

MÓDULO TRÊS: REGULADOR DE CORRENTE

Introdução: As fontes de corrente, conhecidas como geradores de corrente, ou cargas ativas, tem como princípio de funcionamento, regular a corrente (manter a corrente constante) dentro de limites estabelecidos no projeto para a variação da tensão de entrada, para a variação da corrente de saída e outros parâmetros como temperatura de operação etc...

3.1 EQUAÇÃO GERAL DA REGULAÇÃO DA SAÍDA

$$\partial I_L = \frac{\partial I_L}{\partial V_E} \Delta V_E + \frac{\partial I_L}{\partial V_L} \Delta V_L + \frac{\partial I_L}{\partial \theta} \Delta \theta + \dots$$

3.2 DIAGRAMA DE BLOCO DE UMA FONTE DE CORRENTE.

O diagrama abaixo apresenta em bloco a fonte onde:

V_E = Tensão de entrada da fonte (Não Regulada);

V_L = Tensão de saída (Regulada)

I_L = Corrente de Saída (Corrente na Carga)

R_L = Resistência de saída (Carga da fonte)



3.3 FATORES DE LINEARES DE ESTABILIDADE

Denominando de **A** o fator de estabilidade da entrada e de **B** o fator de estabilidade de saída, teremos:

$$A = \frac{\partial I_L}{\partial V_E} \quad \text{e} \quad B = \frac{\partial I_L}{\partial V_L}$$

A equação de geral de estabilidade da fonte de corrente fica:

$$\Delta I_L = A \Delta V_E + B \Delta V_L$$

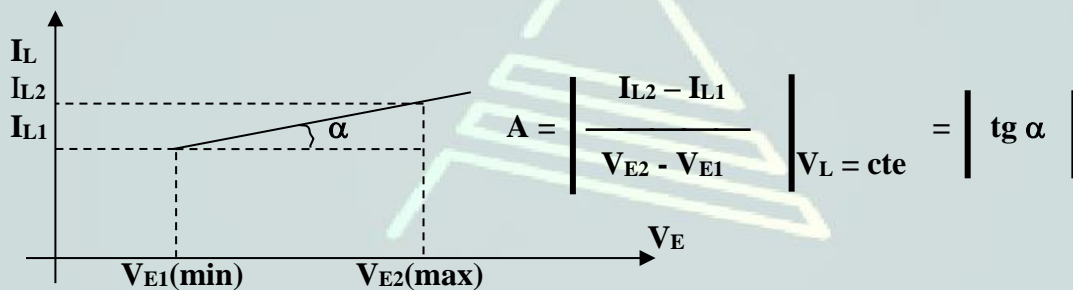
3.4 CÁLCULO DOS FATORES DE ESTABILIDADES PELA CURVA CARACTERÍSTICA DA CORRENTE DE SAÍDA EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE ENTRADA E TENSÃO DE SAÍDA.

a) Pela Variação da tensão de entrada (Estabilidade de entrada)

Variando-se a tensão de entrada, mantendo R_L constante e medindo a corrente de saída.



3.5 CURVA CARACTERÍSTICA DA ESTABILIDADE PELA ENTRADA



3.6 CÁLCULO DA PORCENTAGEM DE ESTABILIDADE PELA ENTRADA

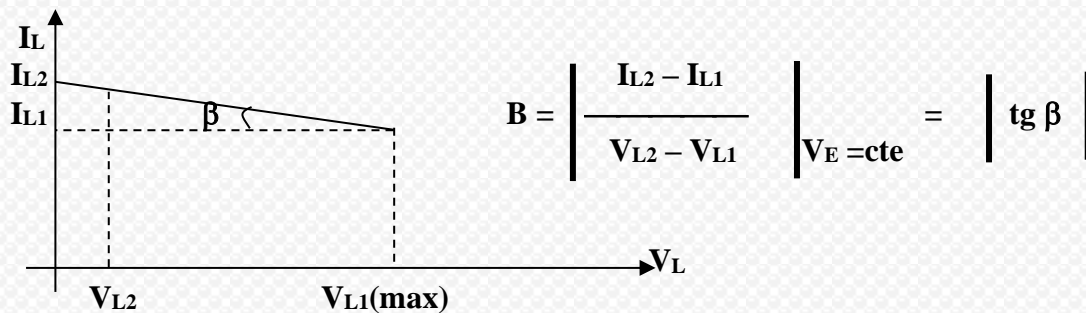
$$\% \text{ Regulação de Entrada} = A \times 100$$

b) Pela variação da corrente de saída (Estabilidade de saída)

Variando-se a corrente de carga através de R_L e mantendo-se a tensão de entrada constante.



