

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
ESCOLA TÉCNICA ESTADUAL “LAURO GOMES”**

**APOSTILA DE ELETRÔNICA ANALÓGICA
AN2 – 2ª SÉRIE DE ELETRÔNICA – PERÍODO NOTURNO**

PROFº GIUSEPPE GIOVANNI MASSIMO GOZZI

**SÃO BERNARDO DO CAMPO
2014**

DIODO ZENER

Quando um diodo comum (de retificação) está polarizado **reversamente**, diz-se que ele assume as características de um isolante. Sendo assim, o diodo, nestas condições, é associado a uma chave aberta e costuma-se dizer que não há corrente circulando no diodo.

Na verdade, existe uma pequena corrente elétrica chamada de **reversa**, que é formada por duas parcelas: uma é a **corrente de saturação**, formada pelo movimento dos portadores minoritários existentes nos cristais semicondutores devido à **tensão reversa** aplicada ao diodo - os portadores minoritários são continuamente produzidos graças à energia térmica constantemente aplicada ao diodo; sendo assim, esta parcela depende (apenas) da **temperatura** - ; outra parcela é a **corrente de fuga superficial**, formada por impurezas da superfície do diodo, que criam caminhos (trajetos ôhmicos) para a corrente percorrer - esta parcela depende (apenas) da **tensão**.

Se a tensão reversa for muito alta, aumenta-se o campo elétrico no qual os portadores minoritários estão submetidos. Isto resulta numa rápida aceleração destes portadores de carga, fazendo com que as cargas livres se choquem nos átomos. Com o choque, há uma liberação de energia forte o suficiente para criar novos portadores de carga, que também são acelerados, chocando-se também com outros átomos, repetindo o processo continuamente. Este EFEITO CASCATA é conhecido como **efeito avalanche**:

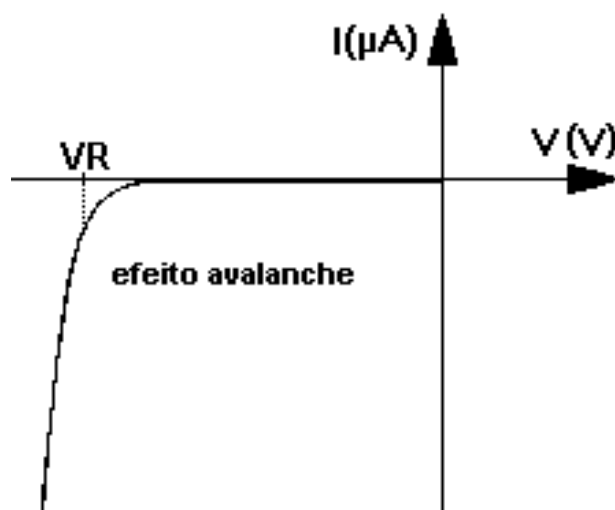


FIGURA 01: EFEITO AVALANCHE

Este processo contínuo aumenta a corrente reversa muito rapidamente. Por causa da grande quantidade de elétrons livres, o diodo acaba se rompendo devido à potência dissipada, muito maior do que ele pode suportar.

No caso do diodo Zener - uma homenagem a Clarence Zener, o primeiro que estudou o **fenômeno da ruptura**, no qual se baseia o funcionamento deste dispositivo - escolhe-se os materiais semicondutores e a porcentagem de dopagem de maneira que a ruptura do Zener ocorra em até centenas de volts. Se controlarmos o valor da corrente elétrica - por exemplo com um **resistor em série com o diodo Zener** - o fenômeno da ruptura não danifica o diodo, e acaba sendo reversível.

CIRCUITO DE POLARIZAÇÃO

A vantagem deste diodo é o efeito zener : mesmo com uma grande variação de corrente no diodo, a tensão sobre ele varia muito pouco, quando varia.

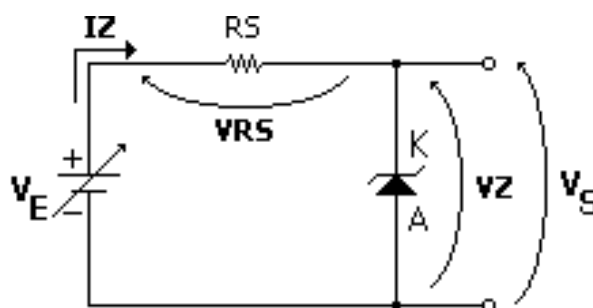


FIGURA 02: CIRCUITO DE POLARIZAÇÃO DO ZENER

A partir de agora, vamos chamar a **tensão reversa** de **TENSÃO ZENER (V_Z)**, a **corrente reversa** de **CORRENTE ZENER (I_Z)**, e o **efeito avalanche** de **EFEITO ZENER**.

Sendo assim, considerando a curva característica do zener e o circuito de polarização, onde V_E varia de V_{E1} até V_{E2} (V_{E2} > V_{E1}), teremos :

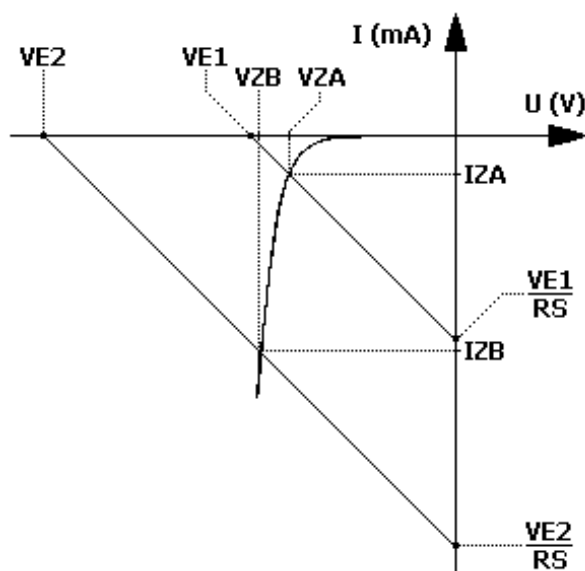


FIGURA 03: ANÁLISE GRÁFICA

Reta de carga 1:

tensão da fonte $\Rightarrow V_{E1}$

1º ponto : V_{E1} (circuito aberto)

2º ponto : $I_1 = V_{E1} \div R_S$ (curto circuito)

Reta de carga 2:

tensão da fonte $\Rightarrow V_{E2}$

1º ponto : V_{E2} (circuito aberto)

2º ponto : $I_2 = V_{E2} \div R_S$ (curto circuito)

Pelo gráfico, podemos notar que a variação de V_Z é muito pequena:

$$\Delta V_Z = V_{ZB} - V_{ZA}$$

$$\Delta I_Z = I_{ZB} - I_{ZA}$$

MODELOS DE TRABALHO

É comum encontrarmos dois modelos de trabalho para o zener:

1º) MODELO : IDEAL $\Rightarrow$ O zener se assemelha a uma fonte CC :

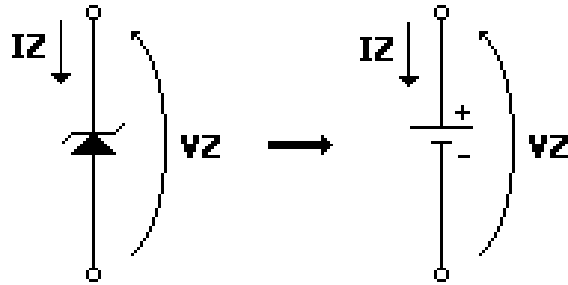


FIGURA 04: 1º MODELO

2º) MODELO : REAL $\Rightarrow$ O zener se assemelha a uma fonte CC em série com uma resistência (resistência zener):

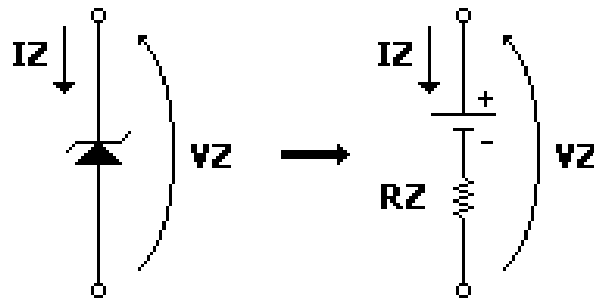
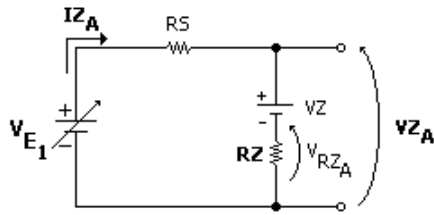


FIGURA 05: 2º MODELO

Se utilizarmos o 2º MODELO no circuito de polarização, teremos:

CIRCUITO 1

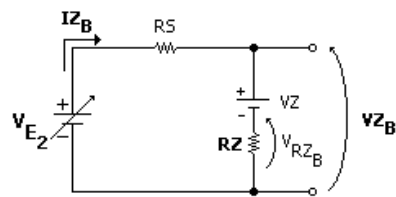


$$V_{Z_A} = V_Z + V_{R_{Z_A}}$$

$$V_{R_{Z_A}} = R_Z \times I_{Z_A}$$

$$V_{R_{Z_A}} = V_Z + (R_Z \times I_{Z_A})$$

CIRCUITO 2



$$V_{Z_B} = V_Z + V_{R_{Z_B}}$$

$$V_{R_{Z_B}} = R_Z \times I_{Z_B}$$

$$V_{R_{Z_B}} = V_Z + (R_Z \times I_{Z_B})$$

Igualando-se as duas equações através de V_Z , teremos :

$$V_Z = V_{R_{Z_A}} - (R_Z \times I_{Z_A})$$

$$V_Z = V_{R_{Z_B}} - (R_Z \times I_{Z_B})$$

$$V_{Z_B} - (R_Z \times I_{Z_B}) = V_{Z_A} - (R_Z \times I_{Z_A}) \Rightarrow V_{Z_B} - V_{Z_A} = (R_Z \times I_{Z_B}) - (R_Z \times I_{Z_A})$$

$$\Rightarrow V_{Z_B} - V_{Z_A} = R_Z (I_{Z_B} - I_{Z_A})$$

Se $\Delta V_Z = V_{Z_B} - V_{Z_A}$ e $\Delta I_Z = I_{Z_B} - I_{Z_A}$, então : $\Delta V_Z = R_Z \times \Delta I_Z$

$$R_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}$$

R_Z é a resistência do zener, em (Ω), geralmente de valor baixo.

CIRCUITO REGULADOR DE TENSÃO

Circuito regulador sem carga

Para que o zener funcione adequadamente, ou seja, mantenha a tensão na saída constante, é necessário que ele opere na região zener, com todas as condições de funcionamento. Isto implica em :

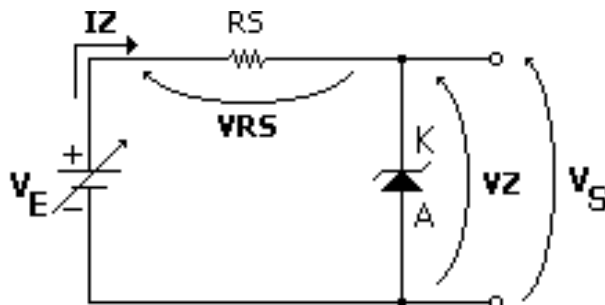


FIGURA 06: REGULADOR SEM CARGA

- DETERMINAR OS VALORES CRÍTICOS DA FONTE DE TENSÃO VE E DA RESISTÊNCIA RS, PARA GARANTIR O FUNCIONAMENTO DO ZENER, ALÉM DE PROTEGÊ-LO DE UMA CORRENTE ALTA.

Então :

Fixando-se a resistência RS :

$$VE_{MÍN} = (RS \times IZ_{MÍN}) + VZ$$

$$VE_{MÁX} = (RS \times IZ_{MÁX}) + VZ$$

Fixando-se a tensão VE :

$$VE = (RS_{MÍN} \times IZ_{MÁX}) + VZ$$

$$VE = (RS_{MÁX} \times IZ_{MÍN}) + VZ$$

ATRAVÉS DESTAS CONCLUSÕES, PODEMOS CHEGAR A DUAS CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES :

- *NO PIOR CASO, O VALOR MÍNIMO QUE A TENSÃO VE PODE ASSUMIR DEVE SER MAIOR DO QUE VZ ;*
- *NO PIOR CASO, O VALOR MÍNIMO QUE O RESISTOR RS PODE ASSUMIR DEVE SUPORTAR A CORRENTE ZENER MÁXIMA.*

Circuito regulador com carga

Regulador Simples

Considerando-se o circuito abaixo, teremos as seguintes equações:

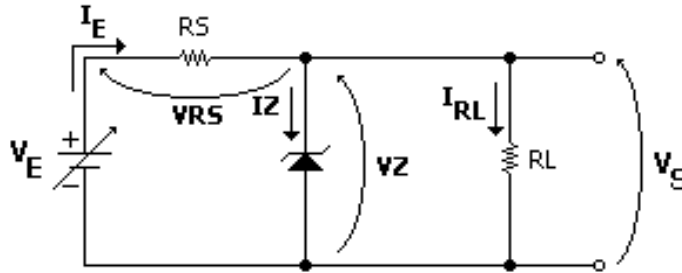


FIGURA 07: REGULADOR COM CARGA

$$V_E = V_{RS} + V_Z \quad V_{RS} = R_S \times I_E = I_Z + I_{RL}$$

Podemos então fazer o seguinte :

$$V_{RS} = V_E - V_Z \Rightarrow V_{RS} = R_S \times (I_Z + I_{RL}) \Rightarrow R_S \times (I_Z + I_{RL}) = V_E - V_Z$$

$$R_S = \frac{V_E - V_Z}{I_Z - I_{RL}}$$

Se V_E variar , por exemplo, de VE_1 para VE_2 , teremos :

$$\text{tensão da fonte} \Rightarrow VE_1$$

$$\text{tensão da fonte} \Rightarrow VE_2$$

$$VE_1 = V_{RS1} + V_Z$$

$$VE_2 = V_{RS2} + V_Z$$

$$VE_1 = (R_S \times IE_1) + V_Z$$

$$VE_2 = (R_S \times IE_2) + V_Z$$

$$V_Z = VE_1 - (R_S \times IE_1)$$

$$V_Z = VE_2 - (R_S \times IE_2)$$

Igualando-se as duas equações através de V_Z , teremos :

$$VE_2 - (R_S \times IE_2) = VE_1 - (R_S \times IE_1) \Rightarrow VE_2 - VE_1 = (R_S \times IE_2) - (R_S \times IE_1)$$

$$VE_2 - VE_1 = R_S \times (IE_2 - IE_1) \therefore$$

$$\Delta VE = R_S \times \Delta IE$$

Ao substituírmos o diodo zener pelo 2º MODELO , teremos $\Delta V_Z = R_Z \times \Delta I_Z$. Se a carga R_L não variar, I_{RL} praticamente será constante. Então, se a corrente da fonte variar, a corrente no zener irá variar na mesma proporção ($\Delta I_E \cong \Delta I_Z$).

Sendo assim :

$$\Delta V_E = R_S \times \Delta I_E \qquad \Delta I_E = \frac{\Delta V_E}{R_S}$$

$$\Delta V_Z = R_Z \times \Delta I_Z \qquad \Delta I_Z = \frac{\Delta V_Z}{R_Z}$$

Se $\Delta I_E \cong \Delta I_Z$, então :

$$\frac{\Delta V_Z}{\Delta V_E} = \frac{R_Z}{R_S}$$

onde $\Delta V_Z \cong \Delta V_S$.

