

Capítulo

2

NOTAS DE AULA, REV 2.0 – UERJ 2024 – FLÁVIO ALENCAR DO RÊGO BARROS

Eletrônica 1

Transistores – Análise DC

© Flávio Alencar do Rego Barros
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
E-mail: falencarb@gmail.com

Estas notas de aulas se destinam a reduzir o trabalho de cópia do aluno durante as aulas, mas também oferecer material de apoio na forma de exercícios propostos (sempre em anexo ao final de cada capítulo teremos a lista de exercícios) e referências onde o aluno poderá complementar seu estudo. É importante perceber que este material NÃO esgota o que o aluno deve ler durante o curso, nem mesmo substitui a participação em sala de aula, devendo ser encarado apenas como material de apoio. Neste sentido, é fortemente indicado que cada aluno mantenha sua cópia em papel do assunto que se abordará em cada aula. Outra observação é que, nesta versão, poderão existir alguns erros, de digitação principalmente, que, quando descobertos, serão corrigidos.

Neste Capítulo 2 o Anexo B é a lista de exercícios.

A estas notas de aula se somam os guias de laboratório para simulação, estes fornecidos em arquivos à parte.

O objetivo deste capítulo é detalhar a parte DC do transistor, o que nos permitirá alcançar dois pontos importantes: circuitos de polarização de amplificadores e completar o projeto de fonte regulada de tensão, um dos circuitos eletrônicos mais populares.

Conteúdo

2.1 – BJT – Transistor de Junção	41
2.1.1 – Ambas Junções Diretamente Polarizadas	42
2.1.2 – Ambas Junções Reversamente Polarizadas	42
2.1.3 – JC Reversamente Polarizada e JE Diretamente Polarizada	43
2.2. Análise DC	44
2.2.1 Características de Saída e de Entrada	44
Característica de Saída.....	44
Característica de Entrada	45
2.2.2 Reta de Carga DC e Ponto P.....	47
Sensibilidade a RC do Ponto P	50
Região de Trabalho e Bons Pontos P	51
2.3 Transistor como Chave.....	53
2.4 Circuitos de Polarização	54
Polarização Fixa (Autopolarização ou de Base).....	54
Polarização por Realimentação do Emissor	55
Polarização por Realimentação do Coletor	56
Polarização por Divisor de Tensão	57
2.4.1 Praxes de Projeto	58
2.4.2 PNP e Outras Montagens.....	59
2.5 Fonte Regulada de Tensão.....	60
2.5.1 Projeto Completo da Fonte Regulada.....	61
Transformador	61
Diodos.....	62
Zener.....	62
Transistor.....	63
Resistor	64
2.5.2 Fonte de Corrente	65
Anexo B - 2a. LISTA	i

Cap.2 – Transistores

2.1 – BJT – Transistor de Junção

O transistor se apresenta em duas versões (**npn** e **pnp**), como ilustrado abaixo:

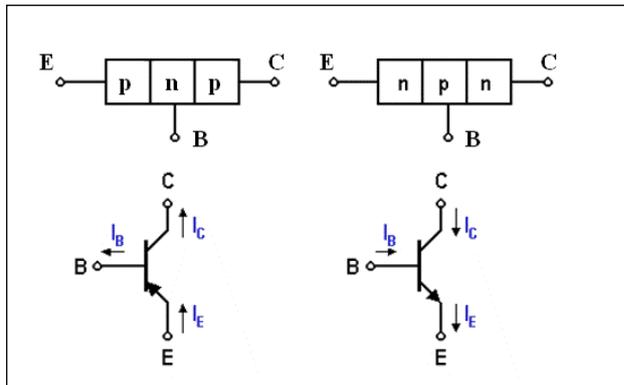


Fig. 71: Símbolos de transistor

No processo de fabricação do transistor, porém, existem peculiaridades que merecem ser consideradas. Como os transistores **npn** são mais comuns, o que analisaremos será principalmente em torno dele, porém, para transistores **pnp** os fatos são similares (duais).

O processo de fabricação de cada região do transistor é diferente, como ilustra a figura 72.

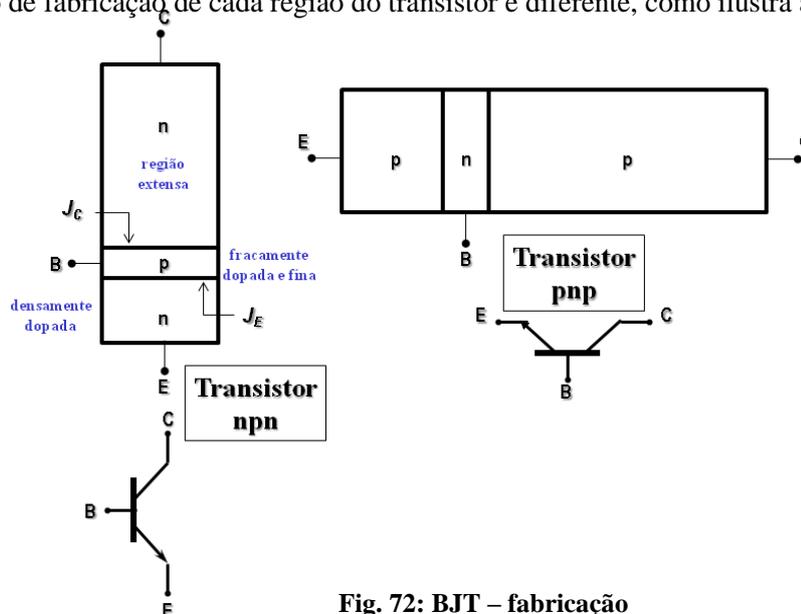


Fig. 72: BJT – fabricação

Enquanto a região do coletor é extensa, portanto com portadores de carga mais dispersos, a região do emissor, menor, é densamente dopada, ambas as regiões com impurezas tetravalentes. Por seu lado, a base, dopada com impurezas trivalentes, é muito estreita e fracamente dopada. Assim, ficam estabelecidas duas junções: a de emissor (J_E) e a de coletor (J_C), com suas respectivas barreiras de potencial.

2.1.1 – Ambas as Junções Diretamente Polarizadas

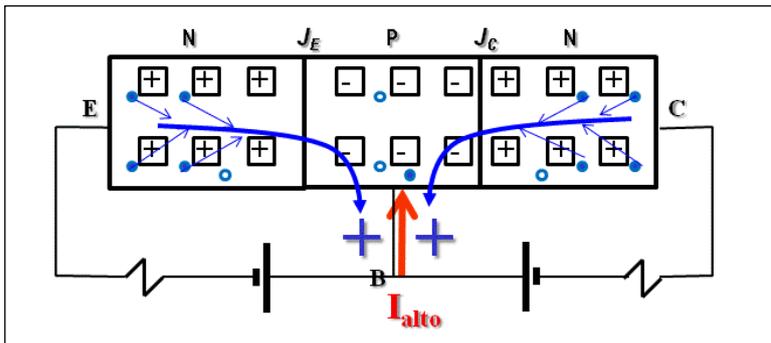


Fig. 73: BJT – junções diretamente polarizadas

Neste caso, como vimos, ambas as barreiras de potencial *diminuem*, portanto, portadores majoritários (elétrons) passam de \underline{E} e \underline{C} para a base. Resulta assim uma alta corrente na base do transistor, situação que não é desejável, por ser incontrolável.

2.1.2 – Ambas as Junções Reversamente Polarizadas

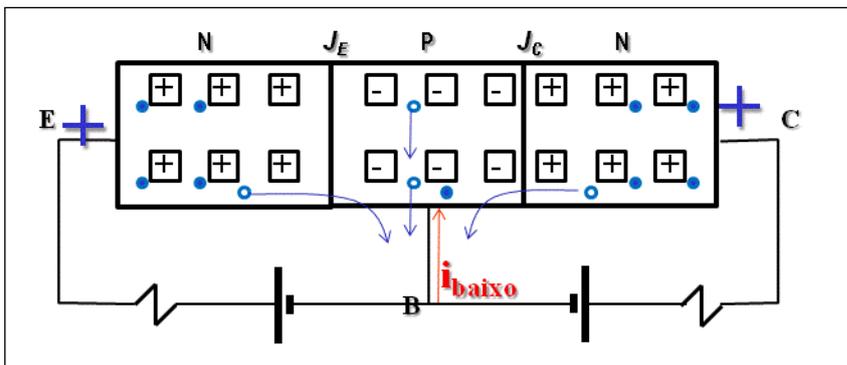


Fig. 74: BJT – junções reversamente polarizadas

Neste caso, ambas as barreiras de potencial *aumentam*, agora são os portadores minoritários (lacunas) passam de E e C para a base resultando em pequena corrente na base. Esta situação também não é desejável, pois perdemos a possibilidade de contarmos com correntes de majoritários.

2.1.3 – J_C Reversamente Polarizada e J_E Diretamente Polarizada

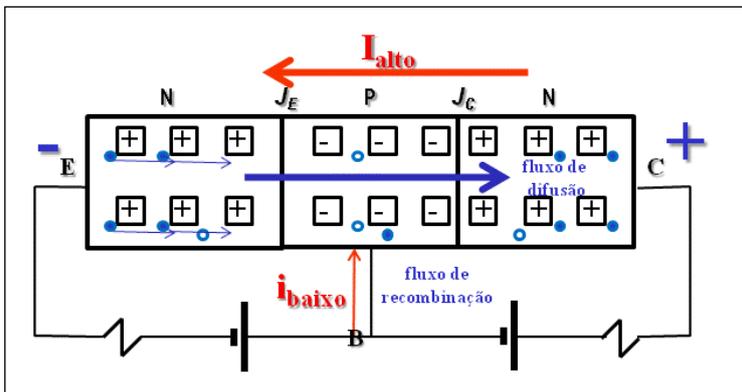


Fig. 75: BJT – polarização das junções

Esta é a **situação desejável**, nela teremos uma situação controlável. Elétrons (majoritários) passam por J_E e são injetados na base, como esta é muito fina, eles se difundem pelo coletor. Um efeito de menor monta é que alguns destes elétrons saem pela própria base na forma de corrente de recombinação (lembre-se que na base estarão algumas lacunas!). Então, a corrente produzida no emissor majoritariamente vem do coletor (digamos 99%) com um acréscimo minoritário da que vem da base (digamos 1%). A situação agora é controlável: Enquanto V_{BE} controla o número de elétrons injetados na base, V_{CB} não afeta o número de elétrons que chega ao coletor, eles aí chegam por atravessar uma base fina e se difundir em região com baixo gradiente de concentração de elétrons (coletor).