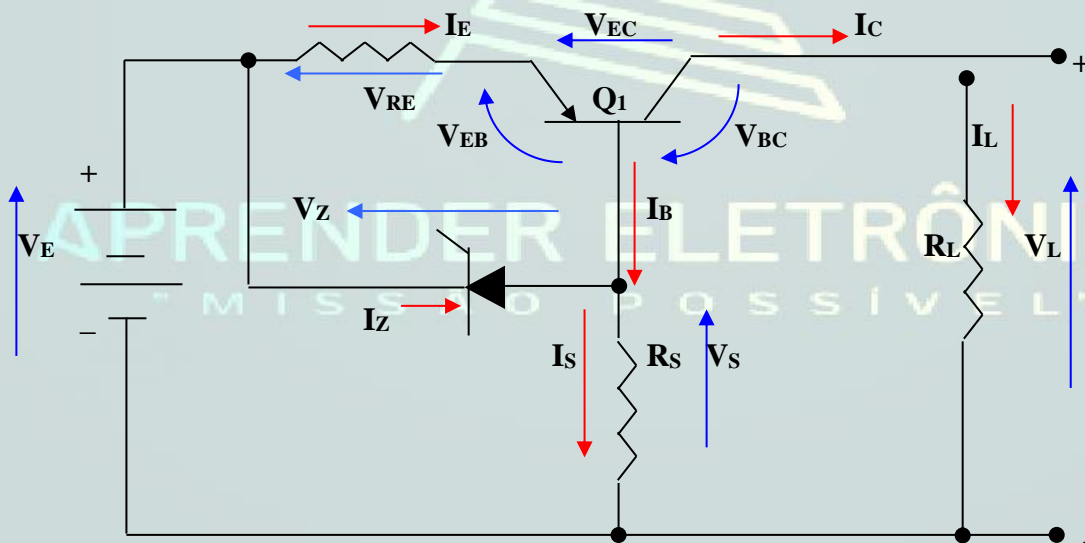
3.7 CURVA CARACTERÍSTICA DA ESTABILIDADE PELA SAÍDA



3.8 CÁLCULO DA PORCENTAGEM DE ESTABILIDADE PELA SAÍDA

$$\% \text{Regulação de Saída} = B \times 100$$

3.9 GERADOR DE CORRENTE A DIODO ZENER E TRANSISTOR



3.10. ANÁLISE DO CIRCUITO

A) TENSÕES

$$V_E = V_L + V_{EC} \quad (1)$$

$$V_E = V_Z + V_S \quad (2)$$

$$V_Z = V_{RE} + V_{EB} \quad (3)$$

$$V_L = V_S - V_{BC} \quad (4)$$

B) CORRENTES

$$I_C = I_E \quad (I_B \text{ desprezível, pois } \beta \text{ é grande}) = I_L \quad (5)$$

$$I_S = I_Z + I_B \quad (6)$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B \quad (7)$$

3.11. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TRANSISTOR E DO ZENER

- $V_{EC\ SAT} = 0,3V$, $V_{EB\ SAT} = 0,7V$.
 BV_{ECO} = Tensão de ruptura coletor emissor.
 P_{CMAX} = Potência Máxima do transistor = $V_{EC} \cdot I_C$.
 β = Ganho do transistor.
 $P_{Z\ MAX}$ = Potência máxima no zener.
 V_Z = Tensão Nominal do zener.
 I_C = Corrente máxima do transistor.

3.12 DIMENSIONAMENTO DA FAIXA DE VALORES PARA O RESISTOR R_S , $I_L = \text{cte}$.

Quando I_L é constante, temos: $I_B = I_L / \beta$.

$$R_{S\ MIN} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Z\ MAX} + I_B} \quad R_{S\ MAX} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Z\ MIN} + I_B}$$

Adota-se um valor para: $R_{S\ MIN} \leq R_S \leq R_{S\ MAX}$.

3.13 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE CORRENTE DO CIRCUITO PARA AS SITUAÇÕES DE VARIAÇÕES NA ENTRADA E NA SAÍDA.

