V_Z$  é fixa, variará  $V_{BE}$  variando a corrente  $I_B$  e conseqüentemente  $I_C$ . Em outras palavras, variando-se a tensão de entrada ocorrerá uma atuação na corrente de base a qual controla a corrente de coletor.

Neste caso,  $V_{CE}$  tende a permanecer constante desde que  $I_Z$  não assuma valores menores que  $I_{Z(MIN)}$  e maiores que  $I_{Z(MAX)}$ .

Os parâmetros para o projeto de em regulador paralelo são essencialmente:  $V_{IN}$ ,  $V_L$  e  $I_{L(MAX)}$ .

#### ➤ Tensão de entrada máxima:

Na pior condição  $R_L = \infty \rightarrow I_L = 0$

$$V_{IN(MAX)} = R_1 \cdot (I_{L(MAX)} + I_{C(MAX)}) + V_Z + V_{BE}$$

$$\frac{V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE}}{R_1} = I_{Z(MAX)} + I_{C(MAX)} \quad (I)$$

#### ➤ Tensão de entrada mínima:

$$V_{IN(MIN)} = R_1 \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)}) + V_Z + V_{BE}$$

$$\frac{V_{IN(MIN)} - V_Z - V_{BE}}{R_1} = I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)} \quad (II)$$

Dividindo ( I ) e ( II ), temos:

$$\frac{I_{Z(\text{MAX})} + I_{C(\text{MAX})}}{I_{Z(\text{MIN})} + I_{C(\text{MIN})} + I_{L(\text{MAX})}} = \frac{V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z - V_{\text{BE}}}{V_{\text{IN}(\text{MIN})} - V_Z - V_{\text{BE}}}$$

Isolando  $I_{Z(\text{MAX})}$ :

$$I_{Z(\text{MAX})} = \left( \frac{V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z - V_{\text{BE}}}{V_{\text{IN}(\text{MIN})} - V_Z - V_{\text{BE}}} \right) \cdot (I_{Z(\text{MIN})} + I_{C(\text{MIN})} + I_{L(\text{MAX})}) - I_{C(\text{MAX})} \quad (\text{III})$$

*OBS:  $I_{C(\text{MIN})}$  é a corrente de coletor para uma tensão de entrada mínima. Em muitos projetos a mesma pode ser desprezada por não ter influência significativa no resultado final.*

➤ **Corrente em  $R_2$ :**

$$I_{R2} = I_{Z(\text{MIN})} - I_{B(\text{MIN})}, \quad \text{onde} \quad I_{B(\text{MIN})} = \frac{I_{C(\text{MIN})}}{\beta_{(\text{MIN})}}$$

$$\text{portanto: } I_{R2} = I_{Z(\text{MIN})} - \frac{I_{C(\text{MIN})}}{\beta_{(\text{MIN})}} \quad (\text{IV})$$

Quando a tensão de entrada for máxima e a carga estiver aberta (pior condição), um acréscimo de corrente circulará pelo diodo zener. Como  $V_{\text{BE}}$  é praticamente constante, essa corrente circulará pela base do transistor, daí então teremos:

$$\begin{cases} I_{C(\text{MAX})} = \beta_{(\text{MIN})} \cdot I_{B(\text{MAX})} \\ I_{B(\text{MAX})} = I_{Z(\text{MAX})} - I_{R2} \end{cases} \quad \left| \quad I_{C(\text{MAX})} = \beta_{(\text{MIN})} \cdot (I_{Z(\text{MAX})} - I_{R2}) \quad (\text{V}) \right.$$

Substituindo ( V ) em ( III ), temos:

$$I_{Z(\text{MAX})} = \left( \frac{V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z - V_{\text{BE}}}{V_{\text{IN}(\text{MIN})} - V_Z - V_{\text{BE}}} \right) \cdot (I_{Z(\text{MIN})} + I_{C(\text{MIN})} + I_{L(\text{MAX})}) - \beta_{(\text{MIN})} \cdot (I_{Z(\text{MAX})} - I_{R2})$$

$$I_{Z(\text{MAX})} = \left[ \left( \frac{V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z - V_{\text{BE}}}{V_{\text{IN}(\text{MIN})} - V_Z - V_{\text{BE}}} \right) \cdot (I_{Z(\text{MIN})} + I_{C(\text{MIN})} + I_{L(\text{MAX})}) + \beta_{(\text{MIN})} \cdot I_{R2} \right] \cdot \frac{1}{\beta_{(\text{MIN})} + 1}$$

**Escolha do transistor:**

Deverão ser observados os parâmetros:

$$\begin{aligned} V_{\text{CEO}}^3 &> (V_Z + V_{\text{BE}}) \\ I_{C(\text{MAX})} &> I_{L(\text{MAX})} \\ P_{C(\text{MAX})} &> (V_Z + V_{\text{BE}}) \cdot I_{C(\text{MAX})} \end{aligned}$$

**Escolha do diodo zener:**

Os parâmetros são idênticos aos adotados no regulador série.