Portanto, o transistor no seu funcionamento ativo (regiões de saturação e ativa) – com corrente elétrica - apresentará esta polarização (J_E diretamente polarizada), e quando se quiser que não funcione (corte) – sem corrente elétrica - bastará manter J_E reversamente polarizada.

Agora estamos aptos a trabalhar funcionalmente com o transistor. A análise de circuitos transistorizados implica em duas situações que por conveniência vale a pena

analisar separadamente: a análise DC (Cap.2) e a análise AC (Cap.3). Evidentemente que qualquer circuito tem estas duas partes funcionando simultaneamente.

2.2. Análise DC

$$I_E = I_C + I_B \quad (1) \quad \text{valores típicos: } \begin{cases} I_C \cong 0.99 \text{ mA} \\ I_C \cong 1.00 \text{ mA} \\ I_C \cong 0.01 \text{ mA} \end{cases}$$

Em primeira aproximação: $I_C = \beta I_B$ ou $I_C = \alpha I_E$

Portanto, em (1): $\frac{I_C}{\alpha} = I_C \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \Rightarrow \alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$

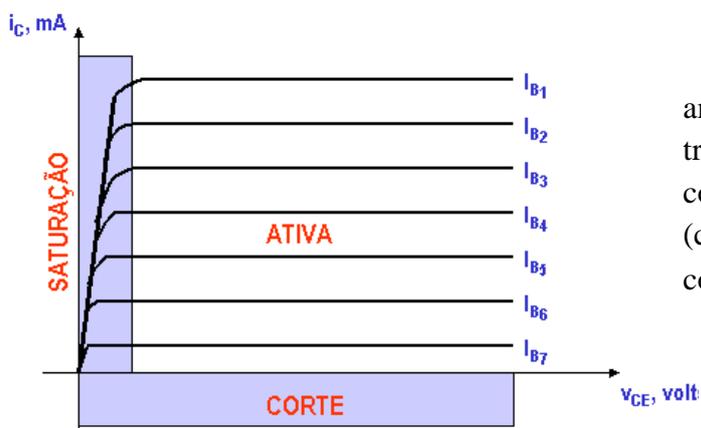
Também: $\frac{\alpha I_C}{\alpha} - I_C = \frac{I_C}{\beta} \Rightarrow \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$

Assim, podemos esperar valores de β altos (de **39** a **500** ou mais!) e de α baixos, logo abaixo de **1**.

2.2.1 Características de Saída e de Entrada

Característica de Saída¹

É o principal gráfico de uso em transistores e envolve as duas variáveis de saída – i_C e v_{CE} :



Em termos de projeto e análise de circuitos transistorizados, uma alternativa ao conhecimento deste gráfico (característica de saída) é o conhecimento do valor de β .

Fig. 76: BJT – característica de saída

¹ Existem três montagens de circuitos transistorizados: EC (montagem emissor comum), BC (base comum) e CC (coletor comum), conforme se tenha o respectivo pino tanto na entrada quanto na saída. Por ser largamente mais utilizada estaremos aqui sempre nos referindo à montagem EC.

Esta família de curvas é parametrizada pelo valor de entrada (I_B) e definem as três regiões de uso do transistor: corte, ativa e saturação.

Característica de Entrada

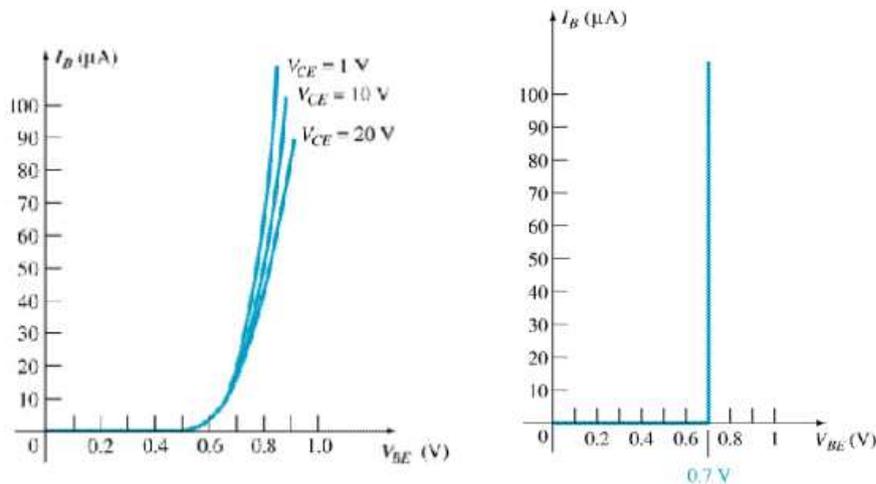


Fig. 77: BJT – característica de entrada

Diferentemente da característica de saída, a característica de entrada varia muito pouco como parâmetro de saída (V_{CE}), como sugere a figura anterior da esquerda.

Portanto, é comum considerar-se na região ativa (e saturação) a característica de entrada mostrada na figura da direita, semelhante ao modelo ideal do diodo.

Podemos resumidamente caracterizar assim as três regiões do transistor:

ATIVA	SATURAÇÃO	CORTE
$I_C = \beta I_B$ (*)	$I_C < \beta I_B$ (*)	$I_C \cong 0$
V_{CE} médio ($0 \ll V_{CE} \ll V_{CC}$)	$V_{CE} \cong 0.2$ v (Si)	$V_{CE} \cong V_{CC}$
$V_{BE} \cong 0.7$ v (Si)	$V_{BE} \cong 0.7$ v (Si)	$V_{BE} \leq 0$

Analisemos porque se afirma (*). As curvas de saída do transistor apresentam na região ativa um aspecto aproximadamente linear, diferente da região de saturação.

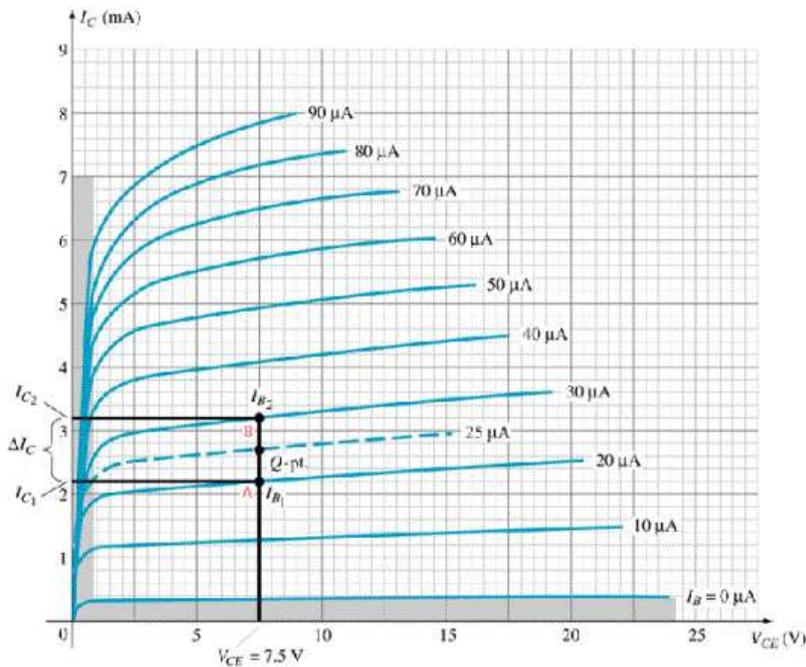


Fig. 78: BJT – região linear

Suponha que se passa do ponto de polarização A para o ponto B. Ora, isto acontece mediante $\Delta I_B = I_{B1} - I_{B2}$ ocasionando a respectiva Δi_C . Naturalmente

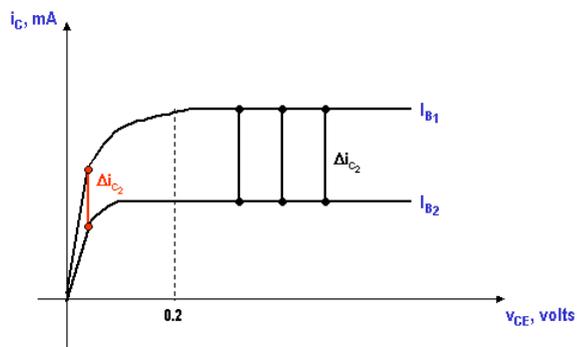
$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta I_B}$$

Esta relação seria preservada se fizéssemos o experimento em qualquer ponto da região ativa (supondo que nesta região as curvas são lineares e paralelas)!

O mesmo não acontece na região de saturação, onde caso se faça o mesmo $\Delta I_B = I_{B1} - I_{B2}$, obtém-se Δi_C sempre menor que na região ativa, como ilustrado na figura a seguir onde observe que $\Delta i_{C2} < \Delta i_{C1}$, daí, se pode afirmar aquelas relações das

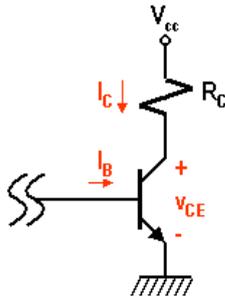
regiões ativa e saturação, respectivamente $I_C = \beta I_B$ e $I_C < \beta I_B$.

Fig. 79: BJT – região linear X saturação



2.2.2 Retas de Carga DC e Ponto P

Vamos lembrar o conceito de reta de carga, agora olhando sob o prisma do transistor. Um circuito de saída do transistor apresenta tipicamente o seguinte aspecto:



$$V_{CC} = R_C i_C + v_{CE}, \text{ ou ainda:}$$

$$i_C = -\frac{1}{R_C} v_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

que é uma reta, chamada **Retas de Carga DC**.

$$\text{coeficiente linear} \rightarrow \frac{V_{CC}}{R_C}$$

$$\text{coeficiente angular} \rightarrow -\frac{1}{R_C}$$

Fig. 80: BJT – Equação de saída

O ponto **P** (ou ponto de operação) vai surgir da confluência da reta de carga de carga DC (depende apenas do *circuito envolvente*) com a característica do transistor (dado do fabricante, depende apenas do *elemento eletrônico*). Como ilustrado na figura a seguir, para determinar o ponto **P** na característica de saída deve-se preliminarmente determinar o valor de I_B no circuito de entrada.