O projeto de um regulador zener pode ser resumido em determinar o valor do resistor R_S , pois geralmente os dados referentes à fonte de tensão, ao diodo zener e à carga R_L são conhecidos. Para que o zener funcione adequadamente, ou seja, mantenha a tensão na carga constante, o diodo deve funcionar na região zener, com todas as condições de funcionamento. Isto implica em :

- **A TENSÃO DA FONTE V_E DEVE SER NO MÍNIMO MAIOR DO QUE A TENSÃO ZENER;**
- **A CORRENTE NO ZENER DEVE SER LIMITADA A UM VALOR QUE NÃO COMPROMETA A INTEGRIDADE DO DIODO.**

Circuito regulador com tensão de entrada constante e carga fixa :

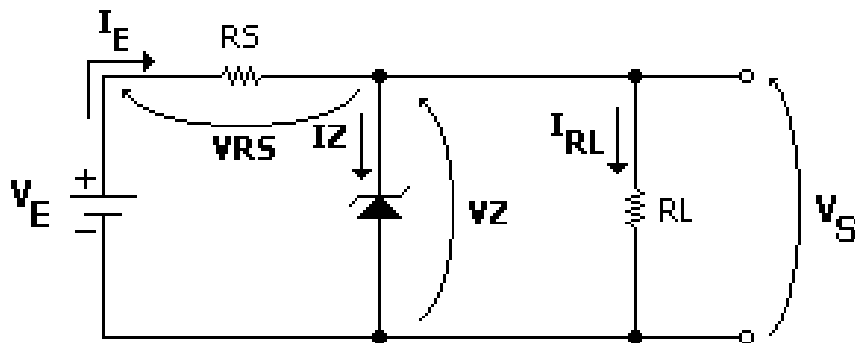


FIGURA 08: V_E CONSTANTE E R_L FIXO

$$R_{S\text{MÍN}} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Z\text{MÁX}} + I_{RL}}$$

$$R_{S\text{MÁX}} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Z\text{MÍN}} + I_{RL}}$$

Circuito regulador com tensão de entrada constante e carga variável:

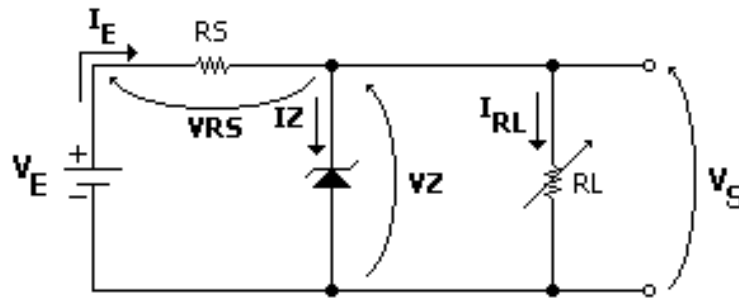


FIGURA 09: VE CONSTANTE E RL VARIÁVEL

Se considerarmos a resistência R_L muito alta, a corrente I_{RL} será muito baixa ; então a maior parte da corrente I_E fluirá para o diodo. Sendo assim :

$$I_{RLMÍN} = \frac{V_Z}{R_{LMÁX}} \Rightarrow I_{EMÁX} = I_{ZMÁX} + I_{RLMÍN}$$

$$I_{RLMÁX} = \frac{V_Z}{R_{LMÍN}} \Rightarrow I_{EMÍN} = I_{ZMÍN} + I_{RLMÁX}$$

$$R_{SMÍN} = \frac{V_E - V_Z}{I_{ZMÁX} + I_{RLMÍN}}$$

$$R_{SMÁX} = \frac{V_E - V_Z}{I_{ZMÍN} + I_{RLMÁX}}$$

Circuito regulador com tensão de entrada variável e carga fixa:

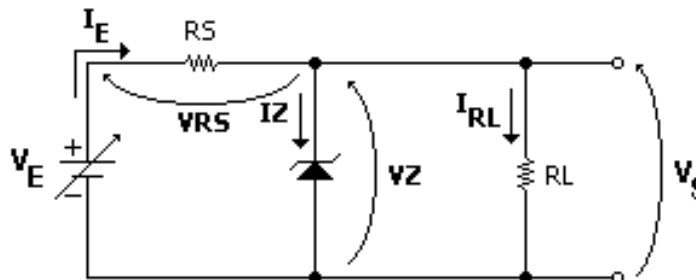


FIGURA 10: VE VARIÁVEL E RL FIXO

Se a tensão de entrada for proveniente de uma tensão CC com ONDULAÇÃO, teremos :

$$V_{EMÍN} = V_E - \frac{V_{OND}}{2} \Rightarrow \text{Se } V_E \text{ for mínimo, } I_E \text{ também será}$$

$$V_{EMÁX} = V_E + \frac{V_{OND}}{2} \Rightarrow \text{Se } V_E \text{ for máximo, } I_E \text{ também será}$$

$$R_{SMÍN} = \frac{V_{EMÁX} - V_Z}{I_{ZMÁX} + I_{RL}}$$

$$R_{SMÁX} = \frac{V_{EMÍN} - V_Z}{I_{ZMÍN} + I_{RL}}$$

Circuito regulador com tensão de entrada variável e carga variável :

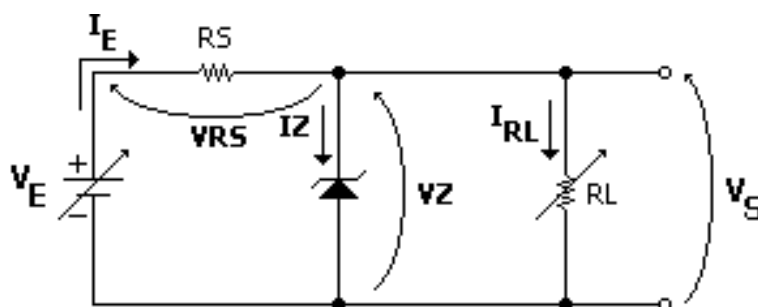


FIGURA 11: V_E VARIÁVEL E R_L VARIÁVEL

$$R_{S\text{MÍN}} = \frac{V_{E\text{MÁX}} - V_Z}{I_{Z\text{MÁX}} + I_{RL\text{MÍN}}}$$

$$R_{S\text{MÁX}} = \frac{V_{E\text{MÍN}} - V_Z}{I_{Z\text{MÍN}} + I_{RL\text{MÁX}}}$$

ESPECIFICAÇÕES DO DIODO ZENER

- O DIODO, PARA FUNCIONAR NA REGIÃO ZENER, DEVE ESTAR POLARIZADO REVERSAMENTE, ALÉM DE QUE A TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DEVE SER, NO MÍNIMO, SUPERIOR À TENSÃO ZENER (V_Z) ;
- PARA QUE O ZENER NÃO SE DANIFIQUE, É NECESSÁRIO LIMITAR A CORRENTE QUE O ATRAVESSA ($I_{Z\text{MÁX}}$) ;
- NA POLARIZAÇÃO REVERSA, O ZENER SUPORTA UMA POTÊNCIA MÁXIMA :

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

- QUANDO A FONTE DE TENSÃO DE ENTRADA ESTIVER NO MÍNIMO VALOR POSSÍVEL, A CORRENTE NO ZENER SERÁ MÍNIMA. SE ESTE VALOR FOR DESCONHECIDO, DEVEMOS ADOTAR QUE $I_{Z\text{MÍN}}$ SEJA 10 % DE $I_{Z\text{MÁX}}$;

$$I_{Z\text{MÍN}} = I_{Z\text{MÁX}} \times 0,1$$

- O ZENER POSSUI UMA RESISTÊNCIA QUE VALE :

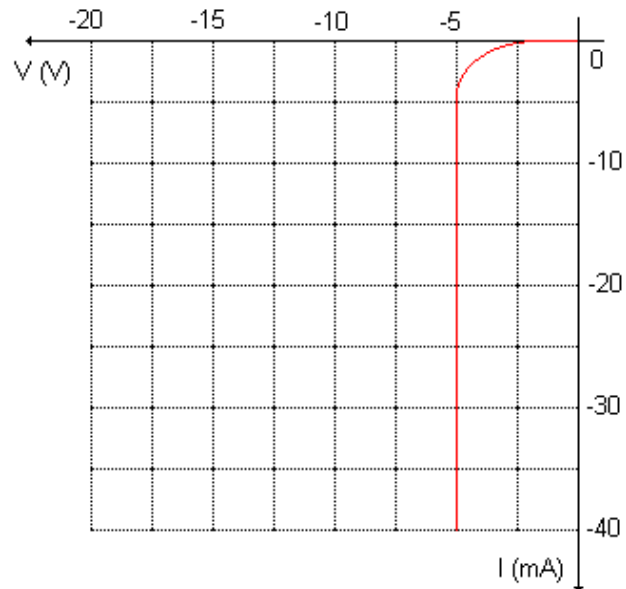
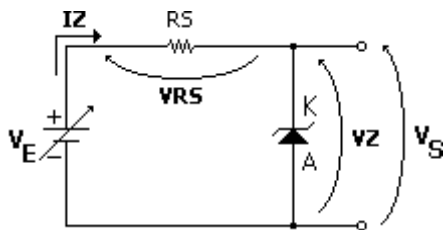
$$R_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}$$

A corrente reversa de um diodo não depende só da tensão ; ela depende da temperatura também. E esta dependência entre tensão reversa e temperatura é um problema a ser analisado com bastante importância na hora de se construir um diodo zener, pois a alteração percentual na tensão zener em relação ao aumento da temperatura (em $^{\circ}\text{C}$) é o próprio coeficiente de temperatura, (medido como função da corrente através do diodo), podendo ser POSITIVO ou NEGATIVO.

EXERCÍCIOS

Os exercícios 49 a 53 referem-se ao circuito e gráfico abaixo :

49. Se $V_E = 20\text{ V}$ e $R_S = 500\ \Omega$, quais são os valores de V_Z e I_Z , pelo gráfico?

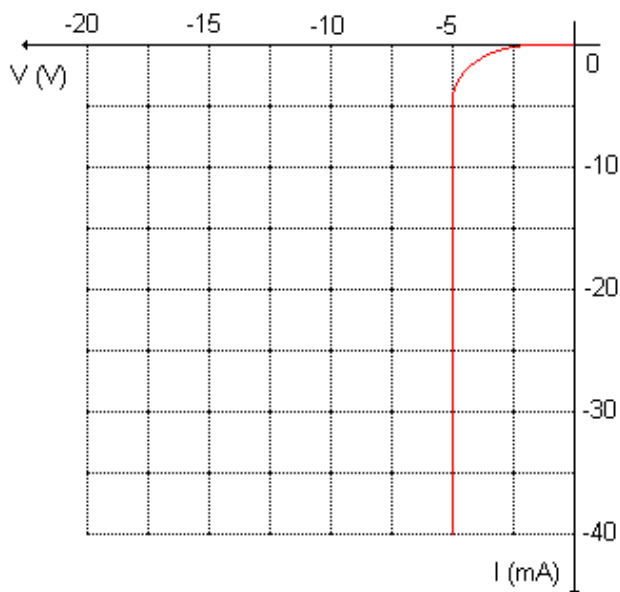


DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:



50. Mantendo-se os valores de V_E e R_S nas condições do exercício 49, qual o valor da potência zener?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

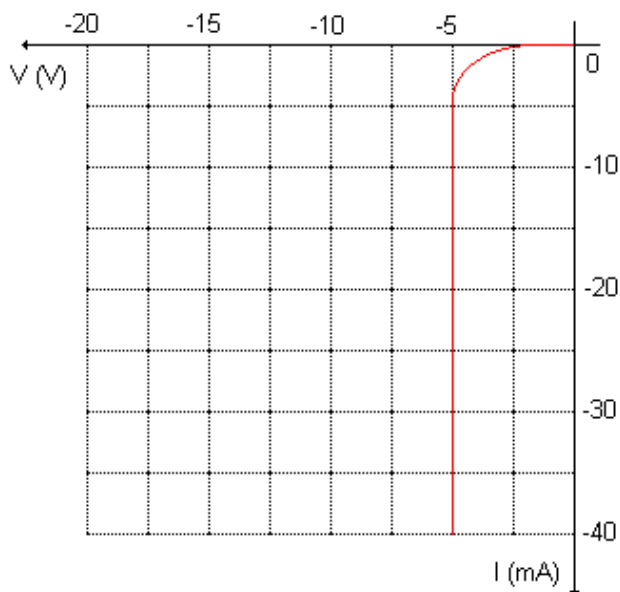
51. Se mantivermos o valor de V_E em 20 V mas quadruplicarmos o valor de R_S , quais são os novos valores de V_Z e I_Z ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:



52. Se $V_E = 20\text{ V}$ e $R_S = 2\text{ k}\Omega$, então qual o valor da potência zener ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

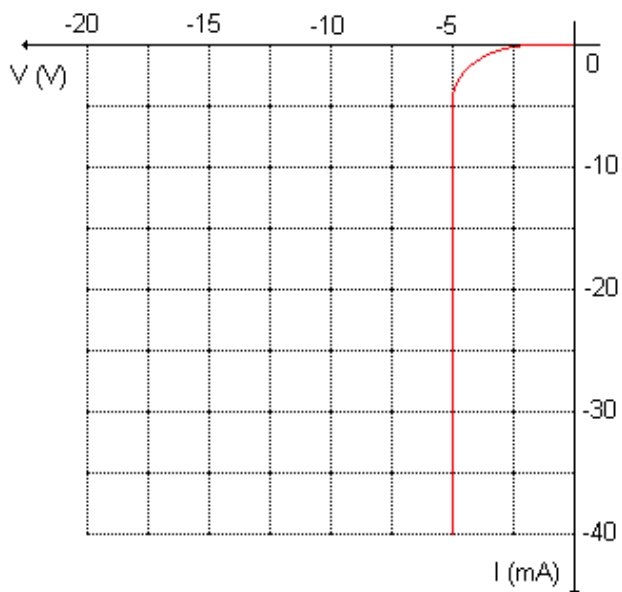
53. Se, com relação ao exercício 51, diminuirmos pela metade o valor de V_E e substituirmos o resistor R_S por um de $500\ \Omega$, quais os novos valores de V_Z e I_Z , obtidos pelo gráfico ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:



54. Mantendo-se as condições do exercício 53, a potência zener será :

- a) $P_Z = 200 \text{ mW}$;
- b) $P_Z = 450 \text{ mW}$;
- c) $P_Z = 50 \text{ mW}$;
- d) $P_Z = 37,5 \text{ mW}$;

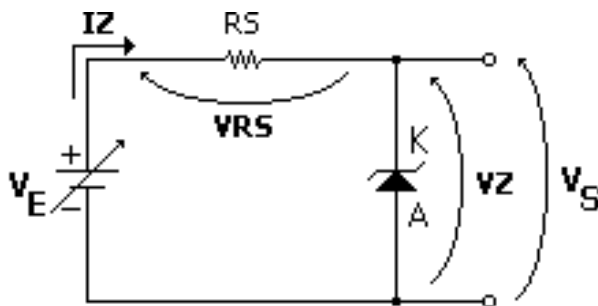
DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