## PROJETO

Projetar um regulador paralelo , com as seguintes características:

$$\begin{aligned} V_L &= 15\text{V} \\ I_{C(\text{MAX})} &= 600\text{mA} \end{aligned}$$

---

<sup>3</sup>  $V_{\text{CEO}}$  é a tensão entre coletor e emissor com a base aberta

$$V_{IN} = 22V \pm 10\%$$

### Escolha do transistor:

O transistor deverá ter as seguintes características:

$$\begin{aligned} V_{CEO} &> (V_{CE} + V_{VBE}) \\ I_{C(MAX)} &> I_{L(MAX)} \\ P_{C(MAX)} &> (V_Z + V_{BE}) \cdot I_{C(MAX)} \end{aligned}$$

Adotaremos o transistor 2N3534, que tem as características:

$$\begin{aligned} V_{CEO} &= 35V \\ I_{C(MAX)} &= 3A \\ P_{C(MAX)} &= 35W \\ \beta \text{ (mínimo} &= 40; \text{ máximo} = 120) \end{aligned}$$

### Escolha do diodo zener:

O diodo zener escolhido foi o BZX1C15, que tem as características:

$$\begin{aligned} P_{Z(MAX)} &= 1,3W \\ I_{Z(MIN)} &= 20mA \\ V_Z &= 15V \\ I_{Z(MAX)} &= \frac{P_{Z(MAX)}}{V_Z} = \frac{1,3}{15} = 86,67mA \end{aligned}$$

### Verificando se o diodo zener escolhido pode ser utilizado:

$$I_{Z(MAX)} = \left[ \left( \frac{V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE}}{V_{IN(MIN)} - V_Z - V_{BE}} \right) \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)}) + \beta_{(MIN)} \cdot I_{R2} \right] \cdot \frac{1}{\beta_{(MIN)} + 1}$$

Desprezando  $I_{C(MIN)} \rightarrow I_{C(MIN)} = 0$ , então como  $I_{R2} = I_{Z(MIN)} - \frac{I_{C(MIN)}}{\beta_{(MIN)}}$ ,  $I_{R2} = 20mA$

$$I_{Z(MAX)} = \left[ \left( \frac{24,2V - 15V - 0,7V}{19,8V - 15V - 0,7V} \right) \cdot (20mA + 0 + 600mA) + 40 \cdot (20mA) \right] \cdot \frac{1}{41}$$

$$I_{Z(MAX)} = \left[ \left( \frac{8,5V}{4,1V} \right) \cdot (620mA + 800mA) \right] \cdot 0,0244 = (2,073 \cdot 1,42) \cdot 0,0244 = 71,83mA$$

$I_{Z(MAX)} = 71,83mA$  (o zener pode escolhido é compatível)

### Calculando $I_{C(MAX)}$ :

$$I_{C(MAX)} = \beta_{(MIN)} \cdot (I_{Z(MAX)} - I_{R2})$$

$$I_{C(MAX)} = 40 \cdot (71,83mA - 20mA)$$

$$I_{C(MAX)} = 40 \cdot 51,83mA = 2,073A$$

$I_{C(MAX)} = 2,073A$  (o transistor é compatível quando a  $I_{C(MAX)}$ )

**Calculando  $P_{C(MAX)}$ :**

$$P_{C(MAX)} = (V_Z + V_{BE}) \cdot I_{C(MAX)} = 15,07 \cdot 2,073 = 31,24W$$

$$P_{C(MAX)} = 31,24W$$

*O transistor escolhido atenderá as necessidades do projeto quanto a dissipação de potência, por estar abaixo da potência máxima especificada pelo fabricante. Torna-se necessário entretanto o uso de um dissipador adequado para evitar sobreaquecimento do transistor.*