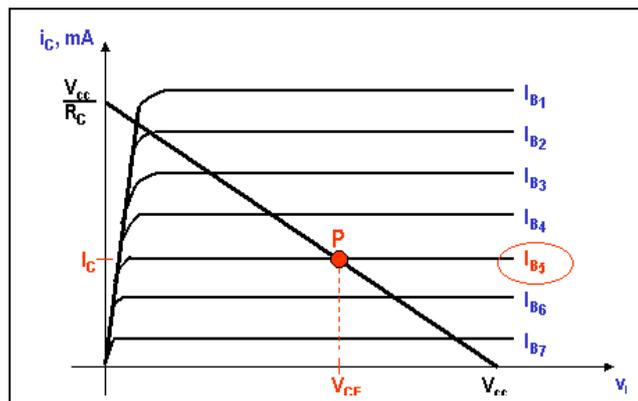
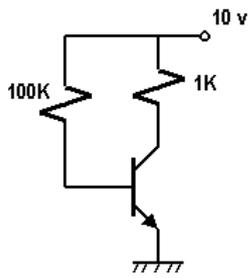


Fig. 81: Ponto P



Exemplo: Dado o circuito, ache o ponto P. $\beta = 100$

Fig. 82: Cálculo do Ponto P

R:

a) No circuito de entrada determinamos I_B :

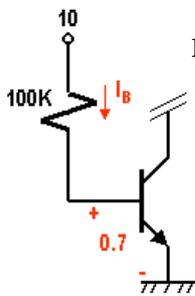


Fig. 83: Corrente de base

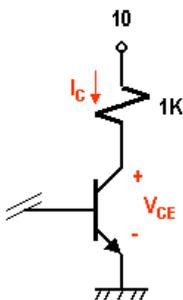
$$10 - 0,7 = 100K \times I_B$$

$$I_B = \frac{9,3}{100} = 0,093mA$$

b) Supondo na Ativa, mapeia-se para a saída:

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0,093 = 9,3mA \quad (1)$$

c) Circuito de saída:



$$10 = i_C + v_{CE}$$

Como sabemos o valor de I_C :

$$10 = 9,3 + v_{CE} \Rightarrow v_{CE} = 0,5v$$

Fig. 84: Saída BJT

d) Portanto o ponto **P** é dado por **(0.7 v; 9.3 mA)**

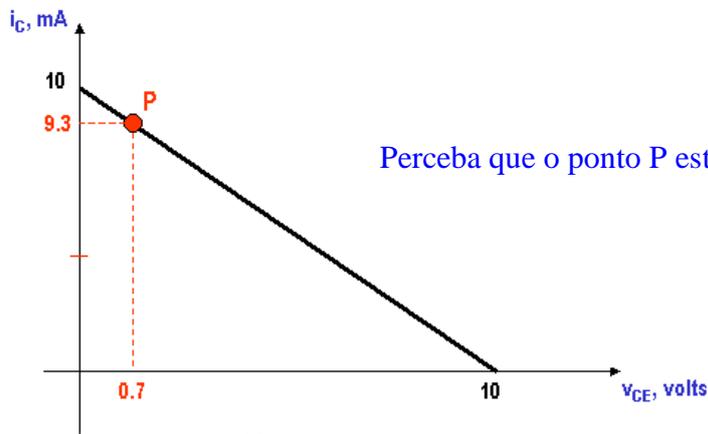
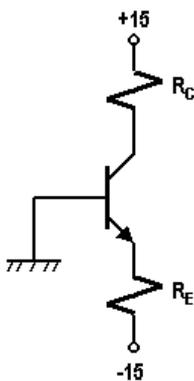


Fig. 85: Transistor saturado

□

Exemplo:

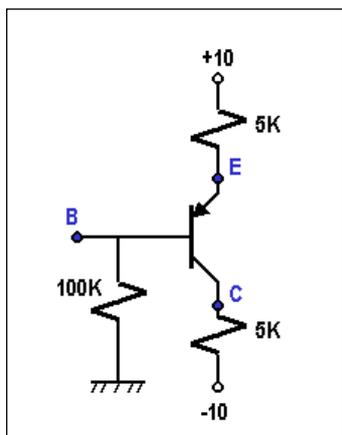


O transistor apresenta $\beta = 100$ e $v_{BE} = 0.7$ v quando $i_C = 1$ mA. Projete o circuito de modo que uma corrente de **2 mA** circule pelo coletor quando a tensão do coletor for **+5v**.

R: Talvez em aula.

Fig. 86: Calculando Ponto P

Exemplo:



As medições no circuito indicam $V_B = +1.0$ v e $V_E = 1.7$ v.

- a) Quais são os valores de β e α ?
- b) Qual o valor de V_C ?

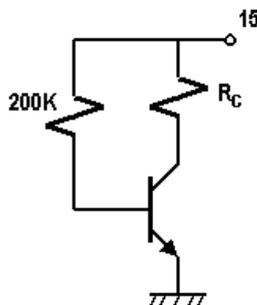
R: Possivelmente em aula.

Fig. 87: Exemplo PNP

Sensibilidade a R_C do Ponto P

Mostraremos como o ponto **P** pode flutuar conforme R_C varie. Faremos isto via um exemplo.

Exemplo:



Para o circuito dado ($\beta = 100$ e $v_{BE} = 0.7$ v) ache o ponto **P** e trace a reta de carga DC se R_C vale:

- $1\text{ K}\Omega$
- $2\text{ K}\Omega$
- 100Ω

Fig. 88: Sensibilidade a R_C

Resposta: Saída: $15 = R_C i_C + v_{CE}$

Entrada: $15 = \frac{200I_C}{100} \Rightarrow I_C = 7.5\text{mA}$ para qualquer R_C !

- $R_C = 1\text{ K}\Omega$: $15 = 1 \times 7.5 + v_{CE} \Rightarrow V_{CE} = 7.5\text{v}$ → ponto **P1**, no meio da reta de carga.
- $R_C = 2\text{ K}\Omega$: $15 = 2 \times 7.5 + V_{CE} \Rightarrow V_{CE} = 0\text{v}$ → ponto **P2**, na saturação.
- $R_C = 100\Omega$: $15 = 0.1 \times 7.5 + V_{CE} \Rightarrow V_{CE} = 14.25\text{v}$ ponto **P3**, perto do corte.

Gráficos:

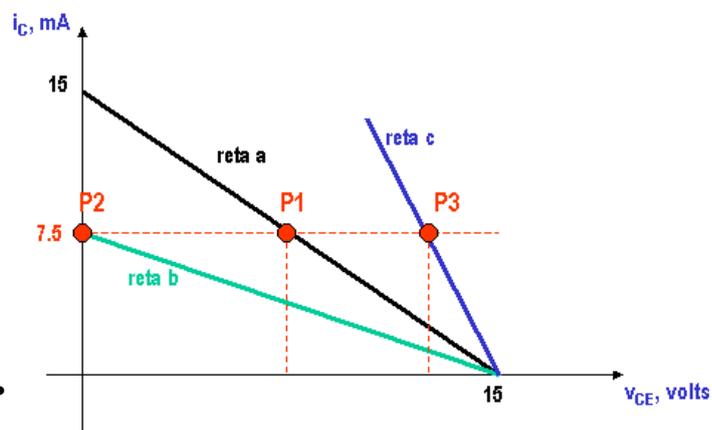


Fig. 89: Flutuação do Ponto P

□

Conclusão: O ponto **P** é muito dependente de R_C . Por ora, podemos afirmar que quanto mais perto o ponto **P** estiver do meio da reta de carga, um circuito amplificador é melhor, porque permite máxima excursão de sinal. Veremos detalhes disto mais à frente. Veremos também que haverá outro “vilão”

para um bom ponto **P**: a temperatura, pois o valor de β varia bastante com ela.

Região de Trabalho e Bons Pontos P

Não é qualquer ponto **P** do transistor que podemos (ou devemos) trabalhar. Existem limites. O fabricante do transistor informa a maior corrente que ele pode trabalhar ($I_{C_{MAX}}$), bem como a maior tensão ($V_{CE_{MAX}}$). Existe ainda o limite hiperbólico da potência (P_{MAX}). O que sobra é a região útil ilustrada na Figura 90. Perceba que o ponto **A** não está na região útil, enquanto **B**, **C** e **D** estão, com alguns em lugares mais apropriados que outros.

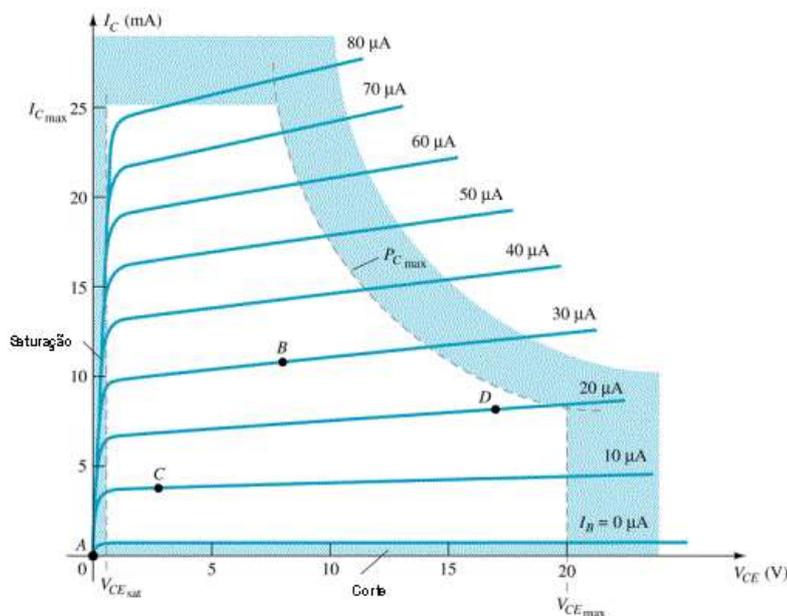


Fig. 90: Transistor – região de trabalho

Vejamos agora o que é um bom e o que é um mau ponto de polarização.

Mencionamos que variações na temperatura modificam o valor de β , e, por consequência, afetam o ponto **P**. Alguns circuitos de polarização que apresentaremos agora foram projetados justamente para dar conta deste problema.

Preliminarmente, vamos analisar as consequências do ponto **P** variar muito em torno de seu valor ideal (que é no meio da reta de carga, pois permitirá máxima excursão de sinal).

Na Figura 91 é mostrado como seria o sinal de saída (v_{CE}) caso o ponto **P** esteja no meio da reta de carga (**P1**).