Os exercícios 55 a 58 referem-se ao circuito abaixo:



$$V_E = 15 \text{ V}$$

$$R_S = 500 \, \Omega$$

55. Se a tensão zener valer 5 V, qual o valor da corrente zener ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

56. Mantendo-se a tensão do zener em 5 V, qual o valor da potência zener ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

57. Se a tensão V_Z for de 10 V, qual o valor de I_Z ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

58. Se mantivermos as mesmas condições do exercício 57, qual o valor da potência zener ?

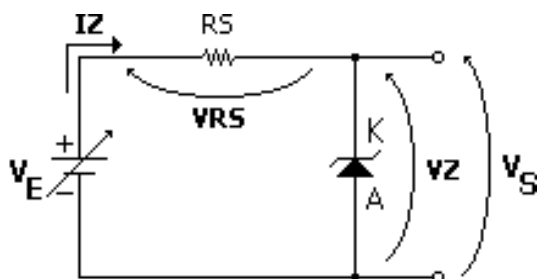
DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

59. Para o circuito abaixo, o valor mínimo de R_S será :



$$V_E = 10 \text{ V}$$

$$V_Z = 2 \text{ V}$$

$$P_Z = 100 \text{ mW}$$

- a) $R_S = 200 \, \Omega$;
- b) $R_S = 40 \, \Omega$;
- c) $R_S = 1600 \, \Omega$;
- d) $R_S = 160 \, \Omega$;

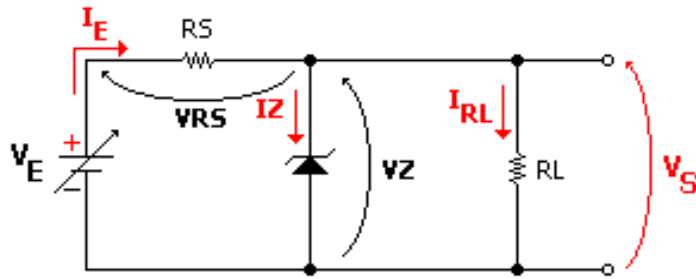
DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

60. Para o circuito abaixo, o valor aproximado de R_S será :



$$V_{Emin} = 19 \text{ V}$$

$$V_{Emax} = 21 \text{ V}$$

$$R_L = 1 \text{ k}\Omega$$

$$V_Z = 5 \text{ V}$$

$$P_{Zmax} = 500 \text{ mW}$$

- a) $R_S = 820 \text{ }\Omega$;
- b) $R_S = 560 \text{ }\Omega$;
- c) $R_S = 150 \text{ }\Omega$;
- d) $R_S = 1 \text{ k}\Omega$;

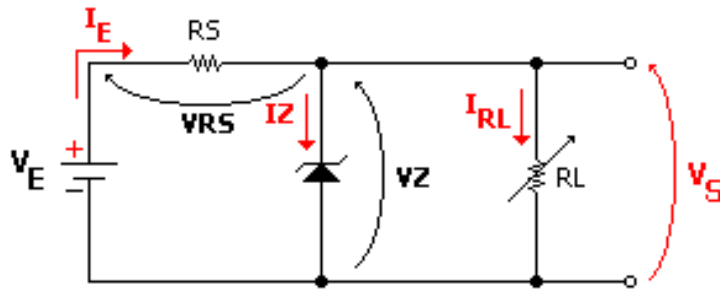
DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

61. Para o circuito abaixo, o valor aproximado de R_S será :



$$V_E = 15 \text{ V}$$

$$R_{L\min} = 100 \, \Omega$$

$$R_{L\max} = 20 \text{ k}\Omega$$

$$V_Z = 5 \text{ V}$$

$$P_{Z\max} = 300 \text{ mW}$$

- a) $R_S = 330 \, \Omega$;
- b) $R_S = 150 \, \Omega$;
- c) $R_S = 220 \, \Omega$;
- d) $R_S = 100 \, \Omega$;

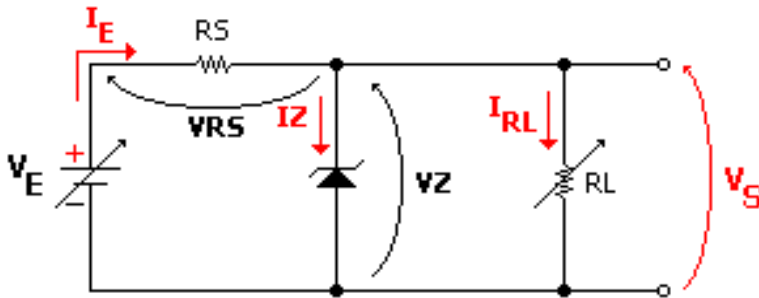
DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

62. Para o circuito abaixo, o valor de R_S será :



- a) $R_S = 56 \, \Omega$;
- b) $R_S = 150 \, \Omega$;
- c) $R_S = 68 \, \Omega$;
- d) $R_S = 100 \, \Omega$.

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

$$V_{Emin} = 19 \, V$$

$$V_{Emax} = 21 \, V$$

$$R_{Lmin} = 100 \, \Omega$$

$$R_{Lmax} = 20 \, k\Omega$$

$$V_Z = 10 \, V$$

$$P_{Zmax} = 2 \, W$$

RESOLUÇÃO:

TRANSISTORES

UM POUCO DE HISTÓRIA

Uma nova revolução na eletrônica surgiu quando o transistor foi inventado em 1948 : a idade da eletrônica de semicondutores começou com este fato. Contudo, é bom salientar que esta “era” nasceu antes, durante os anos 20. Nos anos 30 chegou-se a um dispositivo amplificador de estado sólido (precursor do transistor de junção e do transistor de efeito de campo na tecnologia MOS), porém, além de, na época, não existir a sua necessidade, ninguém conseguia explicar a teoria decorrente dos dispositivos, fora que o próprio tinha um fraco desempenho.



FIGURA 12: FASES DA CONSTRUÇÃO DE UM TRANSISTOR

A necessidade de desenvolvimento de dispositivos de estado sólido não se manifestou até 1945, apesar dos diodos semicondutores terem sido bastante utilizados na 2ª Guerra Mundial (em comunicação por microondas). Um dos principais objetivos era tentar desenvolver um amplificador de estado sólido que eliminaria os inconvenientes da válvula (consumo de energia mesmo fora de utilização, grandes dimensões e substituição da válvula por causa do rompimento do filamento pelo calor). Além do mais, foi prevista que em muitas aplicações (comunicações telefônicas, principalmente à distância, por exemplo) seriam necessários comutação eletrônica ao invés das eletromecânicas, e também amplificadores melhores. O avanço das indústrias de rádios e televisores também contribuiu para esta necessidade.

DESCOBERTA DO TRANSISTOR

O modelo original do transistor utilizava germânio como semicondutor e os contatos eram efetuados através de fios de ouro, próximos um do outro. Na experiência efetuada em dezembro de 1947, nos laboratórios da Bell Telephones, John Bardeen e Walter Brattain verificaram que a tensão de saída na ponta denominada **coletor** em relação à **base** de germânio era maior do que a tensão de entrada (na ponta denominada **emissor**). Reconheceram o efeito que estavam procurando, e assim nasceu o amplificador de estado sólido, anunciado em 30 de junho de 1948, sob a forma de **transistor de contato pontual**.

Os primeiros transistores tinham um desempenho muito ruim : baixo ganho, muito ruído e as características diferiam muito entre um dispositivo e outro. Estas dificuldades existiam pelo fato do contato pontual, como havia apontado o coordenador do grupo que havia descoberto o transistor, Schockley. Ele mesmo propôs e desenvolveu a teoria dos transistores de **junção**, onde estes novos dispositivos dependiam de **portadores de carga** (as **lacunas** e os **elétrons**), onde as propriedades elétricas dos transistores dependem de um teor de impurezas específicas cuidadosamente controlado.

A empresa American Telephone and Telegraph (AT&T), onde o Bell Laboratories é atualmente o seu ramo de pesquisas, não manteve suas descobertas em segredo : simpósios foram realizados, licenças patenteadas foram oferecidas a outras empresas interessadas na fabricação de transistores, como as fabricantes das válvulas (RCA, Raytheon, General Electric, Westinghouse), e outras (existentes e novas).

Numa destas novas empresas, a Texas Instruments, anunciou (1954) a produção de transistores de **silício**, que permitia operações até 200° C, enquanto que as características do germânio

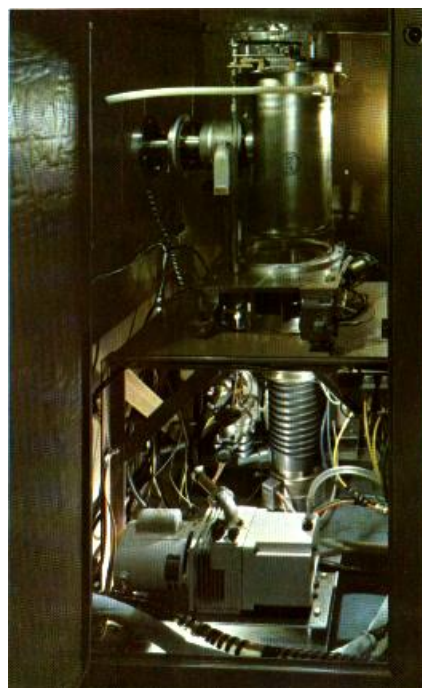
JOHNSON MATTHEY & CO.LTD



FIGURA 13:
Micrografia de uma fase da produção de semicondutores.

limitavam as operações à 75° C.

FIGURA 14:
Implantador de íons que adiciona quantidades precisas de impurezas em semicondutores



LINTOTT ENGINEERING LTD

Bardeen, Brattain e Shockley receberam o Nobel de Física por sua invenção e contribuição para a compreensão dos semicondutores, em 1956.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM TRANSISTOR BIPOLAR

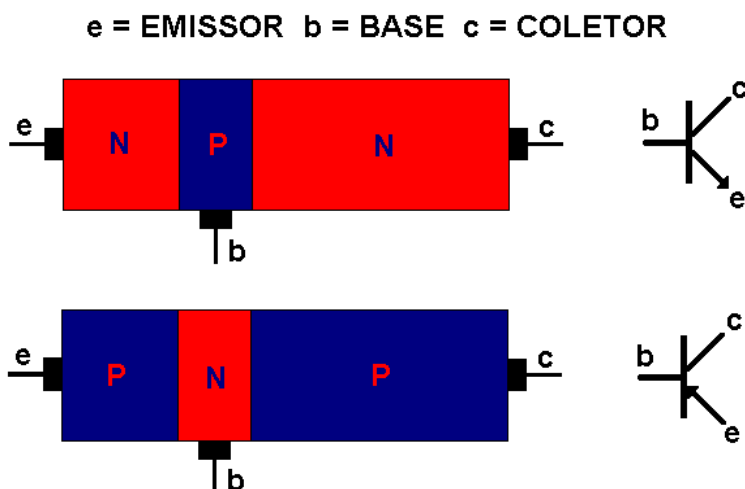


FIGURA 13: TIPOS DE TRANSISTORES BIPOLARES

Basicamente, o transistor possui a capacidade, além da **amplificação**, de **controlar a corrente elétrica**. O transistor bipolar possui duas camadas de cristais semicondutores do mesmo tipo intercaladas por uma camada de cristal semicondutor do tipo oposto. Os nomes dessas camadas (coletor, emissor e base) refletem sua função na operação do transistor :

O emissor é a camada **mais dopada**, pois deve **emitir** portadores de carga para a base, a camada **mais fina** e que possui uma **dopagem intermediária**, onde a maior parte dos portadores lançados pelo emissor atravessam-na, dirigindo-se ao coletor, a camada **menos dopada**, que recolhe os portadores que provém da base. O coletor também é a camada **mais grossa**, pois a maior parte da potência dissipada ocorre nela.

O transistor mais utilizado é o **NPN**, pelo fato dele comutar mais rápido que o **PNP**; sendo assim, vamos estudar o seu funcionamento :

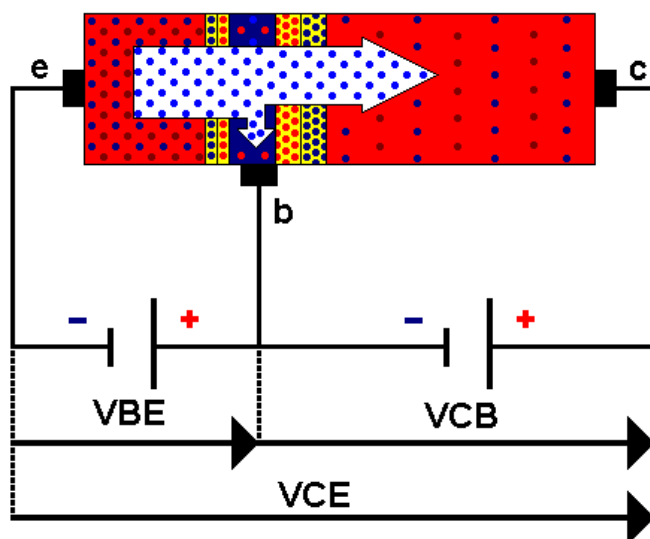


FIGURA 14: FUNCIONAMENTO DO TRANSISTOR NPN

Pela figura 14, percebe-se que a junção base-emissor está polarizada diretamente, enquanto que a junção base-coletor está polarizada reversamente. Como a junção base-emissor comporta-se como um diodo que conduz ($V_{BE} \cong 0,7\text{ V}$), há um grande fluxo de portadores majoritários, que se dirige à própria base. Contudo, existe uma atração maior exercida pelo coletor ($V_{CB} > V_{BE}$) que faz com que este fluxo dirija-se quase que totalmente para ele. Devemos ainda nos lembrar de que a corrente se dirige mais ao coletor pelo fato deste possuir a menor dopagem.

Também pela figura 14 percebe-se que a tensão entre os terminais do emissor e coletor (V_{CE}) é nada mais do que a soma das tensões V_{CB} e V_{BE} .

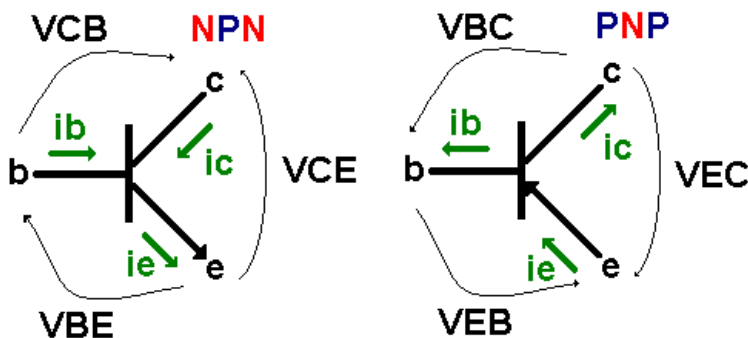


FIGURA 15: SENTIDOS DAS TENSÕES E CORRENTES

NPN	$\Rightarrow$	$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$	$\Rightarrow$	$i_e = i_c + i_b$
PNP	$\Rightarrow$	$V_{EC} = V_{BC} + V_{EB}$	$\Rightarrow$	$i_e = i_c + i_b$

Deve-se observar que na figura 14 temos o **sentido real** da corrente elétrica, enquanto que na figura 15 temos o **sentido convencional** da corrente elétrica.