**Calculando  $R_2$ :**

$$V_{R2} = R_2 \cdot I_{R2} \rightarrow V_{R2} = V_{BE}$$

$$R_2 = \frac{V_{BE}}{I_{R2}} = \frac{0,7V}{20mA} = 35\Omega \quad (\text{adotar } 33\Omega)$$

$$P_{R2} = \frac{(E_{R2})^2}{R_2} = \frac{(0,7)^2}{33\Omega} = \frac{0,49V}{33\Omega} = 14,85mW$$

**Calculando  $R_1$ :**

$$R_1 = \frac{V_{IN(MIN)} - V_Z - V_{BE}}{I_{Z(MIN)} + I_{C(MIN)} + I_{L(MAX)}} = \frac{19,8V - 15V - 0,7V}{20mA + 600mA} = \frac{4,1V}{620mA} = 6,613\Omega$$

OBS:  $I_{C(MIN)} = 0$

$$R_1 = \frac{V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE}}{I_{Z(MAX)} + I_{C(MAX)}} = \frac{24,2V - 15V - 0,7V}{86,67mA + 2,073A} = \frac{8,5V}{2,16} = 3,94\Omega$$

$R_1$  deverá ser maior do que  $3,94\Omega$  e menor do que  $6,613\Omega$   
 $3,94\Omega < R < 6,61\Omega$

$R_1$  adotado =  $5,6\Omega$  (valor comercial)

**Potência dissipada por  $R_1$ :**

$$P_{R1} = \frac{(V_{R1})^2}{R_1} = \frac{(V_{IN(MAX)} - V_Z - V_{BE})^2}{5,6\Omega} = \frac{(24,2V - 15V - 0,7V)^2}{5,6\Omega} = \frac{(8,5V)^2}{5,6\Omega} = 12,9W$$

(adotar 15W - valor comercial)

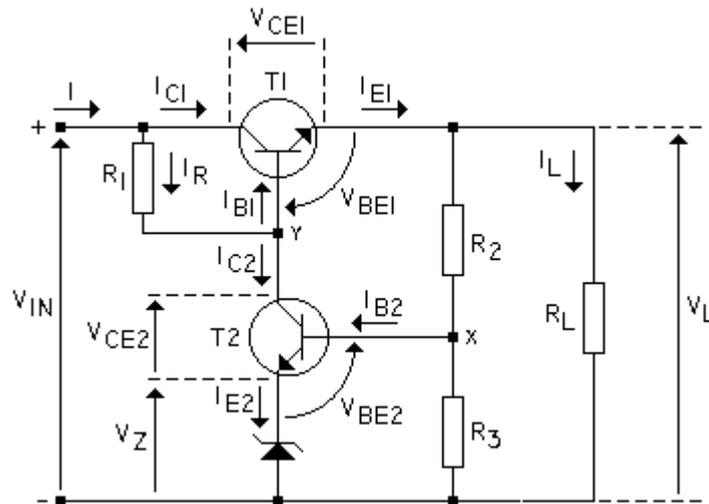
**REGULADOR COM AMPLIFICADOR DE ERRO:**

O regulador com amplificador de erro torna o circuito mais sensível às variações da tensão de entrada, ou variações da corrente de carga, através da introdução de um transistor junto ao elemento de referência.

A figura a seguir ilustra esse tipo de regulador, onde os elementos que compõem o circuito tem as seguintes funções:

- Diodo Zener: é utilizado como elemento de referência de tensão;
- Transistor  $T_1$ : é o elemento de controle, que irá controlar a tensão de saída a partir de uma tensão de correção a ele enviada através de um circuito comparador;
- Transistor  $T_2$ : é basicamente um comparador de tensão DC, isto é, compara duas tensões,  $V_{R2}$  e  $V_{R3}$ , sendo a tensão  $V_{R3}$  fixa (denominada também tensão de referência), cuja

finalidade é controlar a tensão de polarização do circuito de controle. Qualquer diferença de tensão entre os dois resistores irá fornecer à saída do comparador uma tensão de referência que será aplicada ao circuito de controle.



### FUNCIONAMENTO:

Quando houver uma variação da tensão de entrada, a tendência é ocorrer uma variação da tensão de saída.