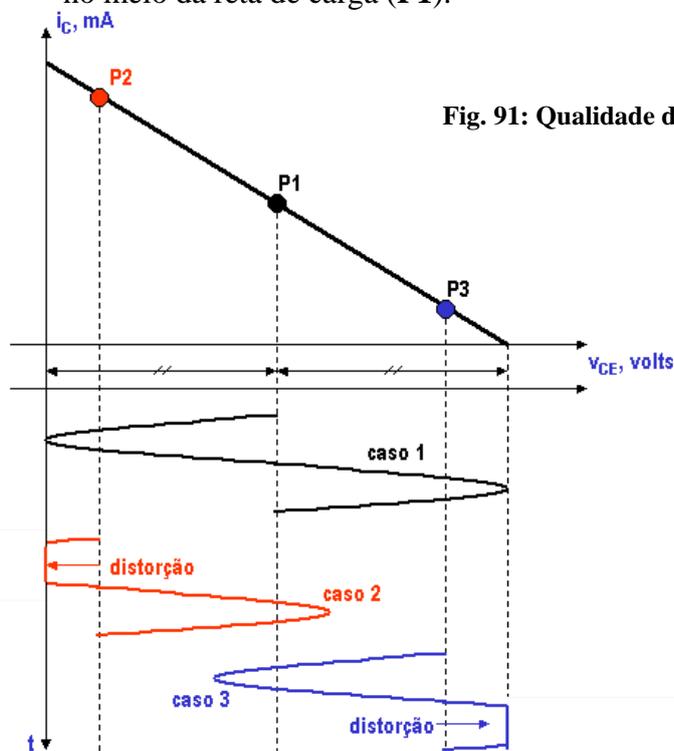


Fig. 91: Qualidade de Ponto P

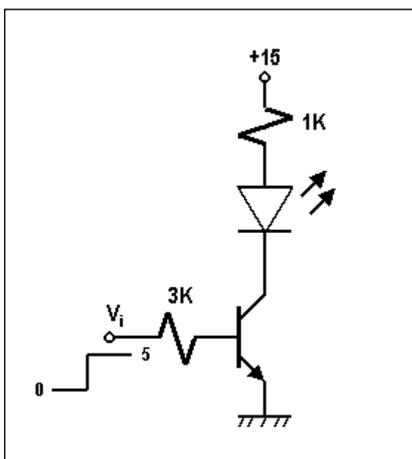
Perceba que a senoide estará sempre na região ativa, linear, para não distorcer (caso 1). Suponha agora que o ponto **P** se desloque para perto da saturação (**P2**) ou do corte (**P3**). Observe que se, em ambos os casos, mantivermos a amplitude da senoide, ela vai distorcer ou por baixo (saturação, caso 2) ou por cima (corte, caso 3).

Evidentemente que estas situações numa amplificação (distorções) são indesejáveis. Via de regra, o que se quer aqui é a amplificação, não a modificação da natureza do sinal amplificado! De forma geral, quando se projeta um circuito de polarização a transistor busca-se fazê-lo de modo a obter máxima excursão de sinal na saída, ou seja, na medida do possível, projeta-se o circuito para manter o ponto **P** no meio da reta de carga.

2.3 Transistor como Chave

Assim como diodo, o transistor também pode ser usado como chave liga-desliga. Ele vai funcionar no CORTE (chave aberta, desligada) ou na SATURAÇÃO (chave fechada, ligada). Mais ainda, esta característica fará do transistor o elemento central na produção de lógica digital, portanto, de computadores!

Exemplo:



O circuito dado é um comando de LED que se acende quando passa alta corrente por ele. Se V_{CEsat} , e se existe uma queda de 2 v no LED quando ele está acionado, calcule a corrente de funcionamento do LED.

Fig. 92: Transistor como chave

R: i) Quando $V_i = 5\text{ v}$: a base está fortemente polarizada e o transistor satura, Na saída:

$$15 = 1 \times I_{Csat} + V_{CEsat} + 2 = 1 \times I_{Csat} + 0 + 2 \Rightarrow I_{Csat} = 13\text{mA}$$

ii) Quando $V_i = 0$, $V_{BE} = 0$ e o transistor está cortado: Não passa corrente no LED, ele não está acionado.

□

No exemplo anterior, se supuséssemos que para $V_i = 5\text{ v}$ o transistor está na REGIÃO ATIVA:

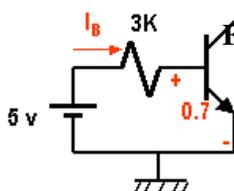


Fig. 93: Entrada – hipóteses de região ativa

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{3} = 1.43\text{mA}$$

a) Se $\beta = 100$: $I_C = 143\text{mA} \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 15 - 1 \times 143 - 2 \Rightarrow V_{CE} = -120\text{v}$ HIPÓTESE ABSURDA!

b) Se $\beta = 5$: $I_C = 7.15\text{mA}$ $V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 15 - 1 \times 7.15 - 2 \Rightarrow$
 $V_{CE} = 5.85\text{v}$ hipótese perfeitamente possível.

Porém, VALORES DE β NÃO SÃO TÃO BAIXOS ASSIM!

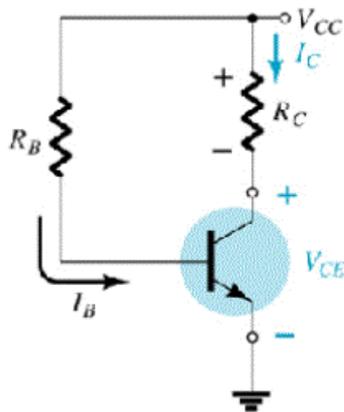
c) Se $\beta = 35$ (menor β viável): $I_C = 50\text{mA} \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 15 -$
 $1 \times 50 - 2 = -37\text{v}$ HIPÓTESE ABSURDA! \square

2.4 Circuitos de Polarização

Polarização Fixa (Autopolarização ou de Base)

É o circuito de polarização mais simples (e barato), mas o de pior desempenho.

Exemplo:



Analise o circuito quanto à sensibilidade do ponto **P** à temperatura. Considere $V_{BE} = 0$, $R_B = 500\text{K}\Omega$, $R_C = 1\text{K}\Omega$, $V_{CC} = 10\text{v}$.

Fig. 94: Autopolarização

Respostas: $10 = 1 \times i_C + v_{CE}$ (saída)

$10 = 500 \frac{i_C}{\beta} \Rightarrow i_C = 0.02\beta$ (entrada)

a) $\beta = 100 \Rightarrow i_C = 2\text{mA}$

b) $\beta = 300 \Rightarrow i_C = 6\text{mA}$

Conclusão:

β	1:3
I_C	1:3

\square

ou seja, toda flutuação de β (devido à temperatura) é transferida para o ponto **P**. Significa que este circuito não tem qualquer proteção às variações de temperatura.

Polarização por Realimentação do Emissor

Exemplo:

Idem. Faça a análise.

- Qualitativa
- Quantitativa

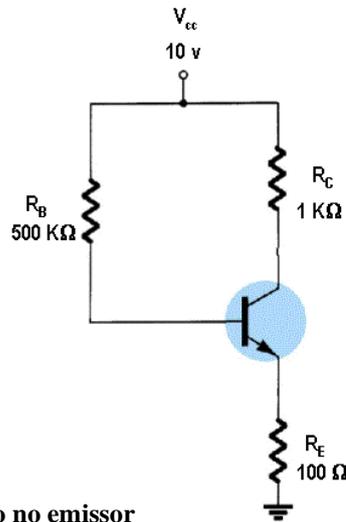


Fig. 95: Polarização por realimentação no emissor

Respostas:

a) Circuito de entrada: Se $\beta \uparrow \rightarrow \frac{I_C}{\beta} \downarrow \rightarrow v_{R_B} \downarrow \rightarrow V_B \uparrow$ ou

Circuito de saída: Se $\beta \uparrow \rightarrow \beta I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow V_E \uparrow \rightarrow V_B \uparrow \rightarrow V_{R_B} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$

Conclusão: o circuito tende a compensar a variação da temperatura!

$$\text{b) Entrada: } 10 = R_B \frac{I_C}{\beta} + R_E I_C \Rightarrow I_C = \frac{10}{\frac{500}{\beta} + 0.1}$$

$$\beta = 100: \quad I_C = \frac{10}{\frac{500}{100} + 0.1} = 1.96 \quad \beta = 300: \quad I_C = \frac{10}{\frac{500}{300} + 0.1} = 5.65$$

$$\text{Obs: } 2,88 = 5.65/1.96$$

Conclusão:

β	1:3
I_C	1:2,88

uma parte do efeito da temperatura (em β) é absorvido pelo circuito! \square

Significa que este circuito tem certa proteção às variações de temperatura.

Polarização por Realimentação do Coletor

Exemplo:

Idem. Faça a análise. $V_{BE} = 0$, $R_B = 500 \text{ K}\Omega$, $R_C = 1 \text{ K}\Omega$, $V_{CC} = 10 \text{ v}$.

- c) Qualitativa
- d) Quantitativa

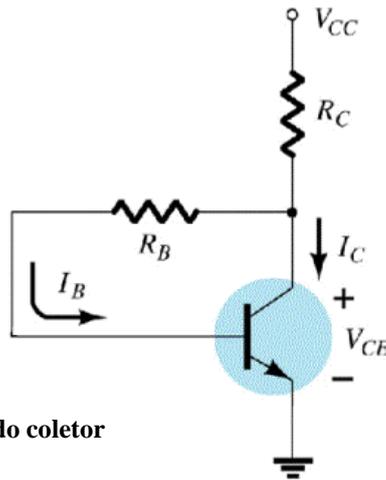


Fig. 96: Polarização por realimentação do coletor

R:

a) Se $\beta \uparrow \rightarrow \beta I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow$, mas se $\beta \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow V_C \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$, ou seja, o circuito compensa as variações de β .

$$b) \quad 10 = R_B \frac{I_C}{\beta} + R_C I_C \Rightarrow I_C = \frac{10}{\frac{500}{\beta} + 1}$$

$$\beta = 100: \quad I_C = \frac{10}{\frac{500}{100} + 1} = 1.67 \quad \beta = 300: \quad I_C = \frac{10}{\frac{500}{300} + 1} = 3.75$$

Conclusão:

β	1:3
I_C	1:2,25

□

ou seja, para o circuito de polarização com realimentação no coletor também parte da flutuação de β é absorvida pelo circuito produzindo o “efeito mola”. Significa que este circuito também tem certa proteção às variações de temperatura. Ele também é mais barato.

Polarização por Divisor de Tensão

É o circuito mais popular, mesmo que não seja o mais barato.