CONFIGURAÇÕES DO TRANSISTOR

Como o transistor possui três terminais, podemos ligá-lo em três maneiras diferentes :

- 1ª - EMISSOR COMUM (A MAIS UTILIZADA)
- 2ª - BASE COMUM
- 3ª - COLETOR COMUM

Emissor Comum

Neste tipo de ligação, a base é a entrada de corrente, o coletor é a saída de corrente, e o emissor é o elemento comum, em termos de tensão, entre a entrada e a saída:

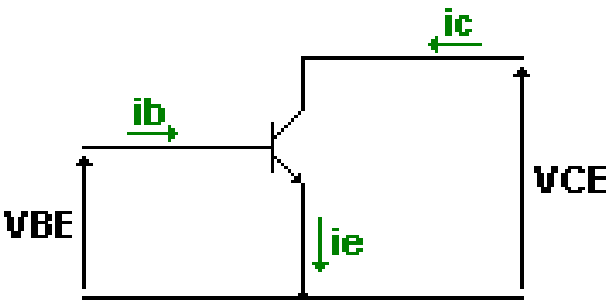


FIGURA 16: CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM

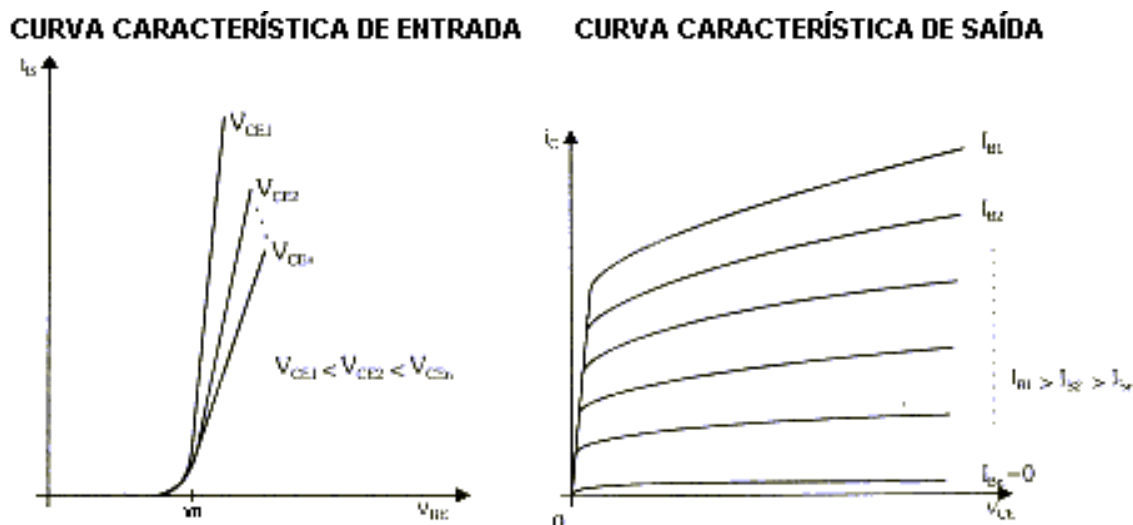


FIGURA 17: CURVA CARACTERÍSTICA EMISSOR COMUM

Na figura 17, nota-se que na curva característica de saída podem-se determinar três regiões de trabalho do transistor, como mostra a figura a seguir :

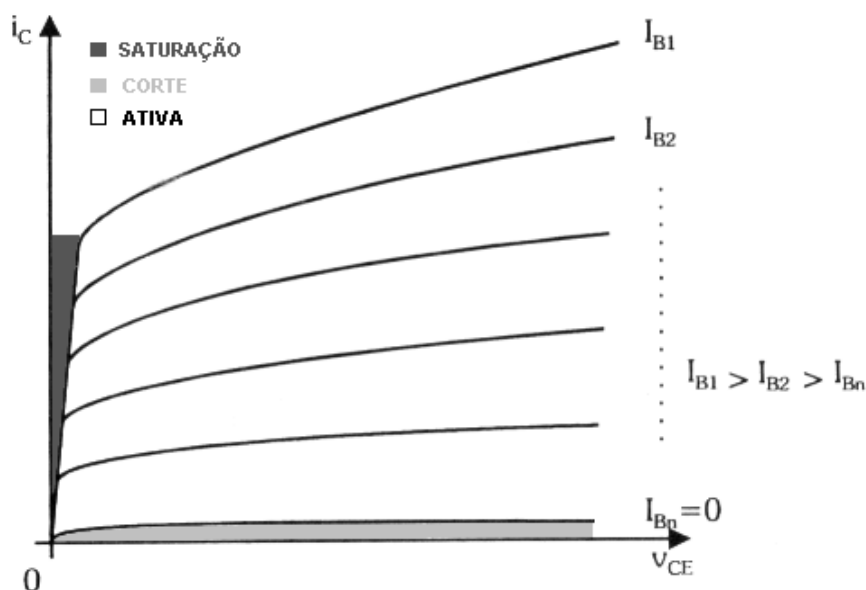


FIGURA 18: REGIÕES DE TRABALHO DO TRANSISTOR

- **REGIÃO DE CORTE** ($i_c \cong 0$) : AS DUAS JUNÇÕES ESTÃO POLARIZADAS REVERSAMENTE; A CORRENTE DE COLETOR É PRATICAMENTE NULA – É COMO SE TRANSISTOR ESTIVESSE DESLIGADO DO CIRCUITO.
- **REGIÃO DE SATURAÇÃO** ($V_{CE} \cong 0$) : AS DUAS JUNÇÕES ESTÃO POLARIZADAS DIRETAMENTE, ONDE UMA PEQUENA VARIAÇÃO NA TENSÃO DE SAÍDA RESULTA NUMA GRANDE VARIAÇÃO DA CORRENTE DE SAÍDA; É COMO SE O TRANSISTOR ESTIVESSE EM CURTO-CIRCUITO.
- **REGIÃO ATIVA** (entre o corte e a saturação – i_b é linear) : REGIÃO CENTRAL DO GRÁFICO DE SAÍDA, ONDE AS CURVAS SÃO LINEARES.

Nesta configuração, a relação entre a corrente de saída e a de entrada é muito maior do que um, pois i_c é muito maior do que i_b . Sendo assim, nesta configuração temos um amplificador de corrente. Esta relação é chamada de beta (β) ou h_{FE} . Este ganho é variável por causa da inclinação das curvas, que varia para cada valor de i_b .

$$\beta = \frac{i_c}{i_b}$$

LIMITES DOS TRANSISTORES

- POTÊNCIA MÁXIMA DO COLETOR ($PC_{m\acute{a}x}$)
- TENSÃO MÁXIMA DO COLETOR ($VCE_{m\acute{a}x}$)
- CORRENTE MÁXIMA DO COLETOR ($ic_{m\acute{a}x}$)
- TENSÃO REVERSA MÁXIMA DAS JUNÇÕES

Estas limitações podem ser vistas na curva característica de saída :

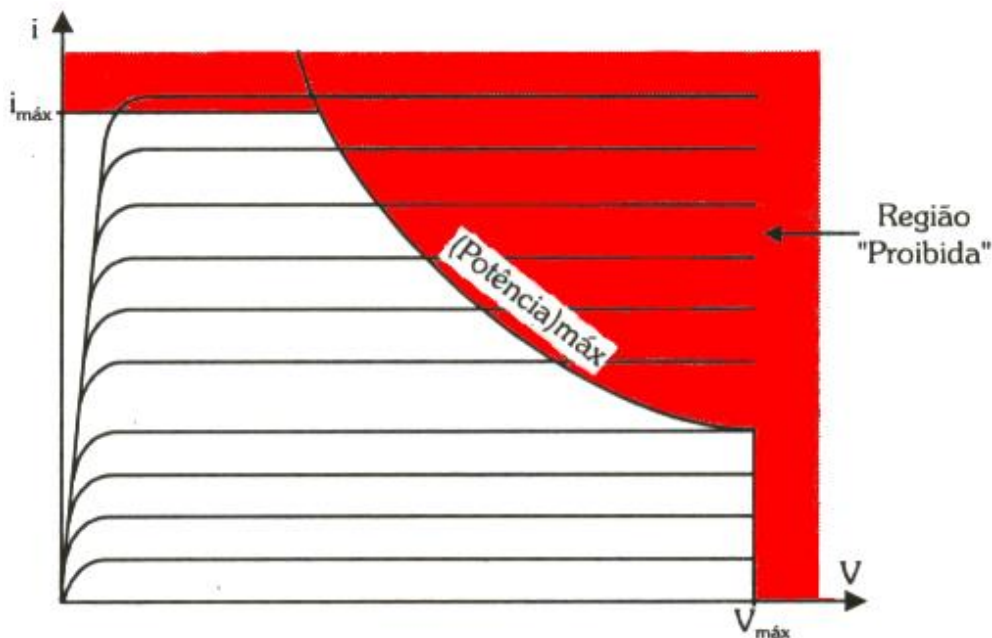


FIGURA 19: LIMITAÇÕES DO TRANSISTOR

$$PC_{m\acute{a}x} = VCE_{m\acute{a}x} \times ic_{m\acute{a}x}$$

(PARA EMISSOR COMUM)

POLARIZAÇÃO DOS TRANSISTORES

Dentro das curvas características, existem vários pontos onde o transistor pode funcionar nas regiões de trabalho:

- se o ponto de operação for na **região ativa**, o transistor pode funcionar como **amplificador** ;
- se o ponto de operação for na região de **saturação**, ou de **corte**, o transistor pode funcionar como uma **chave eletrônica** .

Para tanto, é necessário **fixar** o ponto de operação numa das regiões de trabalho do transistor. Esta fixação é feita em **corrente contínua**, através de **resistores**; a isto chamamos de **POLARIZAÇÃO**. O ponto de operação fixado é denominado PONTO QUIESCENTE (Q).

Circuito de polarização para configuração emissor comum

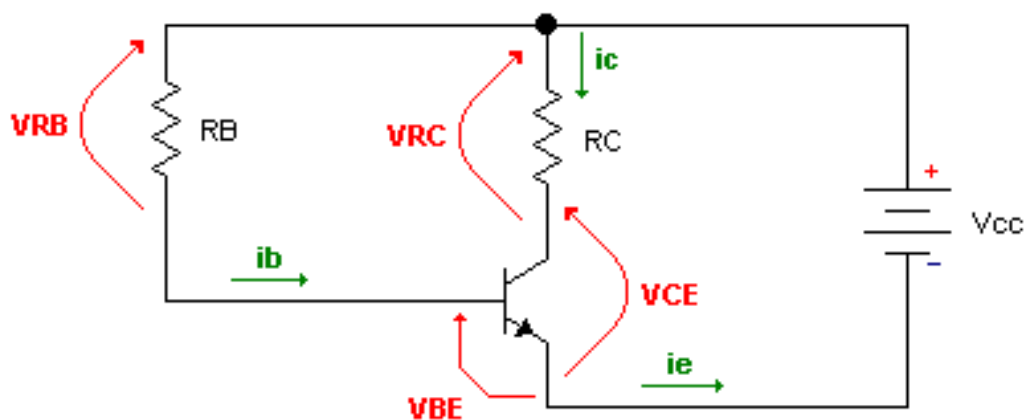


FIGURA 20: POLARIZAÇÃO EMISSOR COMUM

Para que o transistor em emissor comum funcione na região ativa, é necessário polarizar diretamente a junção base-emissor, e reversamente a junção base-coletor, como já foi exposto anteriormente.

Considerando que $R_B > R_C$, temos :

$$R_B = \frac{V_{RB}}{i_b}, \text{ sendo } V_{RB} = V_{cc} - V_{BE}$$

$$R_C = \frac{V_{RC}}{i_c}, \text{ sendo } V_{RC} = V_{cc} - V_{CE}$$

Onde também :

$$i_e = i_c + i_b$$

$$V_{BE} \cong 0,7V$$

Existe um problema no circuito acima : ele **não é estável, termicamente falando**. Devemos nos lembrar que os semicondutores são muito sensíveis às variações de temperatura, pois o aumento de temperatura pode gerar novas lacunas e elétrons livres. No caso dos transistores, os parâmetros mais influenciados são a tensão V_{BE} e o **ganho β** . Não precisamos nos preocupar com a tensão V_{BE} porque esta varia muito pouco com a temperatura; o fator preocupante é o ganho β , que, por exemplo, pode dobrar, triplicar ou quadruplicar (ou mais) para uma pequena variação de temperatura.

Este aumento de β provoca uma grande variação na corrente do coletor, sem que haja variação na corrente de base (V_{BE} é praticamente constante, e V_{cc} é fixo). O **aumento** de i_{cQ} provoca um **aumento** em V_{RC} , que por sua vez provoca uma **diminuição** em V_{CEQ} ($V_{cc} = V_{CE} + V_{RC}$, e V_{cc} é fixo). A **diminuição** de V_{CEQ} provoca um **novo aumento** em i_{cQ} , resultando numa instabilidade do circuito, a ponto de provocar a saturação no transistor. A isto chamamos de **realimentação positiva**, como mostra a figura a seguir :

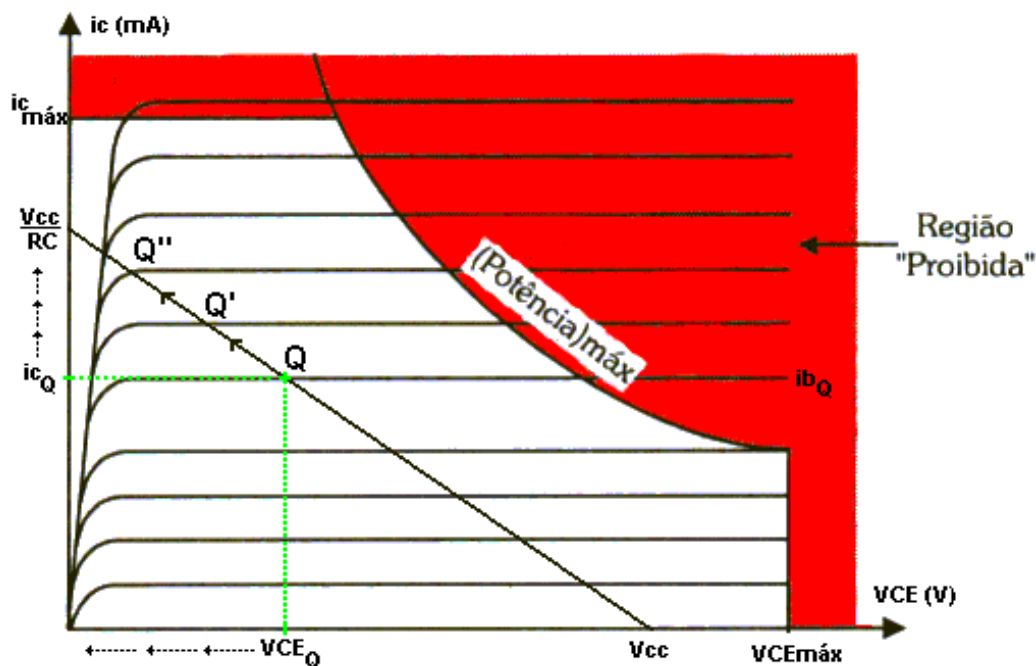


FIGURA 21: DESLOCAMENTO DO PONTO Q POR INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Para impedir a instabilidade do circuito, é necessário compensar o aumento de ic_Q ; para tanto, é necessária a inclusão de um resistor no emissor

Circuito de polarização para configuração emissor comum com corrente de emissor constante :

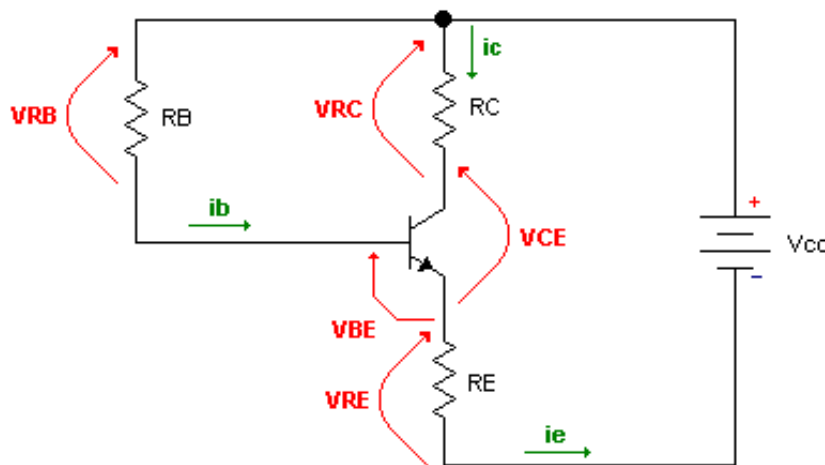


FIGURA 22: POLARIZAÇÃO EMISSOR COMUM

Com a colocação de RE , teremos a estabilidade do circuito, pois quando VRC aumenta, VRE também aumenta, (forçando a **diminuição** em VCE_Q), forçando uma **diminuição** em VRB , que por sua vez força uma **diminuição** em ib . A **diminuição** em ib força uma **diminuição** em ic , **compensando o aumento anterior**. A isto chamamos de **realimentação negativa**.