Supondo que  $V_{IN}$  aumente, a tensão nos extremos de  $R_L$  tenderá a aumentar, aumentando a tensão  $V_{R2}$  e  $V_{R3}$ , mas, como a tensão no emissor de  $T_2$  é fixada por  $V_Z$ , então um aumento de tensão no ponto "x" provocará um aumento de  $V_{BE2}$ , que aumentará  $I_{B2}$  e conseqüentemente  $I_{C2}$ .

Quando  $I_{C2}$  aumenta, haverá um aumento da tensão em  $R_1$  ( $V_{R1}$ ), uma vez que a tensão do emissor de  $T_2$  é fixada pela tensão de zener ( $V_Z$ ).

Como  $V_{BE1}$  é fixa, então um aumento de  $V_{R1}$  provocará um aumento de  $V_{CE1}$ .

Lembrar que  $V_{R1} = V_{CB1}$  e que  $V_{CB1} + V_{BE1} = V_{CE1}$ .

Um aumento de  $I_{C2}$  provocará também um discreto aumento na corrente de base de  $T_1$  ( $I_{B1}$ ).

$$I_{C2} = I_{R1} - I_{B1}$$

$$I_{R1} = I_{C2} + I_{B1}$$

### FORMULÁRIO:

#### ➤ Considerando a tensão de entrada máxima

$$V_{IN(MAX)} = V_L + V_{BE1(MIN)} + R_1 \cdot (I_{Z(MAX)} + I_{B1(MIN)})$$

mas,  $I_{Z(MAX)} \gg I_{B1(MIN)}$ , logo:

$$V_{IN(MAX)} = V_L + V_{BE1(MIN)} + R_1 \cdot (I_{Z(MAX)})$$

$$I_{Z(MAX)} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{R_1} \quad (I)$$

#### ➤ Considerando a tensão de entrada mínima

$$V_{IN(MIN)} = V_L + V_{BE1(MAX)} + R_1 \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{B1(MAX)})$$

$$I_{Z(MIN)} + I_{B1(MAX)} = \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{R_1}$$

mas,  $I_{B(MAX)} = \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}} \rightarrow I_{L(MAX)} \approx I_{C(MAX)} \rightarrow$  temos então:

$$I_{Z(MIN)} + \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}} = \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{R_1} \quad (II)$$

dividindo (I) e (II)

$$\frac{I_{Z(MAX)}}{I_{Z(MIN)} + \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}}} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}$$

$$I_{Z(MAX)} = \left( \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}} \right) \cdot \left( I_{Z(MIN)} + \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}} \right) \quad (III)$$

### Cálculo de $R_1$

$$R_1 > \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{I_{Z(MAX)}} \rightarrow R_1 < \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{I_{Z(MIN)} + \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}}}$$

A potência desenvolvida em  $R_1$  no pior caso é dada por:

$$V_{R1} = V_{IN(MAX)} - (V_L + V_{BE1(MIN)})$$

$$P_{R1} = \frac{[(V_{IN(MAX)} - (V_L + V_{BE1(MIN)}))]^2}{R_1 \text{ (adotado)}}$$

### Cálculo de $R_2$

Adota-se uma regra prática, onde:  $I_{R2} = 0,1 \cdot I_{C2}$

➤ Quando  $I_{C2} = I_{Z(MIN)} \rightarrow R_2 < \frac{V_L - V_Z - V_{BE2(MAX)}}{0,1 \cdot I_{Z(MIN)}}$

➤ Quando  $I_{C2} = I_{Z(MAX)} \rightarrow R_2 > \frac{V_L - V_Z - V_{BE2(MIN)}}{0,1 \cdot I_{Z(MAX)}}$

$$I_{Z(MAX)} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{R_1 \text{ (adotado)}}$$

$$I_{Z(MIN)} = \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{R_1 \text{ (adotado)}} - I_{B1(MAX)} \rightarrow I_{B1(MAX)} = \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{1(MIN)}}$$

### Cálculo de potência dissipada em $R_2$

$$V_{R2} = V_L - V_Z - V_{BE2(MIN)}$$

$$P_{R2} = \frac{(V_L - V_Z - V_{BE2(MIN)})^2}{R_2 \text{ (adotado)}}$$

### Cálculo de R<sub>3</sub>

$$V_{R3} = V_L \cdot \left( \frac{R_3}{R_3 + R_2} \right) \rightarrow V_{R3} \cdot (R_3 + R_2) = V_L \cdot R_3$$

$$V_{R3} \cdot R_2 + V_{R3} \cdot R_3 = V_L \cdot R_3 \rightarrow V_{R3} \cdot R_2 = V_L \cdot R_3 - V_{R3} \cdot R_3$$

$$V_{R3} \cdot R_2 = R_3 \cdot (V_L - V_{R3})$$

$$R_3 = \frac{V_{R3} \cdot R_2}{V_L - V_{R3}} \rightarrow (R_2 \text{ adotado no cálculo anterior})$$