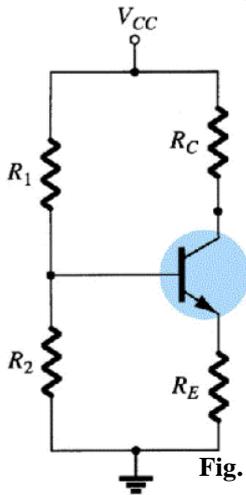


Fig. 97: Polarização por divisor de tensão

Se fizermos uma análise ideal ($I_B = 0$):

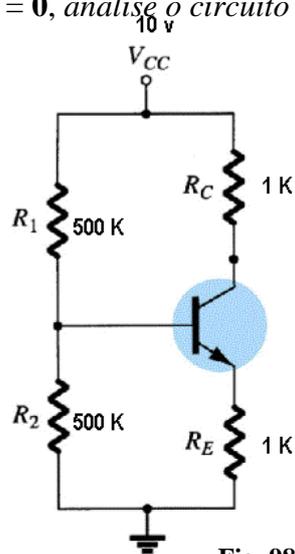
$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}, \quad \text{como } V_{BE} = 0.7 \text{ v} = \text{constante:}$$

$$V_E = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} - 0.7, \text{ que é um valor constante. Como}$$

$I_C \approx \frac{V_E}{R_E}$, então I_C é constante e NÃO DEPENDE DE β ! Ou seja, este circuito tende a ser imune às variações de temperatura!

É claro que a hipótese inicial ($I_B = 0$) não é totalmente verdadeira. Façamos, pois, uma análise mais realística.

Exemplo: Se $V_{BE} = 0$, analise o circuito quanto à sensibilidade a β .



R:

Thevénin na base do transistor:

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 5 \text{ v}$$

$$R_{BB} = R_1 // R_2 = 250 \text{ K}\Omega$$

Fig. 98: Polarização por divisor de tensão completa

$$5 = 250 \frac{I_C}{\beta} + I_C \Rightarrow I_C = \frac{5}{\frac{250}{\beta} + 1}$$

$$\beta = 100: \quad I_C = \frac{10}{\frac{250}{100} + 1} = 1.43 \quad \beta = 300: \quad I_C = \frac{10}{\frac{250}{300} + 1} = 2.78$$

Conclusão:

β	1:3
I_C	1:1,94

□

ou seja, de novo parte da flutuação de β é absorvida pelo circuito (teoricamente até mais que os outros circuitos concorrentes) produzindo o “efeito mola”.

2.4.1 Praxes de Projeto

Quando em presença de resistência no emissor, costuma-se adotar o padrão $V_E \approx 10\% V_{CC}$. Como vimos, o objetivo é polarizar o transistor no meio da reta de carga ($50\% V_{CC}$), portanto, em cima de R_C teremos $40\% V_{CC}$. Atenção: nem sempre é caso de usar esta praxe, ela só deve ser utilizada quando o projeto abre espaço para isto!

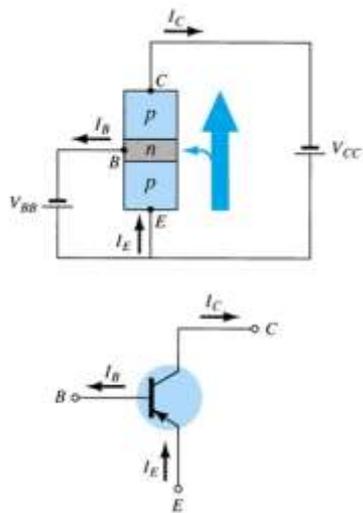
No projeto de polarização por divisor de tensão, se fizermos o projeto “quase ideal”, $R_2 \leq 0.01\beta R_E$, onde β considerado corresponde ao menor possível. Se fizermos o projeto “firme”: $R_2 \leq 0.1\beta R_E$. Estas duas últimas praxes são menos utilizadas.

Exemplo: Projete um circuito polarizador por divisor de tensão para: $V_{CC} = 20 \text{ v}$, $I_C =$ perto de 5 mA , β entre 80 e 400 . Utilize valores comerciais.

R: Possivelmente em aula.

Neste ponto, com o conhecimento de diodos, zeners e transistores (análise DC), estamos aptos a entrar em aplicações importantes: fonte regulada e amplificadores transistorizados. São assuntos que veremos a partir da próxima seção.

2.4.2 PNP e Outras Montagens

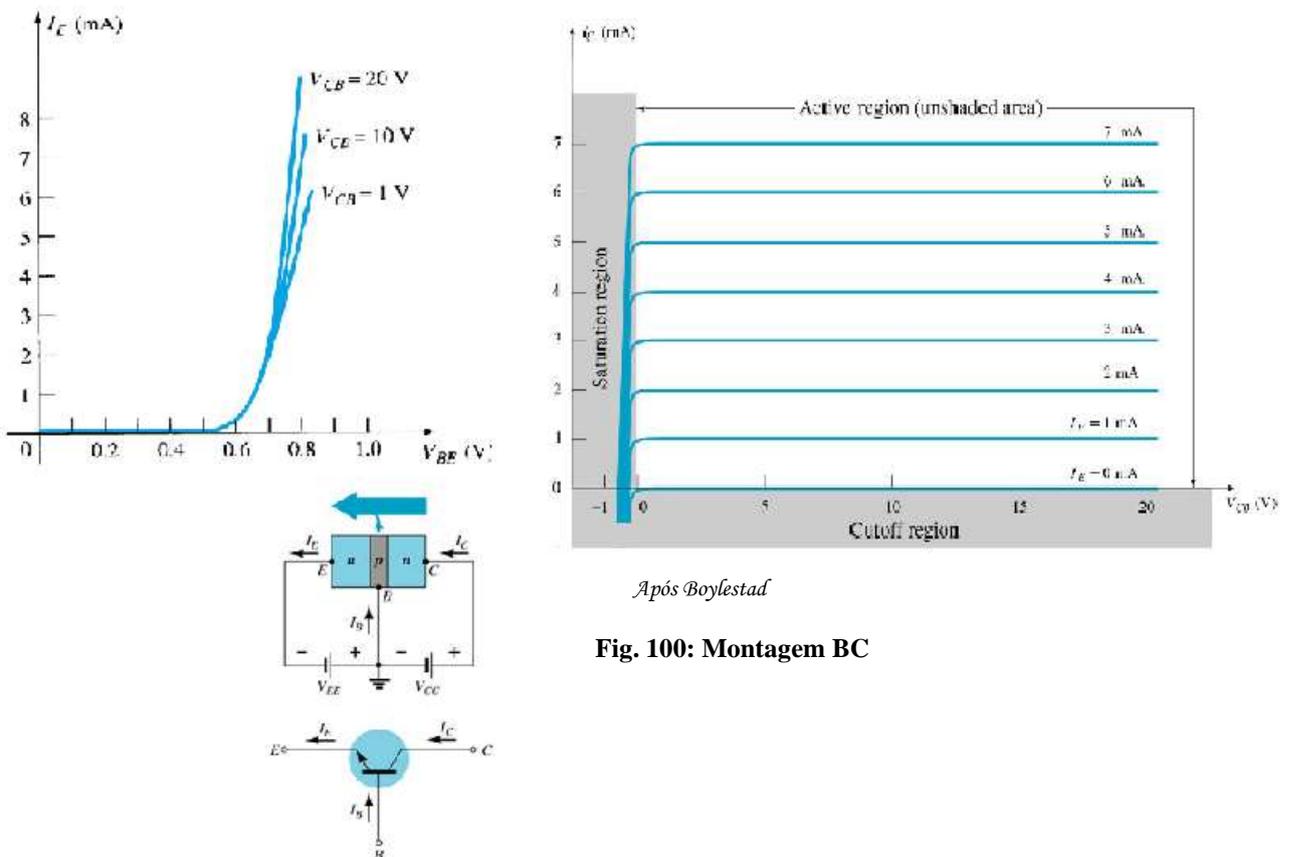


Como vimos ao início deste capítulo o transistor pode ser encontrado também na modalidade PNP. Todas as características que vimos ficam mantidas, apenas tensões e correntes apresentarão valores negativos relativos ao que vimos, como ilustra a figura abaixo.

Após Boylestad

Fig. 99: Configuração PNP

Outro aspecto no qual todos aqueles conceitos que vimos para transistores ficam preservados diz respeito à montagem do transistor no circuito. Vimos até aqui apenas a montagem Emissor Comum (EC), a mais popular. Porém, poderíamos ter ainda as montagens Base Comum (BC) e Coletor Comum (CC), a primeira delas exemplificada na figura a seguir com sua característica de entrada e de saída. Perceba que os perfis das curvas são do mesmo tipo do que já estudamos, portanto, na prática, não precisamos voltar a fazer a análise. Estas outras montagens terão importância em algumas aplicações especiais que veremos a seguir.



Após Boylestad

Fig. 100: Montagem BC

2.5 Fonte Regulada de Tensão

Vimos que a ponte de diodos é a melhor solução onde se retifica a tensão AC e o capacitor filtra a tensão retificada. Porém, o valor da carga afeta o “ripple”, e, portanto, afeta V_{cc} . Em suma, se R_L cai, então τ cai, portanto sobe o tempo de queda e assim aumenta o V_{ripple} , portanto V_{cc} cai. Ora se V_{cc} cai, pode fazê-lo a ponto de não servir para a alimentação projetada! O que precisamos então é um circuito como o da Figura 101 para manter regulação:

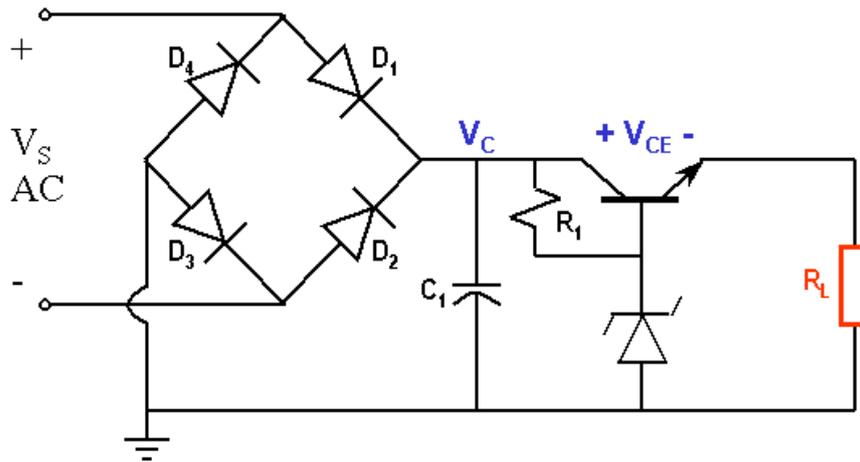


Fig. 101: Fonte regulada de tensão

Este circuito é chamado regulador série, pois a corrente na carga é a que passa no transistor. Fontes DC práticas apresentam no mínimo estas qualidades, pois assim se garante as requisições de cliente, aqui representado pela carga R_L .

No transistor temos as limitações a serem atendidas:

$V_{CE} > 1 \text{ v}$ para não sair da região ativa

V_{CE} baixo para não esquentar

Considere ainda como praxe de projeto $C_1 = 1000 \mu\text{F}$ ou $2200 \mu\text{F}$.