Então :

- REALIMENTAÇÃO POSITIVA : PROVOCA INSTABILIDADE NO CIRCUITO ;
- REALIMENTAÇÃO NEGATIVA : PROVOCA ESTABILIDADE NO CIRCUITO .

O último circuito de polarização que vamos ver é o mais utilizado para amplificadores de pequenos sinais:

Circuito de polarização para configuração emissor comum com divisor de tensão na base :

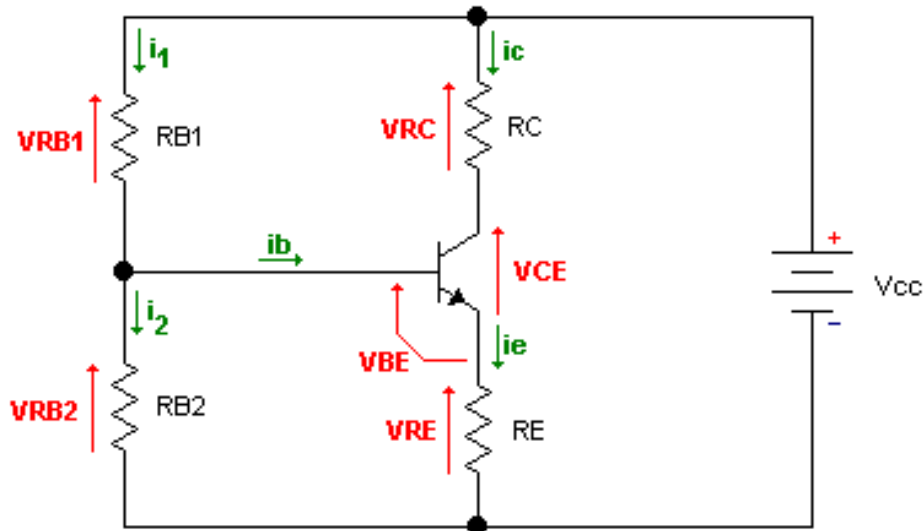


FIGURA 23: POLARIZAÇÃO EMISSOR COMUM

Onde :

$$RB2 = \frac{VRB2}{i_2}, \text{ sendo } VRB2 = VRE - VBE$$

$$RB1 = \frac{VRB1}{i_1}, \text{ sendo } VRB1 = Vcc - VRB2$$

$$RC = \frac{VRC}{ic}, \text{ sendo } VRC = Vcc - VCE - VRE$$

$$RE = \frac{VRE}{ie}, \text{ sendo } VRE = 0,1 \times Vcc$$

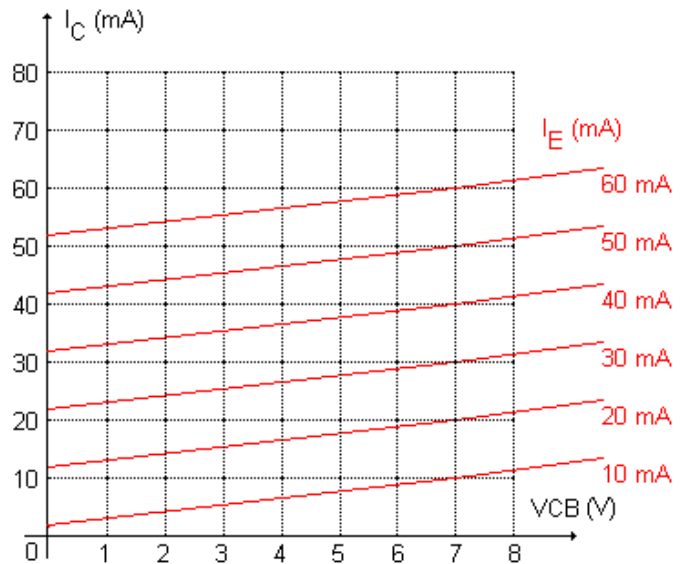
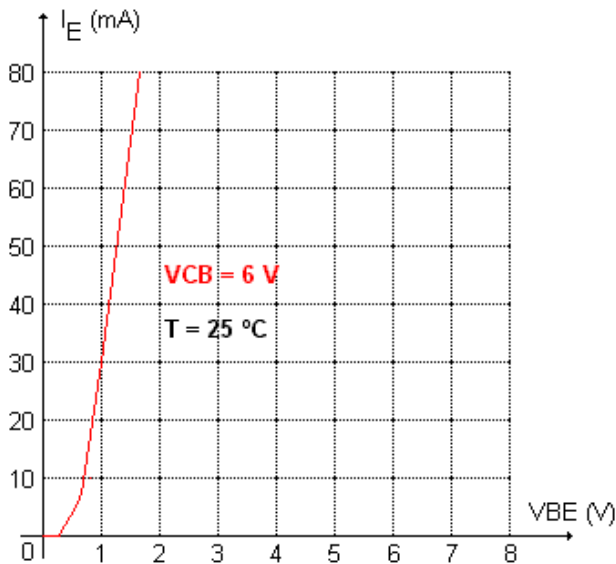
Devido a grande quantidade de incógnitas, vamos adotar :

$$VRE = (0,1 \times Vcc) ; VBE \cong 0,7V$$

$$i_2 = 10 \times ib, \text{ e se } \beta \geq 100, ie = ic$$

EXERCÍCIOS

Os exercícios 65 a 73 referem-se aos gráficos abaixo :



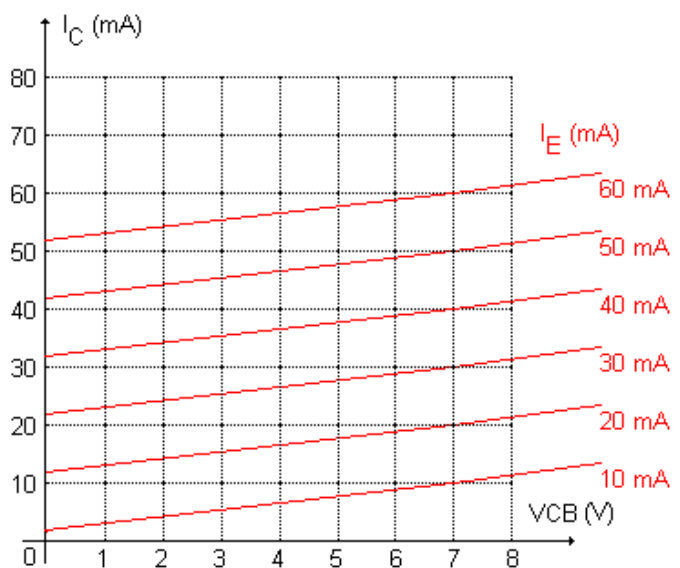
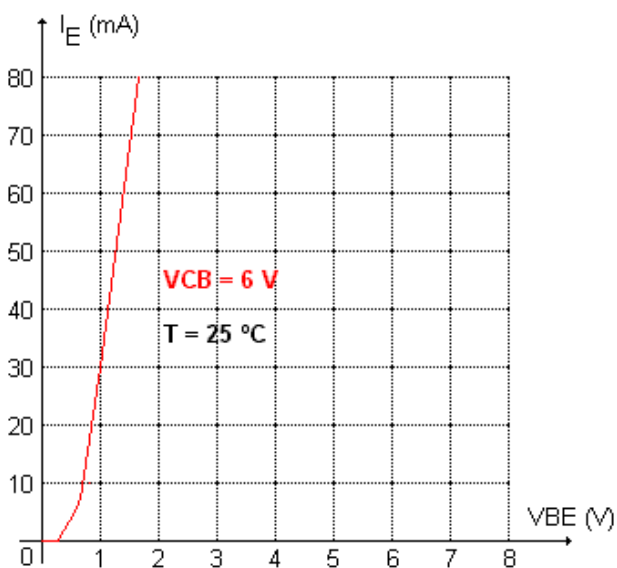
65. Sabendo-se que $V_{CB} = 6,0 \text{ V}$ e $V_{BE} = 0,8 \text{ V}$, quais são os valores de V_{CE} e I_E ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:



66. Mantendo-se as condições do exercício 1, quais são os valores de I_C e I_B ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

67. Ainda com relação às condições do exercício 1, qual o valor de β ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

68. Sabendo-se que $V_{CB} = 6,0 \text{ V}$ e $V_{CE} = 7,0 \text{ V}$, quais são os valores de V_{BE} e I_E ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

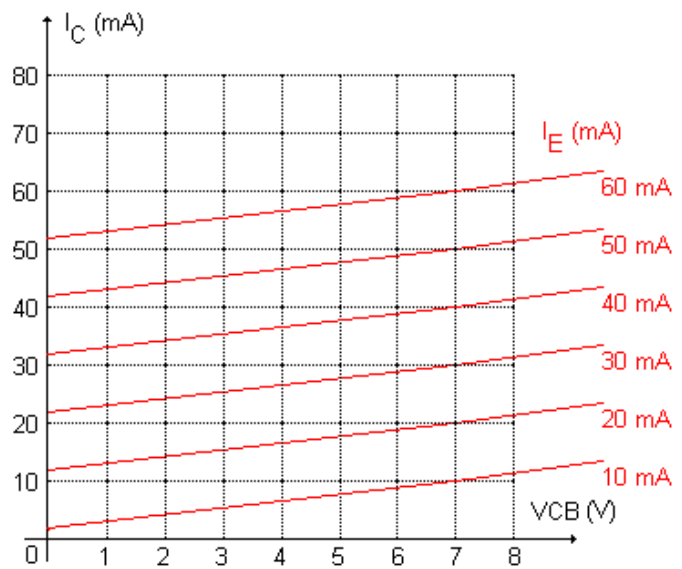
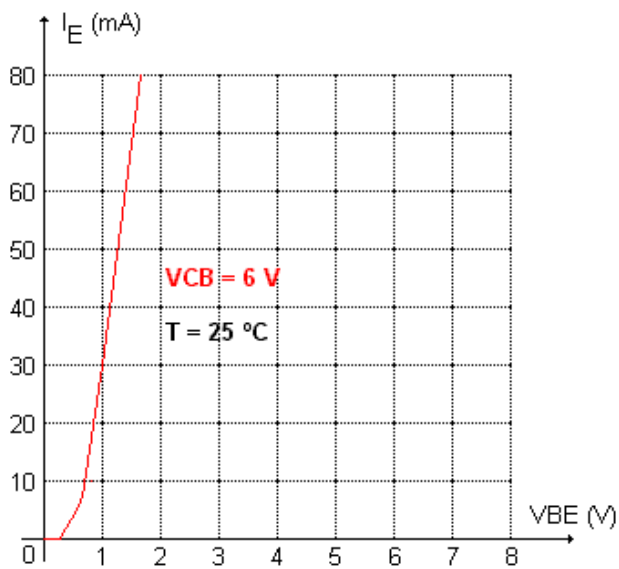
69. Mantendo-se as condições do exercício 68, quais são os valores de I_C e I_B ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:



70. Ainda com relação às condições do exercício 68, qual o valor de β ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

71. Sabendo-se que $V_{CB} = 6,0 \text{ V}$ e $I_E = 40 \text{ mA}$, quais são os valores de V_{BE} e V_{CE} ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

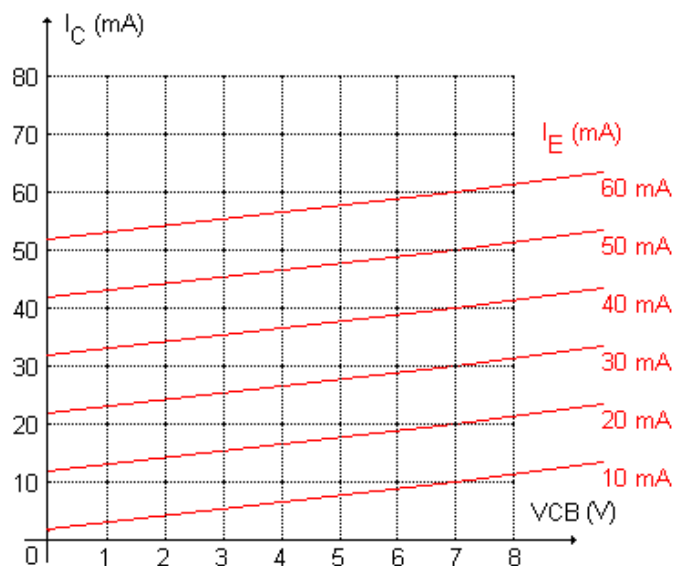
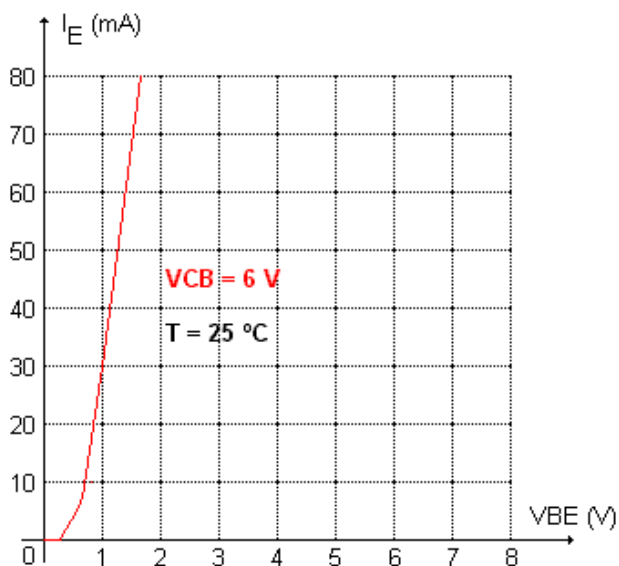
72. Mantendo-se as condições do exercício 71, quais são os valores de I_C e I_B ?