### Cálculo de potência em R<sub>3</sub>

Em R<sub>3</sub> temos:  $V_{R3} = V_Z + V_{BE2(MAX)}$

$$P_{R3} = \frac{(V_Z + V_{BE2(MAX)})^2}{R_3 \text{ (adotado)}}$$

## PROJETO

Projetar uma fonte regulada com amplificador de erro, usando dois transistores e um diodo zener de referência, que obedeça as características:

$$V_{IN} = 25V \pm 10\%$$

$$I_{L(MAX)} = 800mA$$

$$\text{Tensão na carga } (V_L) = 12V$$

Teremos:  $V_{IN(MAX)} = 25 + 2,5 = 27,5V \rightarrow V_{IN(MIN)} = 25 - 2,5 = 22,5V$

### Escolha de T<sub>1</sub>:

O transistor T<sub>1</sub> deverá ter as seguintes características:

$$I_{C(MAX)} > I_{L(MAX)} = 0,8A$$

$$V_{CEO} > V_{IN(MAX)} - V_L = 27,5 - 12 = 15,5V$$

$$P_{C(MAX)} > (V_{IN(MAX)} - V_L) \cdot I_{L(MAX)} = (27,5V - 12V) \cdot 800mA = 12,4W$$

O transistor escolhido foi o BD233 que tem os seguintes parâmetros:

$$V_{CEO} = 45V$$

$$I_{C(MAX)} = 2A$$

$$P_{C(MAX)} = 25W$$

$$\beta_{(MIN)} = 40 \rightarrow \beta_{(MAX)} = 250$$

### Escolha do diodo zener:

Podemos escolher uma tensão de referência. Adotamos como tensão de referência para nosso projeto  $V_Z$  aproximadamente  $0,5V_L$ . No entanto, outro valor pode ser escolhido.

Para este projeto, optou-se pelo diodo zener BZX87-C5V1, que tem os parâmetros:

$$I_{Z(MIN)} = 50mA$$

$$V_Z = 5,1V$$

$$P_{Z(MAX)} = 1,3W$$

Devemos verificar se o zener escolhido é adequado ao projeto:

$$I_{Z(MAX)} = \frac{P_{Z(MAX)}}{V_Z} = \frac{1,3W}{5,1V} = 255mA$$

$$I_{Z(MAX)} = \left( \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}} \right) \cdot \left( I_{Z(MIN)} + \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{I(MIN)}} \right)$$

Adotando para este projeto  $V_{BE1(MIN)} = 0,6V$  e para  $V_{BE1(MAX)} = 0,7V$

$$I_{Z(MAX)} = \left( \frac{27,5V - 12V - 0,6V}{22,5V - 12V - 0,7V} \right) \cdot \left( 50mA + \frac{800mA}{40} \right)$$

$$I_{Z(MAX)} = \left( \frac{14,9V}{9,8V} \right) \cdot 70mA = 106,43mA$$

Portanto, o diodo escolhido poderá ser usado.

### Escolha de $T_2$ :

O transistor  $T_2$  deverá ter as seguintes características:

$$V_{CEO} > (V_L + V_{BE2(MIN)} - V_Z) = (12V + 0,6V) - 5,1V = 12,6V - 5,1V = 7,5V$$

$$I_{C(MAX)} > I_{Z(MAX)} = 255mA$$

$$P_{C(MAX)} > [(V_L + V_{BE1(MIN)}) - V_Z] \cdot I_{Z(MAX)}$$

$$P_{C(MAX)} > [(12V + 0,6V) - 5,1V] \cdot 255mA = 1,912W$$

Para o transistor  $T_2$  também foram adotados os valores de 0,6V e 0,7V para  $V_{BE2(MIN)}$  e  $V_{BE2(MAX)}$  respectivamente.