A seguir examinaremos passo a passo o que se faz para projetar uma fonte DC regulada.

2.5.1 Projeto Completo da Fonte Regulada

Faremos esta etapa através de um exemplo. Seja projetar um regulador de tensão série para $V_L = 9\text{ v}$; $I_L = 1\text{ A}$. O critério de escolha de cada componente é o preço mais barato, desde que atenda às especificações.

Transformador

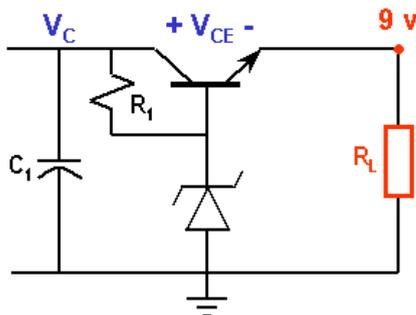


Fig. 102: Projeto do transformador

Pela Figura 102:

$$\begin{aligned} V_s &= 2V_D + V_{CE} + V_L \\ &= 1.4 + V_{CE} + 9 = 10.4 + V_{CE} \end{aligned}$$

Os valores comerciais de transformadores são:

110/3	110/6	110/9	110/12
110/15	110/18	110/22,	

onde o valor eficaz de saída é $V\sqrt{2}$.

Portanto, se escolhermos $V_s = 12\text{v}$:

$$V_{\text{eficaz}} = 12\sqrt{2} = 17\text{v} \quad V_{CE} = 6.6\text{v} \quad \dots \quad \text{alto}$$

Se escolhermos $V_S = 9\text{v}$:

$$V_{\text{Seficaz}} = 9\sqrt{2} = 13\text{v} \quad V_{CE} = 6.6\text{v} \quad \dots\dots\dots \text{bom}$$

Se escolhermos $V_S = 6\text{v}$:

$$V_{\text{Seficaz}} = 6\sqrt{2} = 8.5\text{v} \quad V_{CE} < 0 = 6.6\text{v} \quad \dots\dots\dots \text{fora}$$

Portanto, escolhemos o transformador: **110/9v**

□

Diodos

A compra de diodo é especificada por:

Tensão máxima no diodo: no caso: $I_D \geq 1\text{ A}$

Tensão de pico inversa: no caso: $TPI = T_{\text{pico inverso}} \geq 13\text{v}$

Escolhemos, por exemplo²: 1N4001

Zener

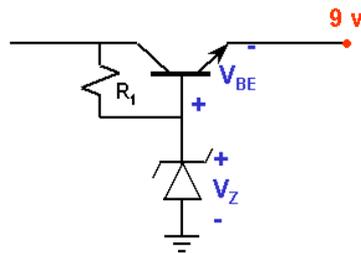


Fig. 103: Projeto do zener

$$V_Z = 9 + V_{BE} \Rightarrow V_Z = 9.7\text{ v}$$

Escolho $V_Z = 10\text{ v}, 400\text{ mW}$

Alternativas próximas: **9 v** e **12.7 v**, todos com **400 mW**.

² Especificação de diodos pode ser encontrada em www.datasheet.catalog.com. 1N4001 apresenta as especificações [1 A, 50 V], corrente máxima e TPI, respectivamente.

Como escolhi um zener de **400mW/10 v**:

$I_{Zmax} = 40mA$, a região de trabalho é:

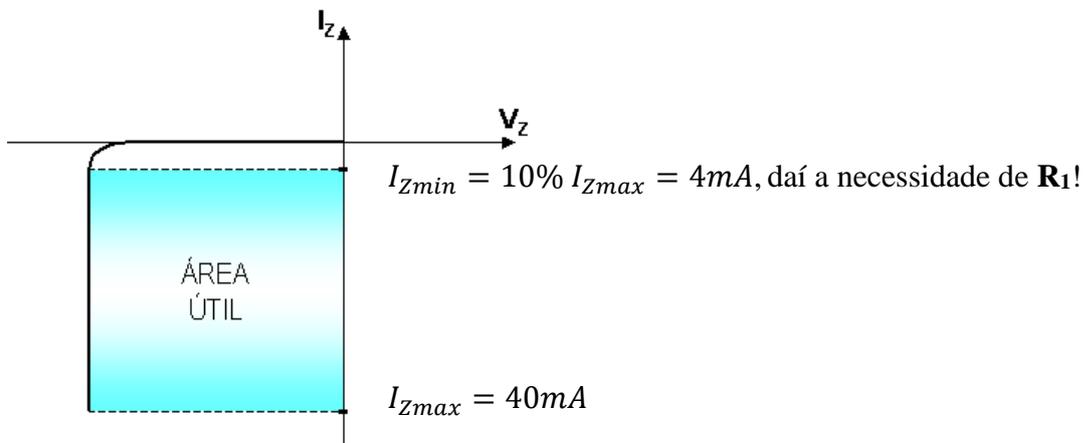


Fig. 104: Zener e região de regulação

Na extremidade inferior da Região Útil (I_{ZMIN}) o zener não mantém seu comportamento de fonte de tensão, portanto não regula a tensão. Na extremidade superior (I_{ZMAX}) temos a curva de potência máxima, ou seja, o zener queima.

Transistor

Potência: $P_T = V_{CE} \cdot I_C = 2.6 \times 1 = 2.6 \text{ W}$

Escolho BD135:

$$\begin{array}{l} P_T = 8W \\ \beta = 39 \end{array}$$

ou 12 W (que é mais caro!)

$$\text{Assim, } I_{Bmax} = \frac{I_E}{\beta+1} = \frac{1}{39+1} \Rightarrow I_{Bmax} = 25mA$$

portanto, está dentro da região útil do zener.

Resistor

Vamos considerar resistores baratos, ou seja, com tolerância de 10%.

$$I_{R_1} = I_Z + I_B$$

Piores casos:

$$i) I_{R_1} = I_{Zmin} + I_{Bmax} = 4 + 25 = 29mA$$

ii)

$$I_{R_1} = I_{Zmax} + I_{Bmin} \rightarrow 29 = I_{Zmax} + 0 \rightarrow I_{Zmax} = 29mA < 40mA \text{ (OK!)}$$

$$V_C = V_{R_1} + V_Z$$

$$V_{R_1} = V_C - V_Z$$

$$= 11.6 - 10 = 1.6 \text{ v, então:}$$

$$2.6 + 9$$

$$R_1 = \frac{1.6}{29} = 55.2\Omega \quad \text{Comercial: } R_1 = 56\Omega$$

Teste: Com este R_1 comercial: $I_{R_1} = \frac{1.6}{56} \approx 28.6 \text{ mA}$. Como iniciamos esta etapa do

projeto pelo início da regulação é esta condição a ser testada: $\underbrace{I_{R_1}}_{28.6} = I_{Z_{MIN}} + \underbrace{I_{B_{MAX}}}_{25}$ que

leva a $I_{Z_{MIN}} = 3.86 < 4$, ou seja, saímos da regulação! Então a escolha do R1 deve ser:

$R_1 = 47\Omega$. Então $I_{R_1} = \frac{1.6}{47} \approx 34 \text{ mA}$ Teste agora de “queima”: $\underbrace{I_{R_1}}_{34} = I_{Z_{MAX}} + \underbrace{I_{B_{MIN}}}_0$ que

leva a $I_{Z_{MAX}} = 34 < 40$ (OK, não queima!).

$$P_{R_1} = \frac{(1.6)^2}{47} = 54.5 \text{ mW} \quad \Rightarrow \quad \text{escolho } \boxed{R_1 = 47 \Omega, \frac{1}{16} W} \quad (62.5 \text{ mW})$$

Atenção: Neste ponto, já dimensionados os elementos com valores comerciais, é hora de checar se realmente as especificações estão sendo respeitadas. Esta verificação fica como exercício para ser feito por você. Observe que tal teste pode significar mudança de algum(ns) componente(s), tipicamente o valor ou potência do resistor.

2.5.2 Fonte de Corrente

Transistores bipolares podem ser usados com simplicidade para obter uma fonte de corrente constante. Por exemplo, no circuito abaixo:

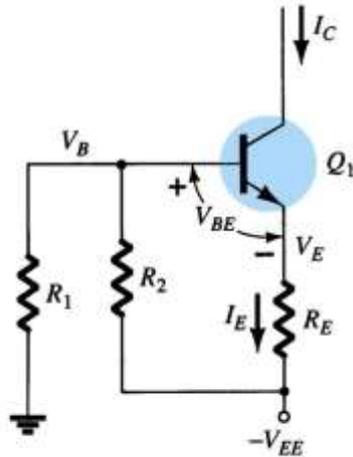


Fig. 105: Fonte de corrente

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (-V_{EE}) = 5\text{v} \text{ e } V_E = V_B - 0,7$$

(transistor ON)

Portanto: $I_E = \frac{V_E - (-V_{EE})}{R_E} \approx I_C$

Observe que como todos os termos da equação de cima são constantes, I_C é uma corrente constante!

Uma solução melhor ainda seria:

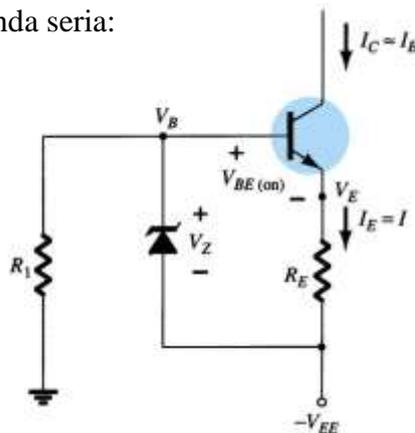


Fig. 106: Fonte de corrente melhor

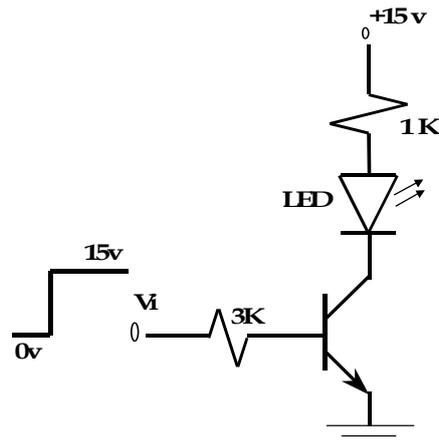
onde $I \approx I_E = \frac{V_Z - (V_{BE})}{R_E}$, melhor ainda, pois o zener garante tensão constante!