Para cada situação deveremos analisar para os efeitos desta variação no transistor e no zener e escolher a condição que satisfaz ambas as situações.

a) Mantendo $R_L = \text{constante}$ e variando-se V_E para valores mínimo e máximo.

a.1 - Para o zener

$$V_{E\ MIN1} = R_S (I_{Z\ MIN} + I_B) + V_Z \quad (8)$$

$$V_{E\ MAX1} = R_S (I_{Z\ MAX} + I_B) + V_Z \quad (9)$$

a.2 - Para o transistor

$$V_{E\ MIN2} = V_{EC\ MIN} + V_L + V_{RE} = V_{CE\ MIN} + I_L(R_E + R_L)$$

$$V_{E\ MAX2} = V_{EC\ MAX} + V_L = BV_{ECO} + I_L(R_E + R_L)$$

$$V_{E\ MAX3} = \frac{P_{CMAX}}{I_L} + I_L (R_E + R_L)$$

a.3 - Escolha dos valores de entrada $V_{E\ MIN}$ e $V_{E\ MAX}$

- Entre os valores de $V_{E\ MIN}$ escolher o **Maior** valor de $V_{E\ MIN}$.
- Entre os valores de $V_{E\ MAX}$ escolher o **Menor** valor de $V_{E\ MAX}$.

c) Mantendo $V_E =$ constante e variando-se R_L para valor mínimo e máximo.

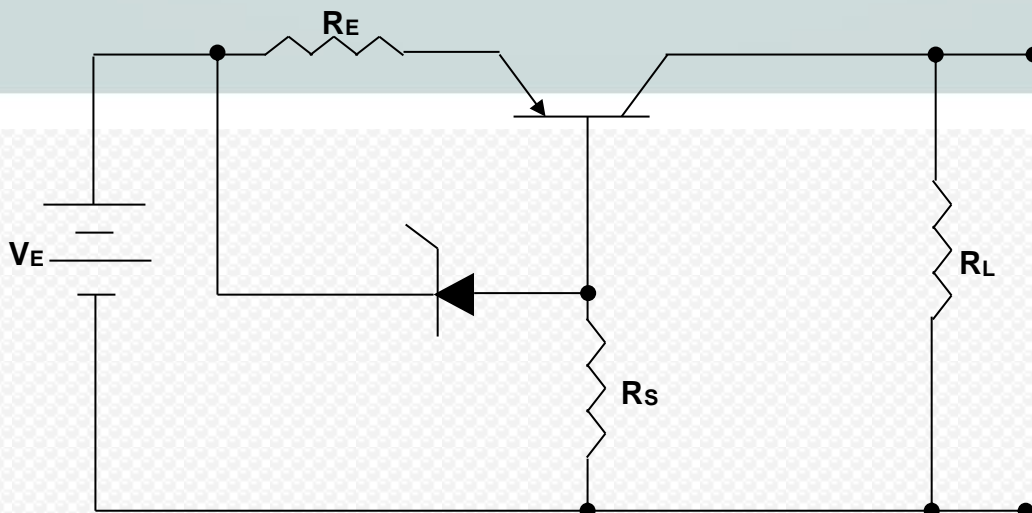
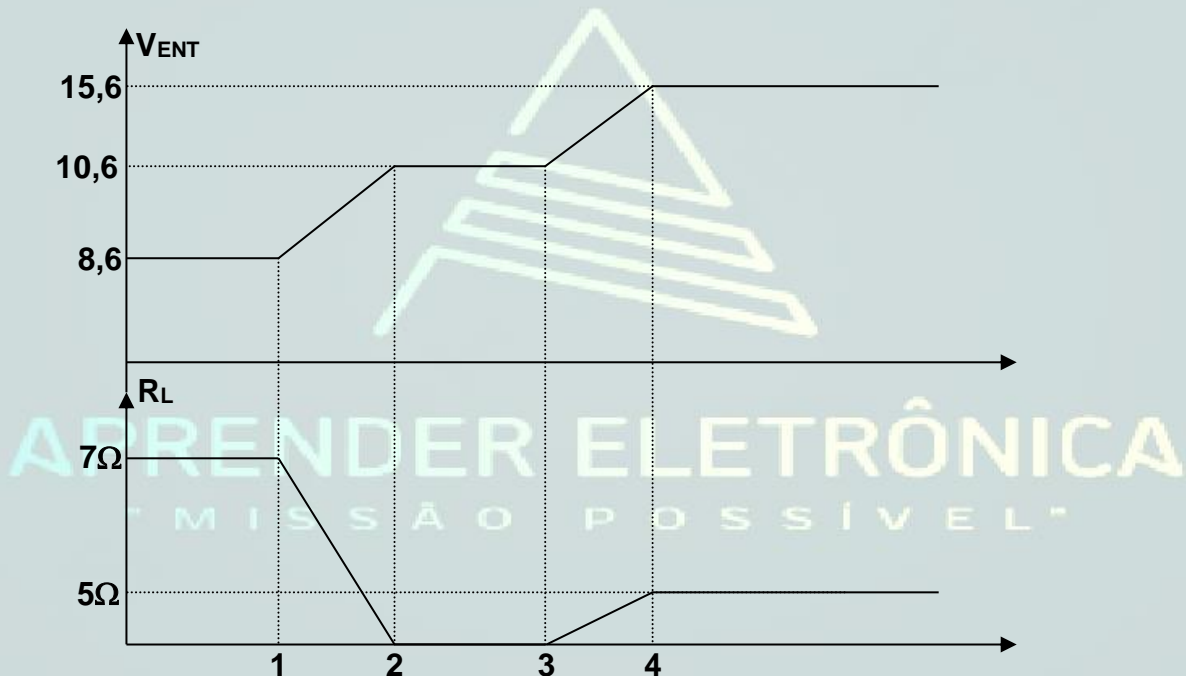
c.1 – R_L MIN