O transistor escolhido foi o BD135 que tem as seguintes características:

$$V_{CEO} = 45V$$

$$I_{C(MAX)} = 1A$$

$$P_{C(MAX)} = 8W$$

$$\beta_{(MIN)} = 40 \rightarrow \beta_{(MAX)} = 250$$

### Cálculo de $R_1$ :

$$R_1 > \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{I_{Z(MAX)}} = \frac{27,5V - 12V - 0,6V}{255mA} = \frac{14,9V}{255mA} = 58,4\Omega$$

$$R_1 < \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{I_{Z(MIN)} + \frac{I_{L(MAX)}}{\beta_{I(MIN)}}} = \frac{22,5V - 12V - 0,7V}{50mA + \frac{800mA}{40}} = \frac{9,8V}{70mA} = 140\Omega$$

$$58,4\Omega < R_1 < 140\Omega \rightarrow \text{valor adotado: } 100\Omega$$

Calculando a potência desenvolvida em R<sub>1</sub>:

$$P_{R1} = \frac{[(V_{IN(MAX)} - (V_L + V_{BE(MIN)}))]^2}{R_1 \text{ (adotado)}} = \frac{(27,5V - 12,6V)^2}{100\Omega} = \frac{(14,9V)^2}{100\Omega} = 2,22W$$

(adotar 5W)

**Cálculo de R<sub>2</sub>:**

$$R_2 > \frac{V_L - V_Z - V_{BE2(MIN)}}{0,1 \cdot I_{Z(MAX)}} \rightarrow I_{Z(MAX)} = \frac{V_{IN(MAX)} - V_L - V_{BE1(MIN)}}{R_1 \text{ (adotado)}}$$

$$I_{Z(MAX)} = \frac{27,5V - 12V - 0,6V}{100\Omega} = 149mA$$

$$R_2 > \frac{12V - 5,1V - 0,6V}{14,9mA} = \frac{6,3V}{14,9mA} = 422,82\Omega$$

$$R_2 < \frac{V_L - V_Z - V_{BE2(MAX)}}{0,1 \cdot I_{Z(MIN)}} \rightarrow I_{Z(MIN)} = \frac{V_{IN(MIN)} - V_L - V_{BE1(MAX)}}{R_1 \text{ (adotado)}} - I_{B1(MAX)}$$

$$I_{Z(MIN)} = \frac{22,5V - 12V - 0,7V}{100} - \frac{800mA}{40} = 98mA - 20mA = 78mA$$

$$R_2 < \frac{12V - 5,1V - 0,7V}{7,8mA} = \frac{6,2V}{7,8mA} = 794,87\Omega$$

$$422,82\Omega < R_2 < 794,87\Omega \rightarrow \text{adotar } 560\Omega$$

Calculando a potência desenvolvida em R<sub>2</sub>:

$$P_{R2} = \frac{(V_L - V_Z - V_{BE2(MIN)})^2}{R_2 \text{ (adotado)}}$$

$$P_{R2} = \frac{(12V - 5,1V - 0,6V)^2}{560\Omega} = \frac{(6,3V)^2}{560\Omega} = 70,88mW$$

**Cálculo de R<sub>3</sub>:**

$$R_3 = \frac{V_{R3} \cdot R_2}{V_L - V_{R3}} = \frac{5,7V \cdot (560\Omega)}{12V - 5,7V} = \frac{3.192}{6,3} = 506,67\Omega \rightarrow \text{adotar } 470\Omega$$

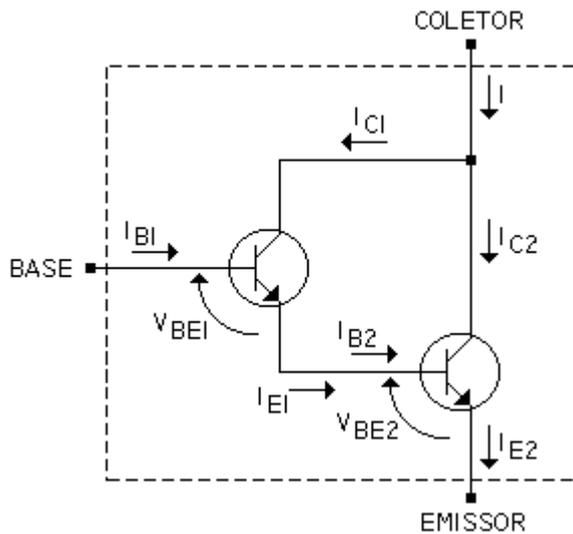
onde:  $V_{R3} = (V_Z + V_{BE2(MIN)})$

Calculando a potência desenvolvida em R<sub>3</sub>:

$$P_{R3} = \frac{(V_Z + V_{BE2(MAX)})^2}{R_3 \text{ (adotado)}}$$

$$P_{R3} = \frac{(5,1V + 0,7V)^2}{470\Omega} = \frac{(5,8)^2}{470\Omega} = 71,57mW$$