Anexo B - 2ª. LISTA

(Assunto: Transistores e Fonte Regulada de Tensão)

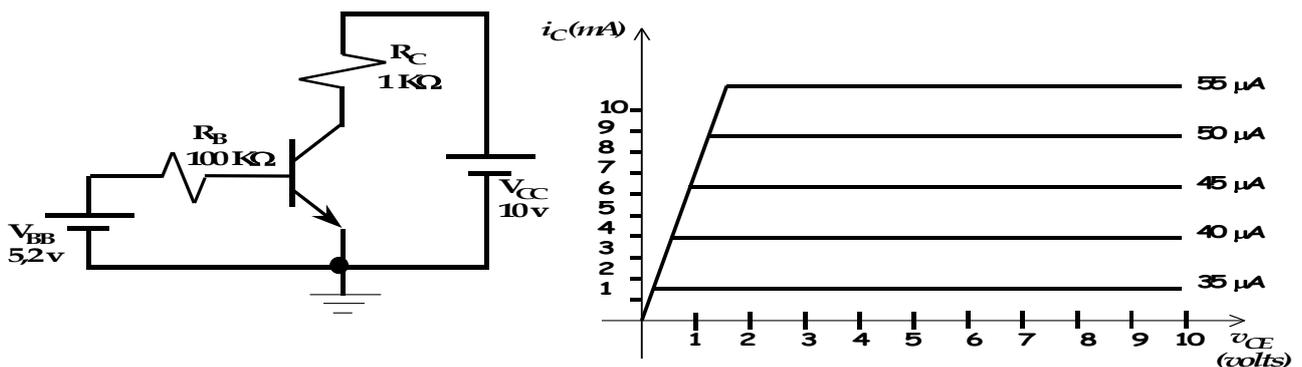
2.1 (a) O circuito abaixo é o comando de um LED que se acende quando passa alta corrente por ele. Supondo $V_{CES} = 0\text{v}$, queda de 2V no LED quando ele está acionado, calcule a corrente de funcionamento do LED.

(b) Se $V_i = 5\text{v}$, mostre que o transistor não poderá estar na região ativa.



2.2 (a) Dado o circuito onde $\beta = 100$, e também a característica de saída mostrada na figura, determine o ponto de operação analiticamente.

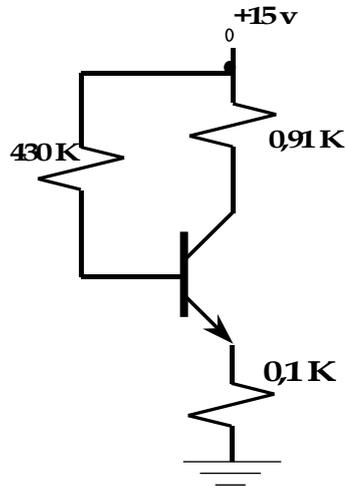
(b) Trace a reta de carga DC e ache o ponto **P** graficamente. Considere $\beta = 100$, $V_{CES} = 0,2\text{v}$, $V_{BE} = 0,7\text{v}$.



2.3 (a) Calcule a corrente de saturação do coletor

(b) $I_C = ?$; $\beta = 100$

(c) $I_C = ?$; $\beta = 300$

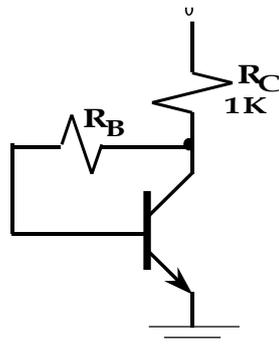


2.4. (a) Polarize no meio da reta de carga se $V_{CC} = 15\text{v}$. $\beta = 200$. Desprezar V_{BE} .

(b) $I_C = ?$; $\beta = 100$

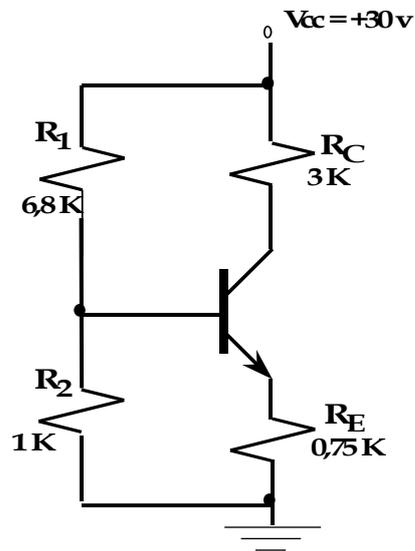
(c) $I_C = ?$; $\beta = 300$

(d) Qual a conclusão que você tira?



2.5 Projete um circuito polarizador por divisão de tensão para: $V_{CC} = 20\text{v}$; $I_C = 5\text{ mA}$, β entre 80 e 400. Utilize valores comerciais. Calcule os extremos de utilização.

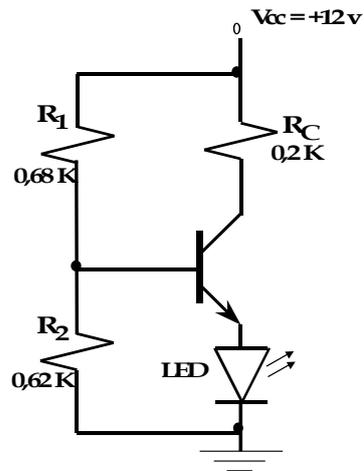
2.6. (a) Ache o ponto Q. Suponha divisor de tensão quase ideal.



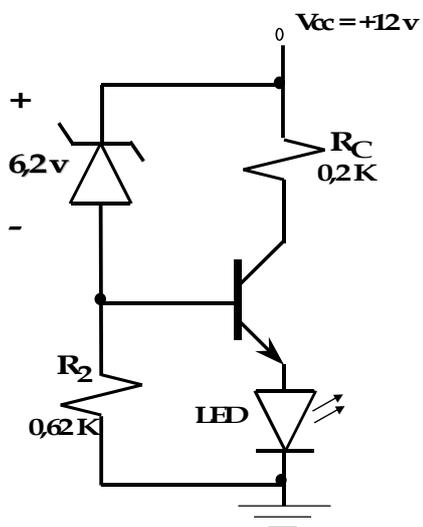
(b) Repita para: $V_{CC} = 20\text{v}$; $R_1 = 6,2\text{ K}\Omega$, $R_2 = 1\text{ K}\Omega$, $R_C = 1,6\text{ K}\Omega$, $R_E = 390\text{ }\Omega$, $\beta = 100$.

2.7 (a) Suponha um divisor de tensão ideal, ache a corrente no LED.

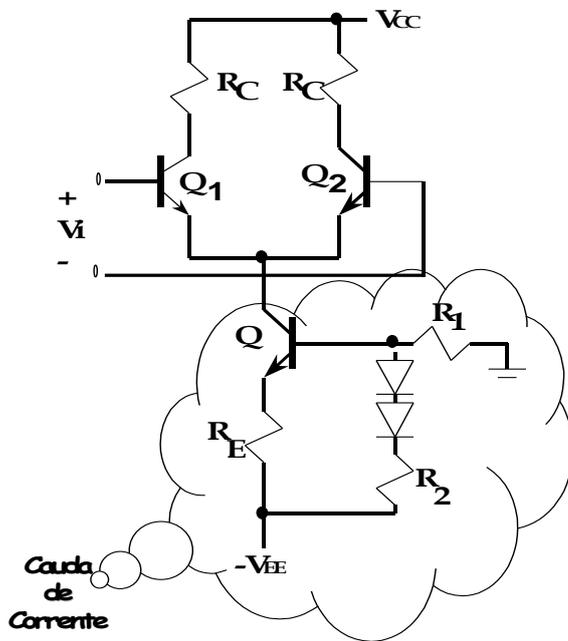
$$V_{EB} = 0,7v.$$



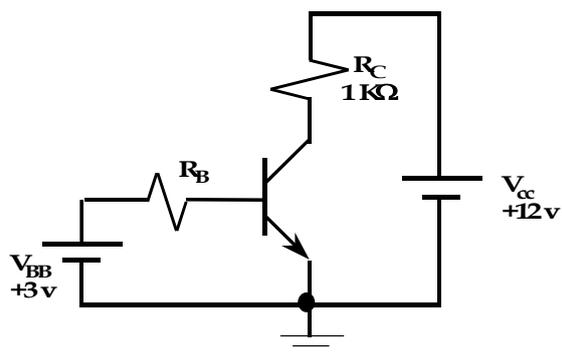
(b) Verifique que o circuito a *zener* a seguir produz, aproximadamente, o mesmo resultado, com a vantagem de termos uma fonte de corrente estabilizada.



2.8 O circuito a seguir é um amplificador diferencial (que você aprenderá melhor futuramente) com cauda de corrente. Prove que a cauda de corrente funciona como uma fonte de corrente segura, ou seja, independente da temperatura. Suponha que a temperatura afeta igualmente as junções, e, portanto, V_{BE} e V .



2.9 Calcule R_B para que o circuito sature. Utilize valores comerciais.



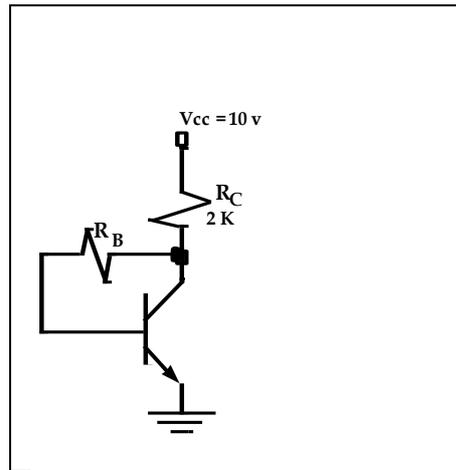
2.10 (P3-Uerj-Eletrônica 1 – 2002.2)

Dispõe-se de todos os resistores com tolerância 10% e transistor com β variando assim com a temperatura:

$^{\circ}\text{C}$	β
-40	50
0	80
27	100
40	150

- (a) Dimensione o R_B melhor possível para o circuito funcionar com máxima excursão de sinal no Saara, de dia.
- (b) Se você testar o circuito na Uerj, num dia ameno de outono, qual a máxima excursão na saída que você pode obter sem distorção?

(c) Se você é um consultor de Eletrônica, trabalhando em montanhas norte da África (muito quente de dia, muito frio de noite), que sugestão de outro circuito de polarização você daria? Por quê?