$$V_E - V_{EC\ MAX} - R_E I_L$$

$$V_E - V_{EC\ SAT} - R_E I_L$$

c.2 – $R_L\ MAX = \frac{V_E - V_{EC\ SAT} - R_E I_L}{I_L}$

Exercício: De acordo com o gráfico apresentado, determinar para estas condições apresentadas se os componentes estão de acordo com a faixa de operação permitida. São dados: $R_S = 100\ \Omega$, $V_Z = 5,6V$, $P_Z = 560mW$, $\beta = 50$, $V_{CEMAX} = 80V$, $V_{BE} = 0,6V$, $P_{C\ MAX} = 4W$, $I_{C\ MAX} = 1A$, $V_{EB} = 0,6V$ e $R_E = 10\Omega$.



Solução: Para a fonte de corrente, temos:
 Prof. Luís Caldas – 2022

I. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA TENSÃO DO CIRCUITO.

Para cada situação deveremos analisar para os efeitos desta variação no transistor e no zener e verificar se estas não provocam situações fora do limite de operação dos dispositivos.

Pela relação de potência e tensão no zener, calcula-se:

$$I_{ZMAX} = 100\text{mA} \text{ e } I_{ZMIN} = 10\text{mA}.$$

Do gráfico de R_L , calcularemos as correntes de saída e de base.

$$V_{RE} = V_Z - V_{EB} = 5,6 - 0,6 = 5,0\text{V}. \quad I_{SAÍDA} = \frac{V_{RE}}{R_E} = \frac{5\text{V}}{10\Omega} = 0,5\text{A}.$$

$$\text{Como } I_{SAÍDA} = \text{Constante} \Rightarrow I_B = \frac{I_{SAÍDA}}{\beta} = \frac{500\text{mA}}{50} = 10\text{mA}.$$

$$1) R_L = 7\Omega \Rightarrow V_{SAÍDA} = 7 \cdot 0,5 = 3,5\text{V} \quad V_{EC} = V_E - V_{RE} - V_{SAÍDA} = 8,6 - 5 - 3,5 = 0,1\text{V}.$$

$$2) R_L = 0\Omega \Rightarrow V_{SAÍDA} = 0 \cdot 0,5 = 0,0\text{V} \quad V_{EC} = V_E - V_{RE} - V_{SAÍDA} = 10,6 - 5 - 0 = 5,6\text{V}.$$

$$3) R_L = 5\Omega \Rightarrow V_{SAÍDA} = 5 \cdot 0,5 = 2,5\text{V} \quad V_{EC} = V_E - V_{RE} - V_{SAÍDA} = 15,6 - 5 - 2,5 = 7,6\text{V}.$$

Do gráfico de V_E , calcularemos a corrente I_S .

$$1) V_E = 8,6 \Rightarrow I_S = \frac{V_E - V_Z}{R_S} = \frac{8,6 - 5,6}{100} = 30\text{mA}.$$

$$2) V_E = 10,6 \Rightarrow I_S = \frac{V_E - V_Z}{R_S} = \frac{10,6 - 5,6}{100} = 50\text{mA}.$$

$$3) V_E = 15,6 \Rightarrow I_S = \frac{V_E - V_Z}{R_S} = \frac{15,6 - 5,6}{100} = 100\text{mA}.$$

a) Para o zener.

$$I_S = I_Z + I_B$$

$$1) I_Z = I_S - I_B = 30\text{mA} - 10\text{mA} = 20\text{mA}.$$

$$2) I_Z = I_S - I_B = 50\text{mA} - 10\text{mA} = 40\text{mA}.$$

$$3) I_Z = I_S - I_B = 100\text{mA} - 10\text{mA} = 90\text{mA}.$$

Pelos itens acima o zener opera dentro das condições normais e na faixa de operação I_{ZMAX} e I_{ZMIN} .