## CONFIGURAÇÃO DARLINGTON:



A configuração Darlington consiste na ligação entre dois transistores na configuração seguidor de emissor, ligados em cascata, conforme ilustra a figura ao lado, proporcionando em relação a um único transistor um ganho de corrente bastante elevado.

O ganho total de tensão é aproximadamente igual a 1.

Se  $\beta_1 = \beta_2 = 100$ , teremos:  $I_{C1} = I_{E1}$  e  $I_{C2} = I_{E2}$

O ganho total ( $\beta_T$ ) será dado por:  $\beta_1 \cdot \beta_2 = 100 \cdot 100 = 10.000$

Assim,  $I_{C2} = \beta_T \cdot I_{B1}$

A tensão entre base e emissor é dada por:  $V_{BE} = V_{BE1} + V_{BE2}$

Por se tratar da configuração emissor comum, assume valor bastante elevado de impedância de entrada e valor bastante baixo de impedância de saída, em relação a um transistor comum. A configuração Darlington normalmente é encontrada em um único invólucro, como por exemplo os transistores BD262 e BD263, com polaridades *pnp* e *nnp* respectivamente.

## PROJETO DE UM REGULADOR SÉRIE COM TRANSISTOR DARLINGTON

Reprojetar o regulador série da página 1, utilizando transistor Darlington; proceder a uma análise do projeto comparando-o ao projeto anterior e apresentar conclusões.

Características do regulador:

Tensão de saída ( $V_L$ ): 6V  
 Corrente de saída máxima ( $I_{L(MAX)}$ ): 1,5A  
 Tensão de entrada ( $V_{IN}$ ): 12V  $\pm$  10%

Para este projeto foi escolhido o transistor BD263, cujas características são:

$$V_{CBO} = 80V$$

$$I_{C(MAX)} = 4A$$

$$P_{C(MAX)} = 36W$$

$$\beta_{(MIN)} = 500 \rightarrow \beta_{(MAX)} = 1.000$$

Neste caso,  $V_{BE}$  é maior. Vamos considerar para este projeto,  $V_{BE} = 1,4V$   
 Desta forma, o diodo zener deverá ter uma tensão:  $6V + 1,4V = 7,4V$ .  
 O valor comercial mais próximo é de  $7,5V$ .

O diodo zener escolhido foi oBZX75C7V5, cujas características são:

$$V_Z = 7,5V$$

$$P_{Z(MAX)} = 400mW$$

$$I_{Z(MIN)} = 10mA$$

$$I_{Z(MAX)} = \frac{0,4W}{7,5V} = 53,33mA$$

### Verificando a escolha do transistor:

$$P_{C(MAX)} = (V_{IN(MAX)} - V_L) \cdot I_{C(MAX)}$$

$$I_{C(MAX)} = I_{E(MAX)} - I_{B(MAX)}$$

$$I_{E(MAX)} = I_{L(MAX)} \rightarrow I_{C(MAX)} = I_{L(MAX)} - I_{B(MAX)}$$

$$I_{B(MAX)} = \frac{I_{C(MAX)}}{\beta_{(MIN)}} \quad \text{logo:} \quad I_{C(MAX)} = I_{L(MAX)} - \frac{I_{C(MAX)}}{\beta_{(MIN)}}$$

$$I_{C(MAX)} = \frac{I_{L(MAX)}}{1 + \frac{1}{\beta_{(MIN)}}} = \frac{1,5}{1 + \frac{1}{500}} = \frac{1,5}{1 + 0,002} = \frac{1,5}{1,002} = 1,497A$$

$$P_{C(MAX)} = (13,2V - 6V) \cdot 1,497A = 10,78W$$

*O transistor escolhido poderá ser utilizado, no entanto, é aconselhável a utilização de um dissipador de calor para evitar o sobreaquecimento do transistor.*