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:



73. Ainda com relação às condições do exercício 71, o valor de β será :

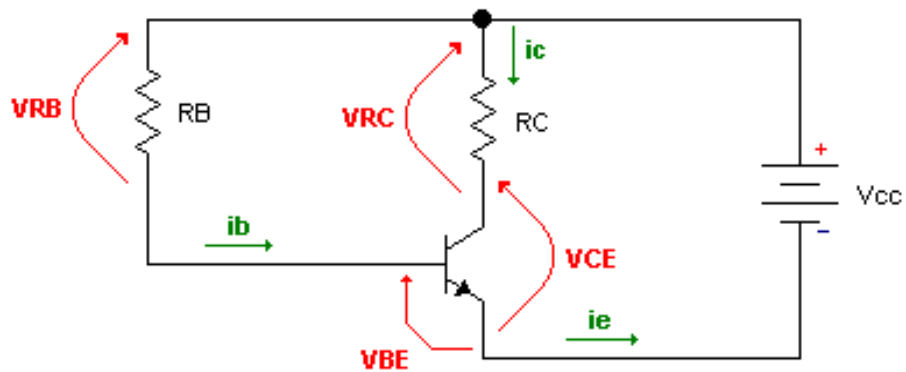
DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

74. No circuito abaixo, os valores de R_B e R_C serão :



$$V_{BE} = 0,7 \text{ V} \quad V_{CE} = V_{CC} / 2 \quad V_{CC} = 12 \text{ V} \quad I_C = 40 \text{ mA} \quad \text{e} \quad \beta = 200$$

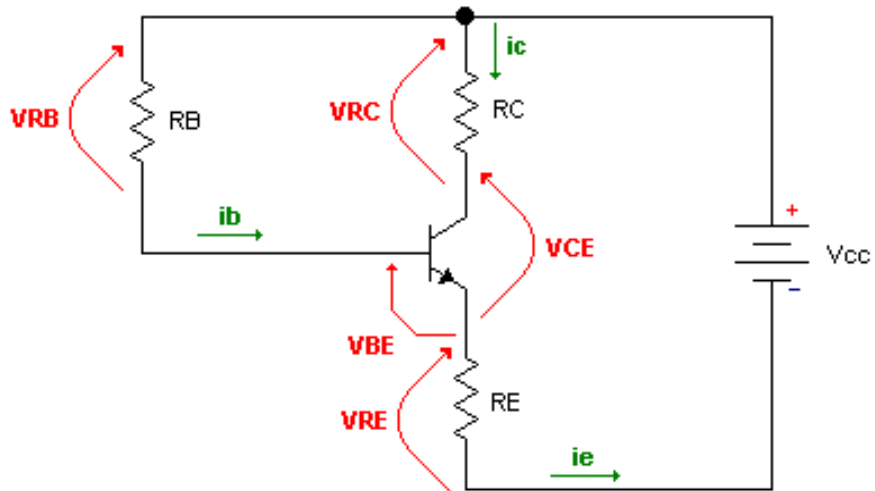
DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

75. No circuito abaixo, os valores de R_B , R_C e R_E serão :



$$V_{BE} = 0,7 \text{ V} \quad V_{CE} = V_{cc} / 2 \quad V_{cc} = 10 \text{ V} \quad V_{RE} = 0,1 \times V_{cc} \quad I_C = 50 \text{ mA} \quad \beta = 160$$

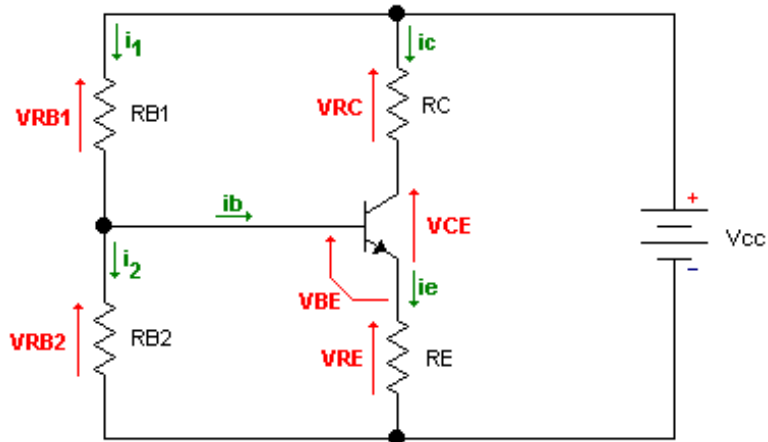
DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

Para os exercícios 76 a 78, considere o circuito e as condições abaixo :



$$V_{BE} = 0,7 \text{ V} ; V_{CE} = \frac{V_{CC}}{2} ; V_{RE} = 10\% \text{ de } V_{CC} ; i_2 = 10 \times I_B ; I_E = I_C \text{ (se } \beta \geq 100 \text{)}$$

76. Sabendo-se que $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $I_C = 20 \text{ mA}$ e $\beta = 200$, os valores dos resistores serão :

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

77. Sabendo-se que $V_{cc} = 15\text{ V}$, $I_C = 1\text{ A}$ e $\beta = 20$, os valores dos resistores serão :

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

78. Sabendo-se que $V_{cc} = 20\text{ V}$, $I_C = 50\text{ mA}$ e $\beta = 400$, os valores dos resistores serão :

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

RESOLUÇÃO:

APLICAÇÕES DO TRANSISTOR

TRANSISTOR COMO CHAVE

Como o transistor possui as regiões de trabalho de corte e de saturação, ele pode ser utilizado como chave :

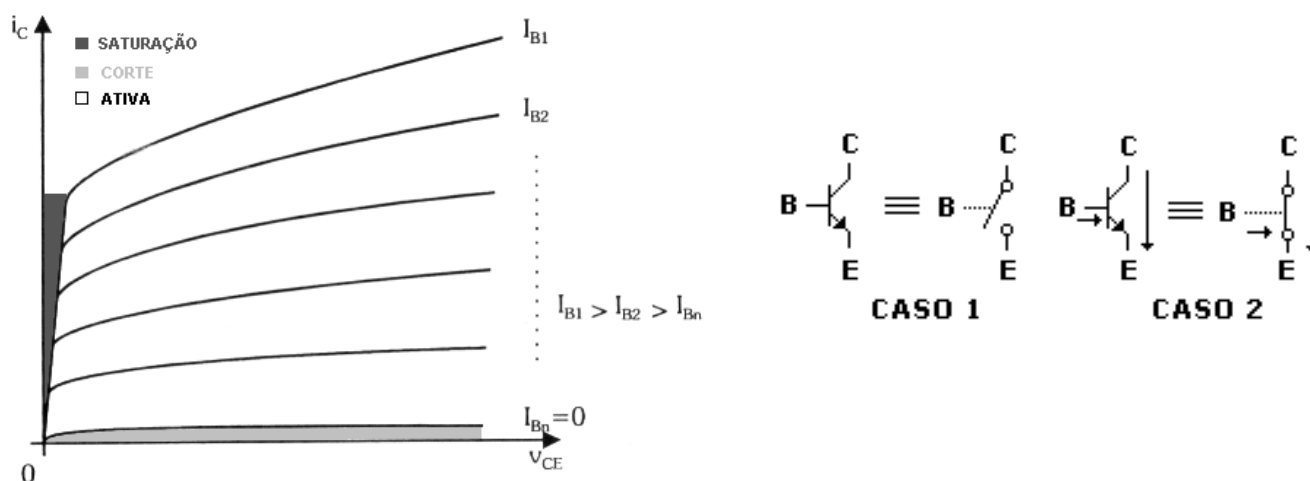


FIGURA 24: TRANSISTOR COMO CHAVE

Se o transistor não receber corrente elétrica na base (CASO 1), ele estará operando na região de corte; assim, associa-se o transistor cortado com uma chave aberta;

Se o transistor receber corrente elétrica na base (CASO 2) ele estará operando na região de corte (desde que os resistores de polarização possuam os valores adequados para tal) ; assim, associa-se o transistor cortado com uma chave fechada.

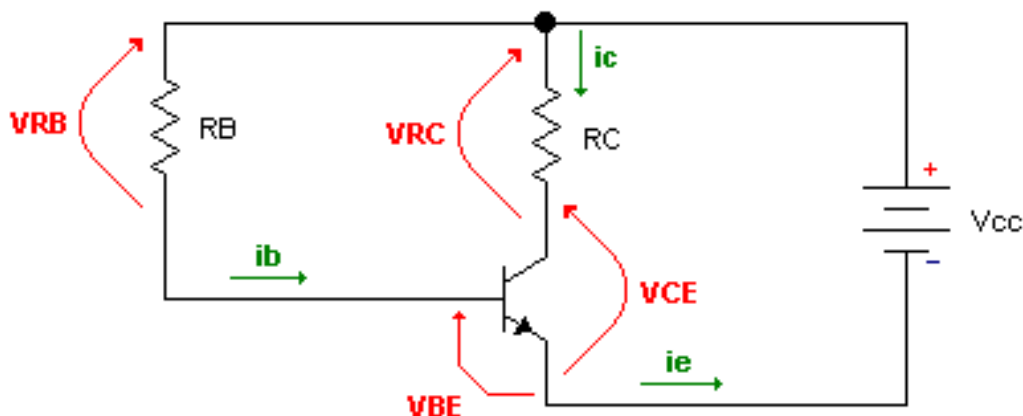


FIGURA 25: POLARIZAÇÃO TÍPICA DE UM TRANSISTOR OPERANDO COMO CHAVE

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{i_{B_{SAT}}}$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE_{SAT}}}{i_{C_{SAT}}}$$

Exemplos de Aplicação:

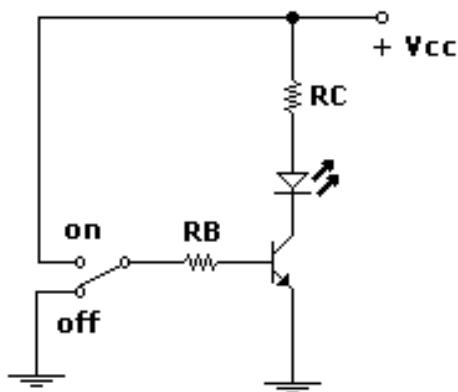


FIGURA 26: ACIONAMENTO DE UM LED

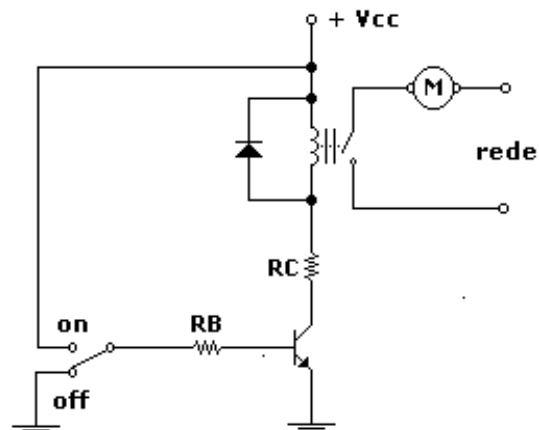


FIGURA 27: ACIONAMENTO DE UM MOTOR

TRANSISTOR COMO FONTE DE TENSÃO ESTABILIZADA

Observe o circuito abaixo :

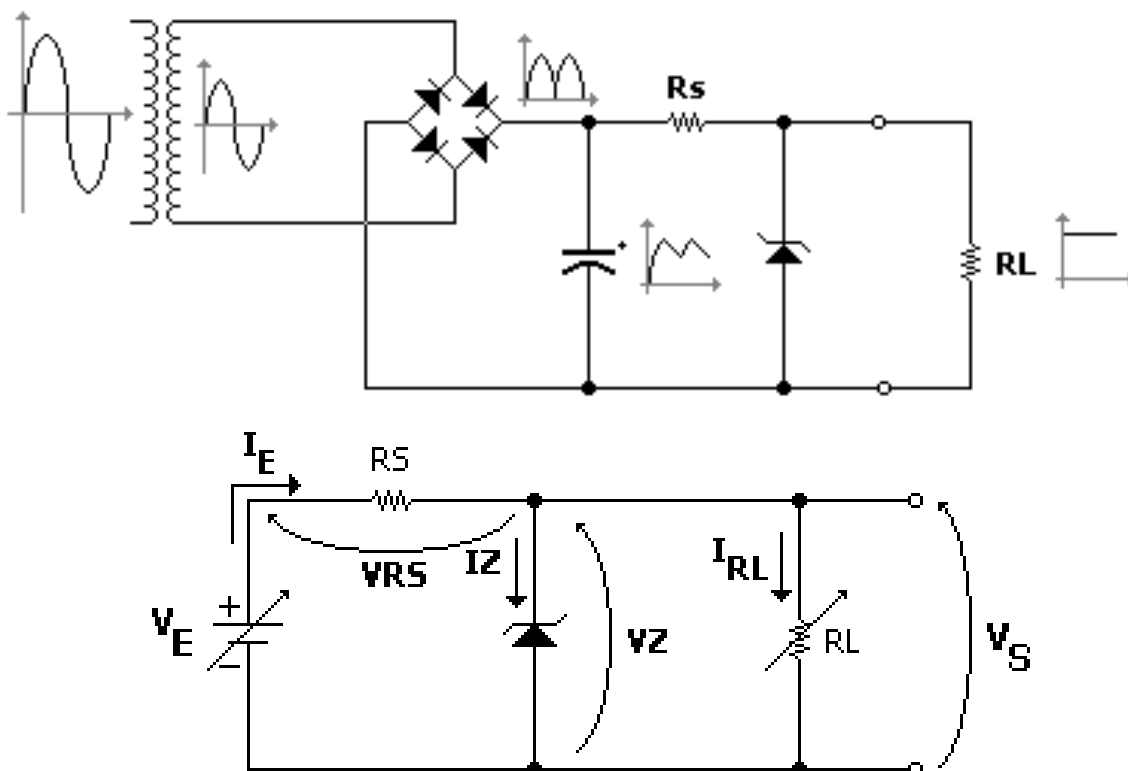


FIGURA 28: CIRCUITO REGULADOR DE TENSÃO

O circuito é um estabilizador de tensão, onde a carga (R_L) se encontra em paralelo com o zener. Isto se torna um problema no instante em que se deve escolher o modelo do diodo zener, uma vez que o mesmo está regulando diretamente a corrente da carga, não permitindo uma grande variedade de escolha de diodos. A solução para este problema é utilizar um circuito onde o zener controla indiretamente a corrente da carga; é aí que entra o transistor:

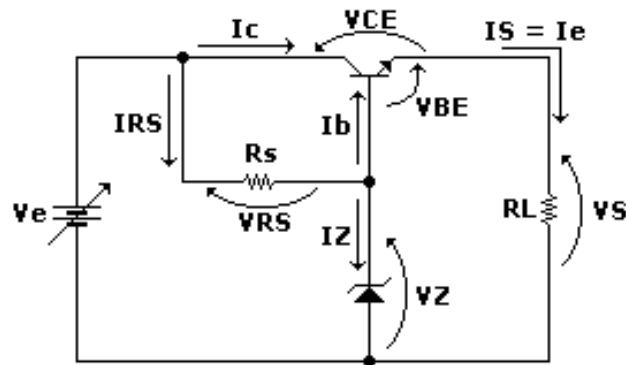


FIGURA 29: FONTE DE TENSÃO ESTABILIZADA

O circuito é um estabilizador de tensão, onde a carga não se encontra em paralelo com o zener, mas acha-se em série com o elemento de controle (o transistor). Ou seja, o diodo zener controla a corrente de base, de intensidade menor do que a corrente de carga, tornando a sua escolha mais fácil e ampla, e o transistor controla a corrente da carga.