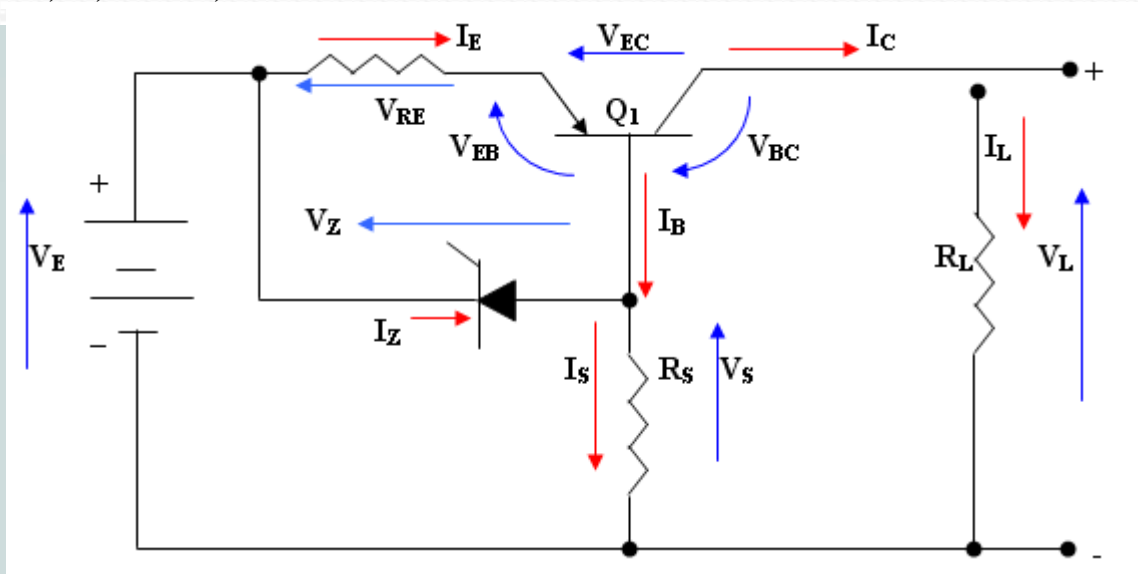
$$1) P_{CMAX} = V_{ECMAX} \cdot I_L = 0,1 \cdot 500\text{mA} = 50\text{mW}.$$

- 2) $P_{C_{MAX}} = V_{EC_{MAX}} \cdot I_L = 5,6 \cdot 500\text{mA} = 2,8\text{W}$.
 4) $P_{C_{MAX}} = V_{EC_{MAX}} \cdot I_L = 7,6 \cdot 500\text{mA} = 3,8\text{W}$.

Pelo item 3 acima, vemos que o transistor opera dentro da especificação, pois a potência dissipada real máxima é de 3,8W contra 4W de potência teórica.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

Responda as questões de 1 a 8 referentes ao circuito abaixo, segundo os dados e especificações a seguir. Dados: $V_Z = 5,6\text{V}$, $P_{Z_{MAX}} = 560\text{mW}$, $\beta_{MIN} = 50$, $P_{C_{MAX}} = 5\text{W}$, $V_{EC_{MAX}} = 80\text{V}$, $V_{EC_{MIN}} = 0,3\text{V}$, $V_{EB} = 0,6\text{V}$. Considerar $I_{Z_{MAX}} = P_Z/V_Z$ e $I_{Z_{MIN}} = 10\% I_{Z_{MAX}}$.



1.o Exercício: Indique qual das alternativas é correta para a corrente de saída, sabendo-se que $V_E = 10\text{V}$ e $R_L = 10\Omega$ e $R_E = 20\Omega$.