### Verificando a escolha do zener:

$$I_{Z(MAX)} = \left( \frac{V_{IN(MAX)} - V_Z}{V_{IN(MIN)} - V_Z} \right) \cdot (I_{Z(MIN)} + I_{B(MAX)})$$

$$I_{B(MAX)} = \frac{I_{C(MAX)}}{\beta_{(MIN)}} = \frac{1,497A}{500} = 2,994mA$$

$$I_{Z(MAX)} = \left( \frac{13,2V - 7,5V}{10,8V - 7,5V} \right) \cdot (10mA + 2,994mA)$$

$$I_{Z(\text{MAX})} = \frac{5,7\text{V}}{3,3\text{V}} \cdot 12,994\text{mA} = 22,44\text{mA}$$

Como  $P_{Z(\text{MAX})}$  teórico = 53,33mW e  $I_{Z(\text{MAX})} = 22,44\text{mA}$  o diodo zener escolhido pode ser utilizado.

### **Cálculo de R:**

Para a máxima de tensão de entrada:  $V_{\text{IN}(\text{MAX})} = 13,2\text{V}$

$$V_{\text{IN}(\text{MAX})} = R \cdot (I_{B(\text{MIN})} + I_{Z(\text{MAX})}) + V_Z$$

Na pior condição:  $R_L = \infty \rightarrow I_{B(\text{MIN})} = 0$

$$V_{\text{IN}(\text{MAX})} = (R \cdot I_{Z(\text{MAX})}) + V_Z$$

$$R = \frac{V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z}{I_{Z(\text{MAX})}} = \frac{13,2\text{V} - 7,5\text{V}}{53,33\text{mA}} = \frac{5,7\text{V}}{53,33\text{mA}} = 106,88\Omega$$

Para a mínima tensão de entrada:  $V_{\text{IN}(\text{MIN})} = 10,8\text{V}$

$$R = \frac{V_{\text{IN}(\text{MIN})} - V_Z}{I_{B(\text{MAX})} + I_{Z(\text{MIN})}} = \frac{10,8\text{V} - 7,5\text{V}}{2,994\text{mA} + 10\text{mA}} = \frac{3,3\text{V}}{12,994\text{mA}} = 253,96\Omega$$

Portanto R deverá ser maior do que 106,88Ω e menor do que 253,96Ω. Adotaremos o valor comercial mais próximo a partir de uma média aritmética dos dois valores, que neste caso é 180Ω.

Potência dissipada pelo resistor:

$$P = \frac{E^2}{R} \rightarrow P = \frac{(V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_Z)^2}{R} = \frac{(13,2\text{V} - 7,5\text{V})^2}{180} = \frac{(5,7\text{V})^2}{180} = 180,5\text{mW}$$

Podemos adotar um valor comercial mais próximo: 250mW (1/4W).

### **COMPARAÇÕES:**

Parâmetros	Projeto com transistor comum	Projeto com transistor Darlington
$R_1$	91Ω	180Ω
$P_{R1}$	508mW	180,5mW
$I_{C(\text{MAX})}$	1,46A	1,497A
$P_{C(\text{MAX})}$	10,5W	10,78W
$I_{Z(\text{MAX})}$ teórico	73,53mA	53,33mA
$I_{Z(\text{MAX})}$ prático	71,2mA	22,44mA
$V_Z$	6,8V	7,5V
$I_{B(\text{MAX})}$	36,5mA	2,994mA

Dos parâmetros acima apresentados, a conclusão mais importante é que com o transistor Darlington controla-se uma corrente de carga com uma corrente de base bem menor. Isto se explica pelo fato de que o ganho de corrente no transistor Darlington é bem maior.

## **BIBLIOGRAFIA:**

*Malvino, Albert Paul* - ELETRÔNICA - vols. 1 e 2 - Ed. McGraw-Hill SP - 1.986

*Boylestad, Robert - Nashelsky, Louis* - DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS - Ed. Prentice/Hall Brasil - RJ - 1.993

*Schilling, Donald L. - Belove, Charles* - ELECTRONIC CIRCUITS - McGraw-Hill International Editions - Singapore

*Horenstein, Mark N.* - MICROELETRÔNICA CIRCUITOS E DISPOSITIVOS - Ed. Prentice/Hall - RJ - 1.996

*Grob, Bernard* - BASIC ELECTRONICS - McGraw-Hill Kogakusha - Tokyo - 1.990

*Ibrape* - MANUAL DE TRANSISTORES - DADOS PARA PROJETOS - 1.990