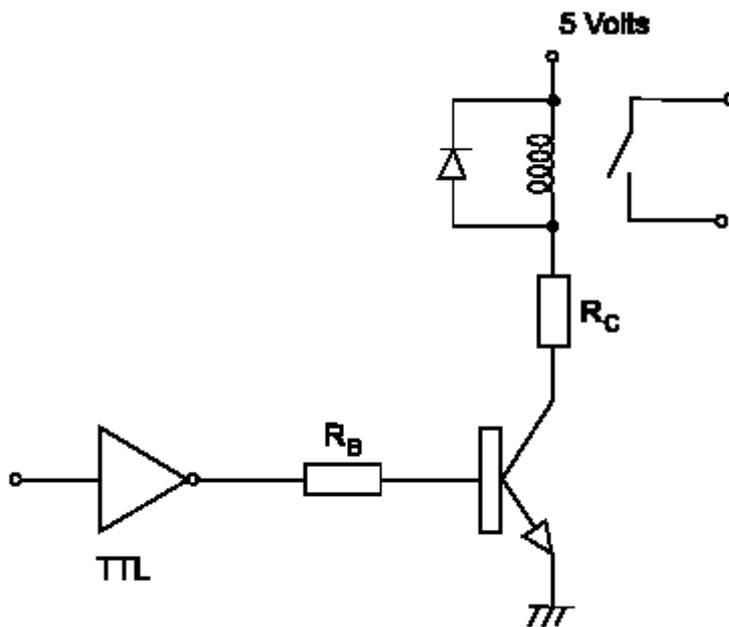


2.11 (ENADE98)

Um inversor lógico de uma placa de circuitos digitais, com tecnologia TTL, deve acionar o relé mostrado na figura abaixo.

Deseja-se especificar um transistor para fazer a conexão entre o inversor e o relé. Para isso, determine:

- o valor da resistência R_B e o valor mínimo do ganho de corrente β para que o relé seja acionado quando o TTL estiver no nível lógico "1"; (valor: 5,0 pontos)
- o valor da resistência R_C para que o limite de corrente da bobina do relé não seja ultrapassado, ainda que o parâmetro β do transistor seja muito maior que o valor mínimo especificado. (valor: 5,0 pontos)

**Dados/Informações Técnicas:**

- Resistência elétrica da bobina: 20Ω .
- Corrente mínima para acionar o relé: 40 mA.
- Máxima corrente suportada pela bobina do relé: 100 mA.
- Quando no estado "1", o inversor lógico TTL fornece corrente de $400 \mu\text{A}$ para uma tensão de saída de 2,4 volts.
- O transistor, quando conduzindo, tem uma tensão de 0,7 volts entre a base e o emissor.
- A tensão mínima de saturação entre o coletor e o emissor é 0,2 volts.

2.12 (ENADE99)

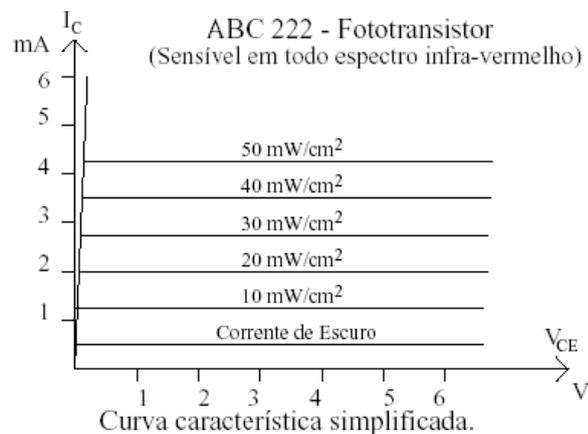
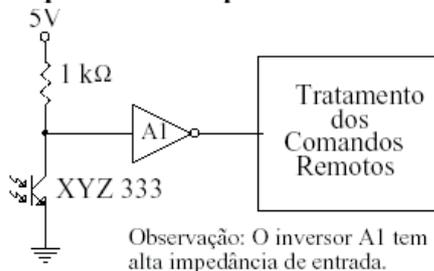
Um aparelho de TV com controle remoto infravermelho parou de responder aos comandos remotos.

Analisando o circuito de recepção infravermelho desse aparelho, você concluiu que o fototransistor XYZ 333 estava "queimado". Foi então utilizado para substituir o componente danificado o fototransistor ABC 222, o único encontrado no comércio local. Agora, porém, a TV só responde quando os comandos remotos são gerados a uma curta distância do aparelho. Não conseguindo solucionar completamente o defeito, você decidiu fazer uma análise mais cuidadosa do circuito. A partir do exposto:

- explique, utilizando o conceito de reta de carga, por que, após a substituição do fototransistor, a TV só responde se os comandos forem enviados de uma pequena distância;
- viabilize a recepção de forma a obedecer às especificações técnicas do manual, uma vez que só foi possível conseguir o fototransistor ABC 222.

Dados/Informações Técnicas:

Esquema do Receptor de Infravermelho



O manual técnico especifica que:

- o fototransistor XYZ 333 trabalha na saturação ou no corte, de acordo com a presença ou a ausência de luz infravermelha;
- o controle remoto tem alcance de 6m, e nessa situação a potência luminosa recebida pelo fototransistor é 20 mW/cm^2 .

2.13 (ENADE 2000)

Considere os seguintes experimentos realizados em um laboratório.

Experimento 1: O objetivo é caracterizar transistores (NPN ou PNP) e verificar suas condições, empregando um multímetro.

Alguns multímetros dispõem de uma opção para teste de diodo, quando, então, fornecem uma tensão suficientemente grande para polarizar diretamente uma junção PN. Com base nas medidas presentes na tabela, e considerando que o multímetro empregado fornece 3 V, responda às perguntas abaixo.

Tabela: Medições realizadas com o multímetro

Multímetros e Transistores estão representados nas figuras com as letras M e T respectivamente.

Transistor					Multímetro na opção teste de diodo
	T	E	B	C	
Q1	0,7	3	3	0,7	
Q2	3	0,7	0,7	3	
Q3	3	3	3	0,7	
Q4	3	0,7	3	3	
Q5	0	0	3	3	
Q6	3	3	0,7	3	
Q7	0,7	3	0	0	
Q8	0,7	3	3	3	

- a) O responsável pelo experimento afirmou que os transistores Q1 e Q2 são PNP. Baseado nas medidas presentes na tabela analise e comente essa afirmativa. (valor: 2,0 pontos)
- b) Qual(is) transistor(es) apresenta(m) a junção BE em curto-circuito? (valor: 1,0 ponto)
- c) Qual(is) transistor(es) apresenta(m) a junção BC em circuito aberto? (valor: 1,0 ponto)

Experimento 2: O objetivo é determinar a corrente em um diodo de germânio, em pontos de sua curva característica. Para tanto, foi empregado o esquema mostrado na Figura 1, que permitiu levantar a curva característica indicada na Figura 2. Determine, então, o valor da corrente no ponto P da curva característica. (valor: 6,0 pontos)

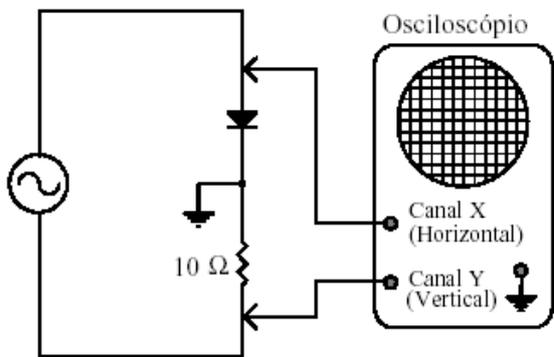
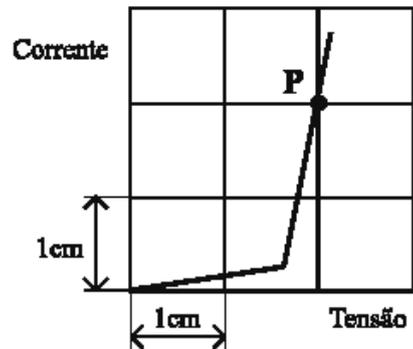


Figura 1



Curva Característica de um diodo
Figura 2

Dados / Informações Técnicas

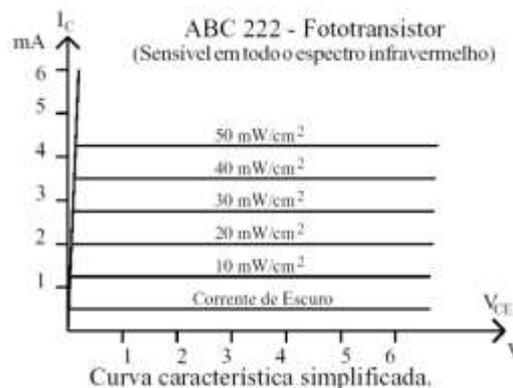
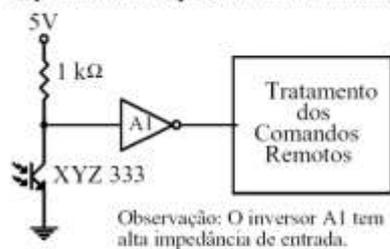
- A escala horizontal é 10 mV/cm.
- A escala vertical é 10 mV/cm .

- As pontas de prova empregadas são divisoras por 10.

2.14 Um aparelho de TV com controle remoto infravermelho parou de responder aos comandos remotos. Analisando o circuito de recepção infravermelho desse aparelho, você concluiu que o fototransistor XYZ 333 estava "queimado". Foi então utilizado, para substituir o componente danificado, o fototransistor ABC 222, o único encontrado no comércio local. Agora, porém, a TV só responde quando os comandos remotos são gerados a uma curta distância do aparelho. Não conseguindo solucionar completamente o defeito, você decidiu fazer uma análise mais cuidadosa do circuito.

Dados/Informações Técnicas:

Esquema do Receptor de Infravermelho



O manual técnico especifica que:

- o fototransistor XYZ 333 trabalha na saturação ou no corte, de acordo com a presença ou a ausência de luz infravermelha;
- o controle remoto tem alcance de 6m, e nessa situação a potência luminosa recebida pelo fototransistor é 20 mW/cm^2 .

A partir do exposto:

- explique, utilizando o conceito de reta de carga, por que, após a substituição do fototransistor, a TV só responde se os comandos forem enviados de uma pequena distância;
- viabilize a recepção de forma a obedecer às especificações técnicas do manual, uma vez que só foi possível conseguir o fototransistor ABC 222.

2.15 Pesquise *datasheets* para os valores de diodos, zener, transistor, resistor, encontrados para o exemplo deste capítulo.

2.16 Projete uma fonte regulada tensão série considerando que o cliente desta fonte especifica uma corrente de **1 A** e uma tensão de **12 v**. Use valores comerciais e

considere que só se dispõe dos resistores 12Ω , 68Ω e 82Ω . Caso o resistor comercial projetado esteja em situação de queimar ou não regular, utilize associação de resistores.

2.17 Calcule a fonte de corrente I abaixo