- a) $I_{SAÍDA} = 150\text{mA}$
- b) $I_{SAÍDA} = 500\text{mA}$
- c) $I_{SAÍDA} = 200\text{mA}$
- d) $I_{SAÍDA} = 250\text{mA}$
- e) $I_{SAÍDA} = 100\text{mA}$

Resposta: d

2.o Exercício: Indique qual das alternativas é correta para a tensão em R_L , sabendo-se que a tensão de entrada $V_E = 10\text{V}$ e $R_L = 10\Omega$.

- a) $V_{RL} = 4,5\text{V}$
- b) $V_{RL} = 5,5\text{V}$
- c) $V_{RL} = 4,0\text{V}$
- d) $V_{RL} = 5,0\text{V}$
- e) $V_{RL} = 2,5\text{V}$

Resposta: e



Circuitos Eletrônicos

3.o Exercício: Indique qual das alternativas é correta para a corrente que circula no transistor, sabendo-se que $V_E = 10V$ e $R_L = 0$.

- a) $I = 440mA$
- b) $I = 250mA$
- c) $I = 440mA$
- d) $I = 500mA$
- e) $I = 500mA$

Resposta: b

4.o Exercício: Indique qual das alternativas é correta para a potência consumida no transistor e na saída, sabendo-se que $V_E = 10V$ e $R_L = 10\Omega$.

- a) $P_C = 1,25W$ e $P_{SAÍDA} = 1,25W$
- b) $P_C = 2,5W$ e $P_{SAÍDA} = 2,5W$
- c) $P_C = 4,0W$ e $P_{SAÍDA} = 5,0W$
- d) $P_C = 5,0W$ e $P_{SAÍDA} = 5,0W$
- e) $P_C = 4,0W$ e $P_{SAÍDA} = 5,0W$

Resposta: a

5.o Exercício: Indique qual das alternativas é correta para a corrente no zener e na base do transistor, sabendo-se que $V_E = 10V$ e $R_S = 44\Omega$ e $R_L = 10\Omega$.

- a) $I_Z = 95mA$ e $I_B = 5mA$
- b) $I_Z = 100mA$ e $I_B = 5mA$
- c) $I_Z = 50mA$ e $I_B = 15mA$
- d) $I_Z = 100mA$ e $I_B = 20mA$
- e) $I_Z = 95mA$ e $I_B = 10mA$

Resposta: a

6.o Exercício: Indique qual das alternativas é correta para a tensão mínima a ser aplicado na entrada, sabendo-se que $R_S = 44\Omega$ e $R_L = 10\Omega$ do ponto de vista do zener.

- a) $V_{EMIN} = 7,48V$
- b) $V_{EMIN} = 7,42V$
- c) $V_{EMIN} = 6,26V$
- d) $V_{EMIN} = 7,5V$
- e) $V_{EMIN} = 5,0V$

Resposta: c

7.o Exercício: Indique qual das alternativas é correta para a tensão máxima a ser aplicado na entrada, sabendo-se que $R_S = 44\Omega$ e $R_L = 10\Omega$ do ponto de vista do transistor.



Circuitos Eletrônicos

- a) $V_{EMAX} = 86,48V$
- b) $V_{EMAX} = 27,5V$
- c) $V_{EMAX} = 90,44V$
- d) $V_{EMAX} = 80,84V$
- e) $V_{EMAX} = 85,0V$

Resposta: b

8.o Exercício: Indique qual das alternativas é correta, sabendo-se que $V_E = 10V$ e $R_S = 44\Omega$ e $R_L = 0\Omega$.

- a) O transistor queima com $P_C = 10W$
- b) O transistor está no limite com $P_C = 5W$
- c) O transistor queima com $P_C = 25W$
- d) O transistor queima com $P_C = 20W$
- e) O transistor opera normal com $P_C = 1,25W$

Resposta: e

BIBLIOGRAFIA

Referência: **Livro Texto: Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.**

Autores: Robert Boylestad e Louis Nashelsky, editora Pearson, Prentice Hall, 11.a edição, ano 2013.

OUTRAS REFERÊNCIAS

1. Microeletrônica – Sedra, A.S e Smith, K,C – 5.a edição Pearson.
2. Eletrônica Vol.1 – Malvino, A.P – 14.a edição, Editora Makron,
3. Circuitos Elétricos - Nilsson, J. W. / Riedel, S. A. / Marques, A. S., ano de 2008 Prentice Hall Brasil.
4. Circuitos com transistores Bipolares e MOS - Silva, M. M./Calouste, G., ano de 2010.
5. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.1 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.
6. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.2 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.