Fórmulas a serem utilizadas no projeto de uma fonte de tensão :

- **TENSÃO DE ENTRADA (VE) :**

$$VE = VRS + VZ$$

- **TENSÃO DE SAÍDA (VS) :**

$$VS = VL + IS$$

- **RELAÇÃO PRÁTICA ENTRE VE E VS :**

$$VE = 1,5 \times VS$$

- **TENSÃO COLETOR-EMISSION (VCE) :**

$$VCE = VE - VS$$

- **TENSÃO ZENER (VZ) :**

$$VZ = VS - VBE$$

- **CORRENTE DO RESISTOR LIMITADOR (IRS) :**

$$IRS = IB + IZ$$

- **RESISTOR LIMITADOR (RS) :**

$$RS = \frac{VRS}{IRS} = \frac{VE - VZ}{IB + IZ}$$

Sendo assim, temos as seguintes limitações:

$$VE_{MIN} = (IB + IZ_{MIN}) \times RS + VZ$$

$$VE_{MIN} = VCE_{SAT} + VS$$

$$VE_{MIN} = VE - V_{ONDULAÇÃO}$$

$$V_{ONDULAÇÃO} = 0,1 \times VE$$

$$VE_{MÁX} = (IB + IZ_{MÁX}) \times RS + VZ$$

$$VE_{MÁX} = VCE_{MÁX} + VS$$

$$VE_{MÁX} = VE + V_{ONDULAÇÃO}$$

$$V_{ONDULAÇÃO} = 0,1 \times VE$$

$$PC_{MÁX} = VCE_{MÁX} \times IS$$

$$PC_{MÁX} = (VE_{MÁX} - VS) \times IS$$

$$IZ_{MÁX} = \frac{PZ_{MÁX}}{VZ}$$

Exemplo de aplicação :

Projetar uma fonte de tensão de 5 V, cuja corrente de saída deve ser de no máximo 100 mA sabendo-se que a tensão na rede é de 220 V / 60 Hz.

DADOS:

VS = 5 V
IS = 100 mA
f_{REDE} = 60 Hz

DETERMINAR:

Qual o transistor a ser utilizado?
Qual o diodo zener a ser utilizado ?
Qual o valor do resistor RS ?

Qual o valor do capacitor ?
Quais são os diodos retificadores ?
Qual o transformador a ser utilizado

• **ESCOLHA DO TRANSISTOR :**

Ao se consultar um manual de transistores, deve-se ter os seguintes valores para se escolher um :

$$IC_{MÁX} ; PC_{MÁX} ; VCB_O$$

$$IC_{MÁX} = IS$$

$$PC_{MÁX} = VCE_{MÁX} \times IS$$

$$VCB_O = VE_{MÁX}$$

$$VE = 1,5 \times VS \quad \Rightarrow \quad VE = 1,5 \times 5 \quad \Rightarrow \quad VE = 7,5 \text{ V}$$

$$V_{ONDULAÇÃO} = 0,1 \times VE \quad \Rightarrow \quad V_{ONDULAÇÃO} = 0,1 \times 7,5 \quad \Rightarrow \quad V_{OND} = 0,75 \text{ V}$$

$$VE_{MÁX} = VE + V_{ONDULAÇÃO} \quad \Rightarrow \quad VE_{MÁX} = 7,5 + 0,75 \quad \Rightarrow \quad VE_{MÁX} = 8,25 \text{ V}$$

$$VE_{MIN} = VE - V_{ONDULAÇÃO} \quad \Rightarrow \quad VE_{MIN} = 7,5 - 0,75 \quad \Rightarrow \quad VE_{MIN} = 6,75 \text{ V}$$

$$VCE_{MÁX} = VE_{MÁX} - VS \quad \Rightarrow \quad VCE_{MÁX} = 8,25 - 5 \quad \Rightarrow \quad VCE_{MÁX} = 3,25 \text{ V}$$

$$PC_{MÁX} = VCE_{MÁX} \times IS \quad \Rightarrow \quad PC_{MÁX} = 3,25 \times 0,1 \quad \Rightarrow \quad PC_{MÁX} = 325 \text{ mW}$$

$$IC_{MÁX} = IS \quad \Rightarrow \quad IC_{MÁX} = 100 \text{ mA}$$

Então :

$$I_{C_{MÁX}} = 100 \text{ mA} ; P_{C_{MÁX}} = 325 \text{ mW} ; V_{CB_O} = 8,25 \text{ V}$$

Devido a estes valores, ao se consultar o manual de transistores, escolhe-se o

$$\text{BD 137 } (\beta \cong 160 ; P_{C_{MÁX}} = 8 \text{ W})$$

• **ESCOLHA DO DIODO ZENER :**

Ao se consultar um manual de diodos, deve-se ter os seguintes valores para se escolher um zener:

$$V_Z ; P_{Z_{MÁX}} \text{ ou } I_{Z_{MÁX}}$$

$$V_Z = V_S + V_{BE} \qquad I_{Z_{MÁX}} = \frac{P_{Z_{MÁX}}}{V_Z}$$

$$V_Z = V_{BE} + V_S \Rightarrow V_Z = 0,7 + 5 \Rightarrow V_Z = 5,7 \text{ V}$$

Devido a este valor, ao se consultar um manual de diodos, opta-se pelo diodo zener

$$\text{1N 5232 B } (V_Z = 5,6 \text{ V} ; P_{Z_{MÁX}} = 500 \text{ mW})$$

$$I_{Z_{MÁX}} = \frac{P_{Z_{MÁX}}}{V_Z} \Rightarrow I_{Z_{MÁX}} = \frac{0,5}{5,6} \Rightarrow I_{Z_{MÁX}} = 89,29 \text{ mA}$$

$$I_{Z_{MIN}} = 0,1 \times I_{Z_{MÁX}} \Rightarrow I_{Z_{MIN}} = 8,29 \text{ mA}$$

• **ESCOLHA DO RESISTOR RS :**

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \Rightarrow I_B = \frac{0,1}{160} \Rightarrow I_B = 0,65 \text{ mA}$$

$$R_{S_{MIN}} = \frac{V_{E_{MÁX}} - V_Z}{I_B + I_{Z_{MÁX}}} \Rightarrow R_{S_{MIN}} = \frac{8,25 - 5}{0,65 \times 10^{-3} + 89,29 \times 10^{-3}} \Rightarrow R_{S_{MIN}} \cong 36,14 \Omega$$

$$R_{S_{MÁX}} = \frac{V_{E_{MIN}} - V_Z}{I_B + I_{Z_{MIN}}} \Rightarrow R_{S_{MÁX}} = \frac{6,75 - 5}{0,65 \times 10^{-3} + 8,929 \times 10^{-3}} \Rightarrow R_{S_{MÁX}} \cong 182,69 \Omega$$

$$R_{S_{MIN}} \leq R_S \leq R_{S_{MÁX}} \Rightarrow 36,14 \leq R_S \leq 182,69 \Rightarrow R_S = 150 \Omega$$

$$P_{RS} = \frac{(V_{E_{MÁX}} - V_Z)^2}{R_S} \Rightarrow P_{RS} = \frac{(8,25 - 5,6)^2}{150} \Rightarrow P_{RS} \cong 46,82 \text{ mW } (1/8 \text{ W})$$

$$R_S = 150 \Omega ; 1/8 \text{ W}$$

• **ESCOLHA DO CAPACITOR C:**

$$C = \frac{VS}{RL \times f \times V_{OND}} \rightarrow \frac{VS}{RL} = IS \quad \therefore C = \frac{IS}{f \times V_{OND}}$$

$$C = \frac{IS}{f \times V_{OND}} \quad \Rightarrow \quad C = \frac{0,1}{120 \times 0,75} \quad \Rightarrow \quad C \approx 1111,11 \mu F$$

Como $VE_{MÁX} = 8,25 V$, temos :

$$C = 1000 \mu F / 16 V$$

• **ESCOLHA DOS DIODOS RETIFICADORES :**

Levando-se em conta os valores de VE e IS , podemos escolher os diodos retificadores mais comuns:

$$1N 4001 (VR_{máx} = 100 V / ID_{máx} = 1A)$$

• **ESCOLHA DO TRANSFORMADOR :**

Tensão EFICAZ no secundário:

$$VE_{EFICAZ} = \frac{VE_{MÁX}}{\sqrt{2}} \quad \Rightarrow \quad VE_{EFICAZ} = \frac{8,25}{\sqrt{2}} \quad \Rightarrow \quad VE_{EFICAZ} \approx 5,83 V$$

Sendo assim :

$$TRANSFORMADOR : 220 V / 6 V$$

Então, nossa fonte de tensão fica assim :

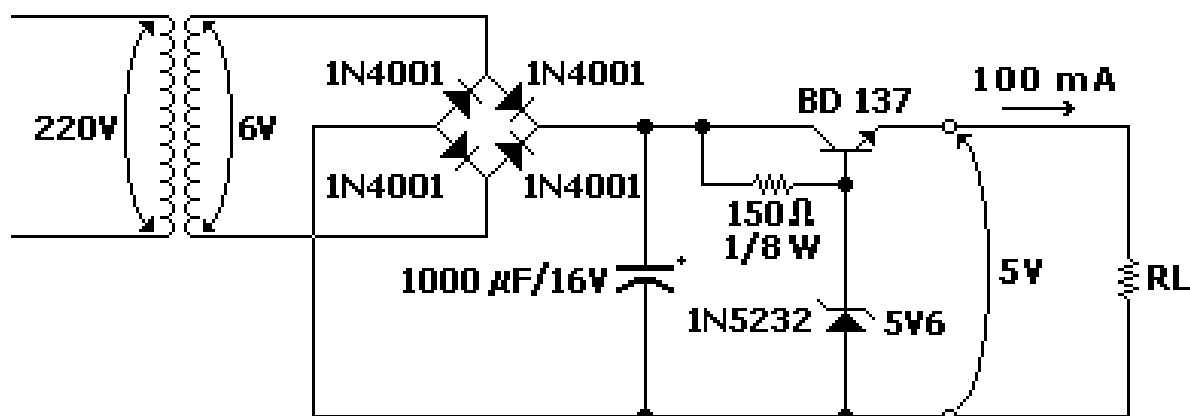
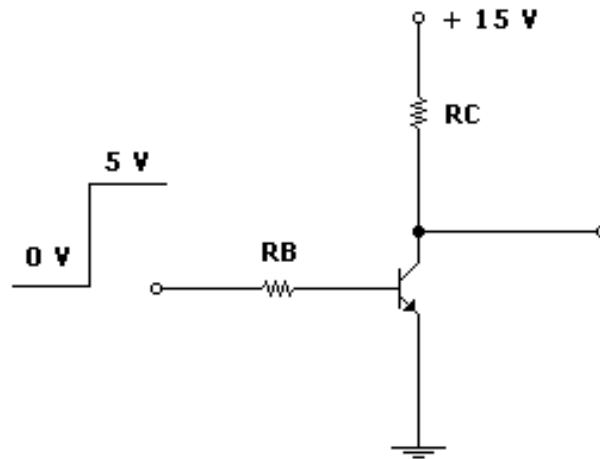


FIGURA 30: EXEMPLO DE UMA FONTE DE TENSÃO ESTABILIZADA

EXERCÍCIOS

OBSERVE O CIRCUITO ABAIXO E RESOLVA OS EXERCÍCIOS 79 E 80:



79. Calcule a corrente na base quando a tensão de entrada for de 5V, sabendo-se que $R_C = 1\text{ k}\Omega$ e $R_B = 3\text{ k}\Omega$.

DADOS

FÓRMULAS

CALCULAR

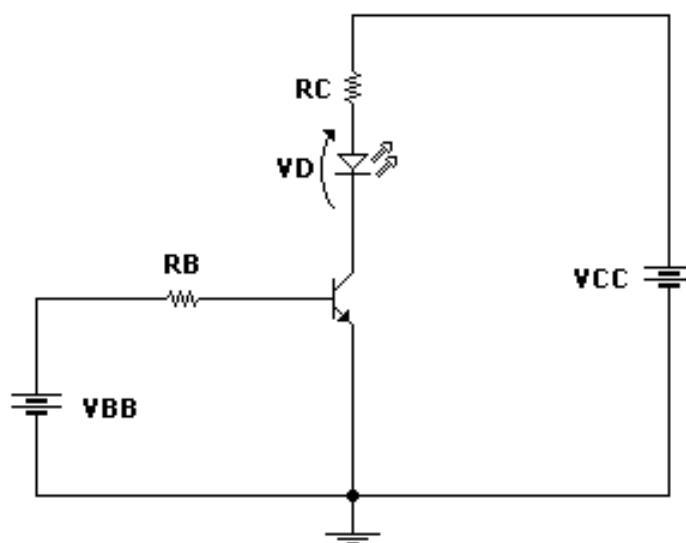
80. Imagine o transistor com um curto entre o coletor e o emissor; a tensão de saída cai idealmente a zero. Calcule, nestas condições, a corrente no coletor.

DADOS

FÓRMULAS

CALCULAR

81. No circuito a seguir, calcule a corrente no LED, sabendo-se que o transistor está saturado, e que $R_C = 1\text{ k}\Omega$; $R_B = 3\text{ k}\Omega$, $V_{BB} = 5\text{ V}$, $V_{CC} = 15\text{ V}$ e $V_D = 2\text{ V}$.

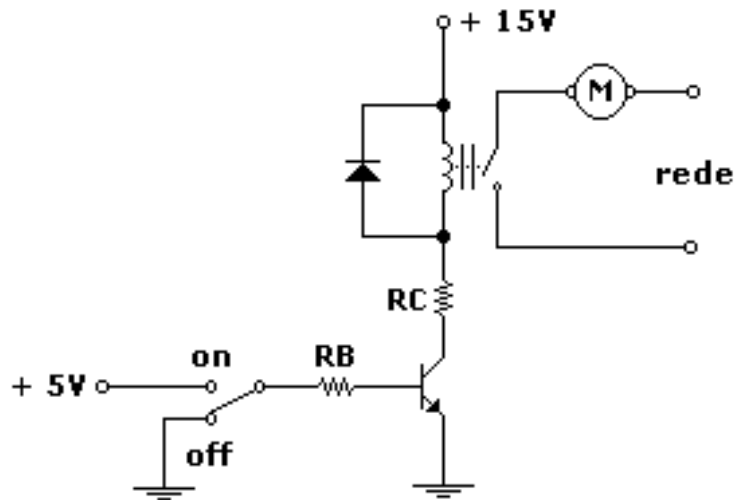


DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

82. Para acionar um motor 110 V / 60 Hz, podemos utilizar um transistor como chave, que atua sobre um relé, como mostrado abaixo :



Sabendo-se que o transistor, quando saturado, possui os seguintes valores : $V_{BE_{SAT}} = 0,7 \text{ V}$; $V_{CE_{SAT}} = 0,3 \text{ V}$; $\beta_{SAT} = 10$, e que o relé funciona a 12 V / 100 mA, determine os valores dos resistores R_C e R_B .

DADOS:

FÓRMULAS:

CALCULAR:

O TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR

Circuitos de polarização em emissor comum

Fontes de alimentação e resistores polarizam um transistor, isto é, eles estabelecem valores específicos de tensões e correntes nos seus terminais, determinando, portanto, um ponto de operação no modo ativo (o ponto de operação).

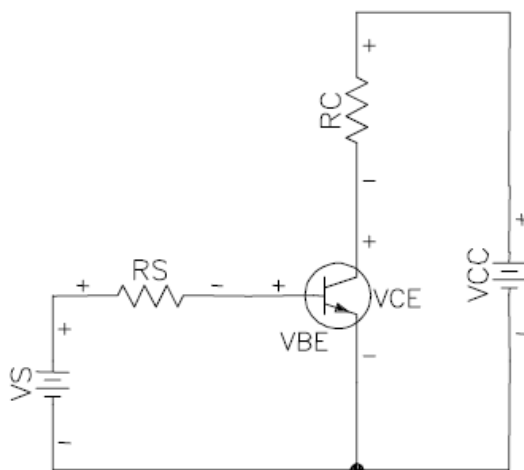


FIGURA 31: POLARIZAÇÃO POR BASE

A figura 31 mostra o circuito de polarização por base já estudado anteriormente, a principal desvantagem dele é a sua susceptibilidade à variação do β_{cc} . Em circuitos digitais, com o uso de $\beta_{cc(SAT)}$, isto não é problema. Mas em circuitos que trabalham na região ativa, o ponto de operação varia sensivelmente com o β_{cc} . Pois: $I_c = \beta_{cc} \times I_b$.

Polarização por divisor de tensão

O circuito mais usado em amplificadores é chamado de polarização por divisor de tensão. A Figura 32 mostra o circuito.

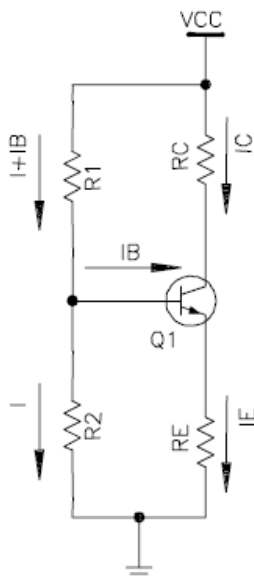


FIGURA 32: POLARIZAÇÃO POR DIVISOR DE TENSÃO

A principal evolução do circuito em relação à polarização por base é de fixar uma tensão na base, via os resistores R1 e R2. O valor de I deve ser bem maior que IB para a corrente IB não influenciar na tensão sob R2. Como regra prática, considerar a corrente I 20 vezes maior que IB.

Para a análise da tensão em VR2, observar que R1 e R2 formam um divisor de tensão. Supondo $I \gg I_B$:

$$V_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

* a tensão VR2 não depende de β_{CC}

Com o valor de VR2 é simples o cálculo de IE. Deve-se olhar a malha de entrada:

$$V_{R2} = V_{BE} + V_E$$

Como $V_E = I_E \times R_E$

$$I_E = \frac{V_{R2} - V_{BE}}{R_E}$$

Análise da malha de saída:

$$V_{CC} = R_C \times I_C + V_{CE} + R_E \times I_E$$

Considerando $I_E = I_C$:

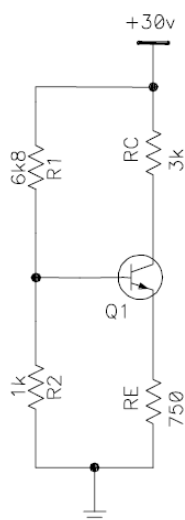
$$V_{CC} = I_C \times (R_C + R_E) + V_{CE}$$

Isolando I_C :

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E}$$

Notar que β_{CC} não aparece na fórmula para a corrente de coletor. Isto quer dizer que o circuito é imune a variações em β_{CC} , o que implica um ponto de operação estável. Por isso a polarização por divisor de tensão é amplamente utilizada.

Exemplo: Encontre o VB, VE, VCE e IE para o caso abaixo:



Resolução:

Cálculo de V_B

$$V_B = V_{R_2} = \frac{1K}{6K8 + 1K} 30 = 3,85V$$

Cálculo de I_E

$$I_E = \frac{3,85 - 0,7}{750} = 4,2mA$$

Cálculo de V_E

$$V_E = I_E R_E = 4,2 \times 10^{-3} \times 750 = 3,15V$$

Cálculo de V_{CE}

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \times (R_C + R_E) \rightarrow V_{CE} = 30 - 4,2 \times 10^{-3} \times (3 \times 10^3 + 750) = 14,3V$$

Regras de projeto

Sempre ao polarizar um transistor, deseja-se manter o ponto Q de operação fixo independente de outros parâmetros externos. ou seja, espera-se um divisor de tensão estabilizado.

Para minimizar o efeito do β_{CC} , considerar:

$$R_2 \leq 0,01 \beta_{CC} \times R_E$$

onde o valor de β_{CC} é o do pior caso, ou seja, o menor β_{CC} que o transistor pode ter.

O defeito desta regra é o fato de um baixo R_2 influenciar negativamente na impedância de entrada. Então como opção pode-se considerar:

$$R_2 \leq 0,1 \beta_{CC} \times R_E$$

assim R_2 será maior, mas com possibilidade de degradação na estabilidade do ponto Q.

Quando se segue a regra da equação $R_2 \leq 0,1 \beta_{CC} \times R_E$ designa-se o circuito de polarização por *divisor de tensão firme*.

Quando se segue a regra da equação $R_2 \leq 0,01 \beta_{CC} \times R_E$ é polarização por *divisor de tensão estabilizado*.

Na escolha do ponto de operação da curva $I_C \times V_{CE}$, deve-se dar preferência a um ponto central, isto é, $V_{CE} = 0,5 V_{CC}$ ou $I_C = 0,5 I_{C(SAT)}$. De forma que o sinal possa excursionar ao máximo tanto com o aumento de I_B quanto com a diminuição. Por último, aplicar a regra de V_E ser um decimo de V_{CC} .

$$V_E = 0,1 \times V_{CC}$$

Exemplo: Polarizar um transistor por divisão de tensão firme.

Dados:

$$V_{CC} = 10V,$$

$$I_C = 10mA$$

$$\beta_{CC} = 100$$

Resolução:

Cálculo de R_E

$$V_E = 0,1 V_{CC}$$

$$V_E = 0,1 * 10 = 1V$$

$$R_E = V_E / I_E \quad I_E = I_C \quad R_E = 1V / 10m = 100\Omega$$

cálculo de R_C

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} \quad V_{CE} = 0,5 V_{CC} \quad R_C = \frac{10 - 5}{10m} = 500\Omega$$

cálculo de R_2

$$R_2 \leq 0,1 \beta_{CC} R_E \quad R_2 \leq 0,1 * 100 * 100 = 1000 \quad R_2 = 1000\Omega$$

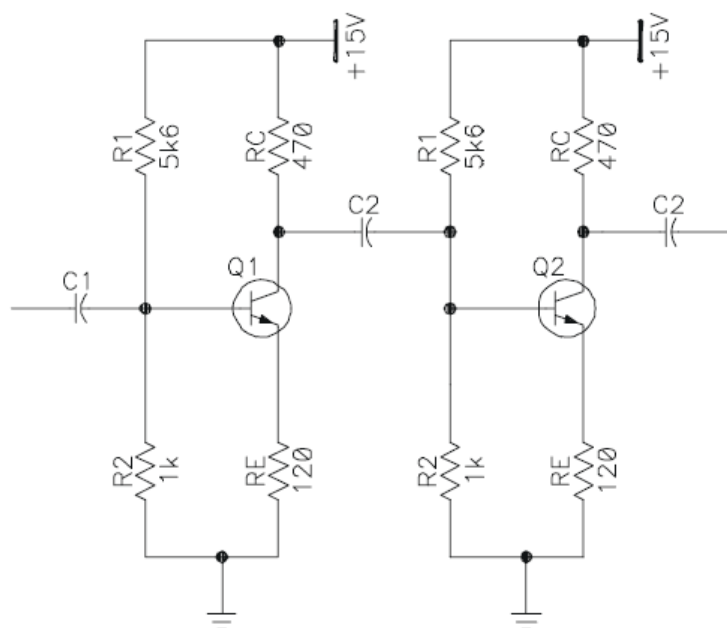
cálculo de R_1

$$V_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 1,0 + 0,7 = \frac{1000}{1000 + R_1} * 10$$

$$R_1 = 4888 = 4k7\Omega$$

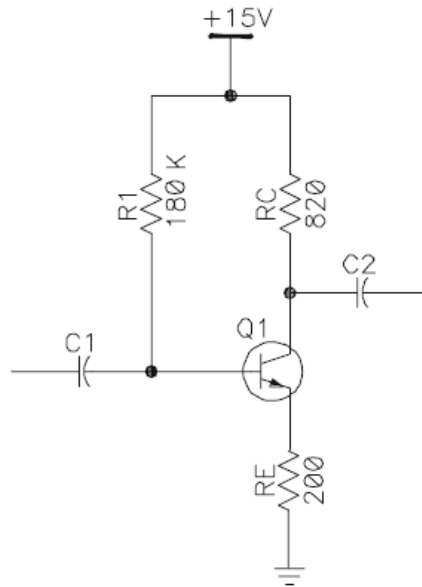
EXERCÍCIOS

83. No circuito da figura abaixo, encontre as tensões V_E e V_{CE} de cada estágio



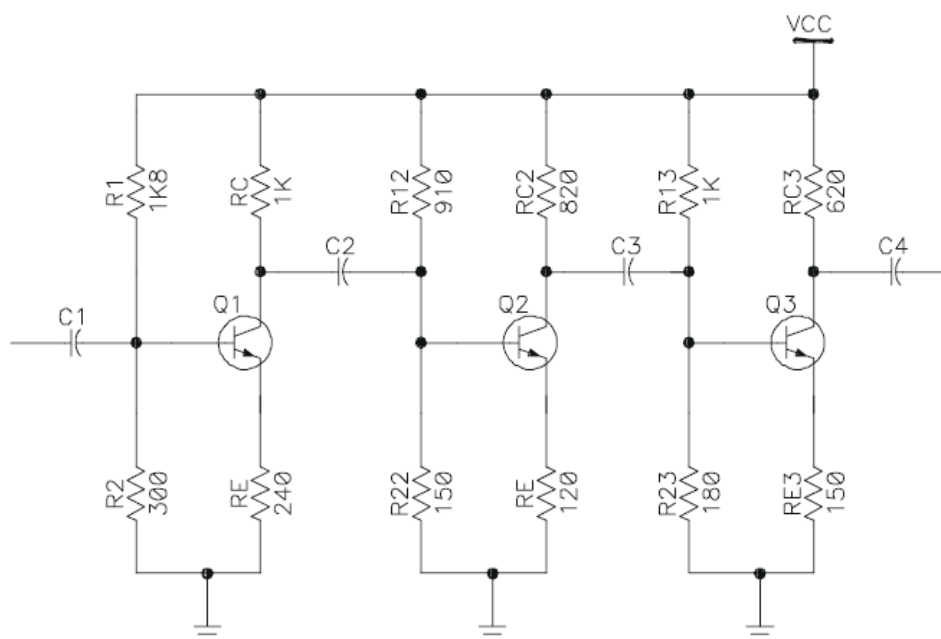
84. Projete um circuito de polarização por divisor de tensão com as seguintes especificações: $V_{CC} = 20V$, $I_C = 5mA$, $80 < \beta_{CC} < 400$. Considere $V_E = 0,1 V_{CC}$ e $V_{CE} = V_{CC} / 2$

85. O transistor da figura abaixo tem um $\beta_{cc}=80$.



- Qual a tensão entre o coletor e o terra?
- Desenhe a linha de carga.
- Para $\beta_{cc} = 125$, calcule a tensão na base, a tensão no emissor e a tensão de coletor.

86. Qual a tensão do emissor e do coletor (os dois em relação ao terra) para cada estágio do circuito abaixo, sendo $V_{CC} = 10V$.



87. No exercício anterior, suponha $V_{CC} = 20V$ e calcule de cada estágio: V_B , V_E , V_C e I_C .

INTRODUÇÃO AOS AMPLIFICADORES

Relembrando a conceituação de um transistor polarizado na configuração emissor comum, cujo ponto quiescente está no meio da região ativa, uma pequena variação na tensão V_{BE} provoca uma variação semelhante na corrente de base i_B . Esta variação faz com que a corrente de coletor i_C e a tensão V_{CE} também variem, acompanhando a mesma forma de onda de entrada, como mostra a curva característica de saída do transistor, apresentada na figura 33.

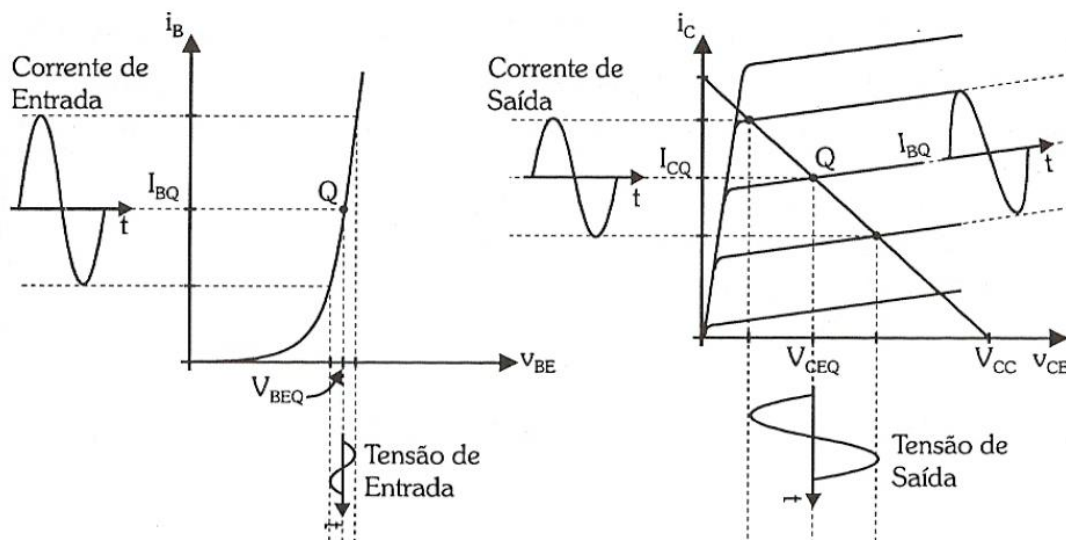


FIGURA 33: VARIAÇÕES DE TENSÃO E CORRENTE NO TRANSISTOR

A partir dessa análise inicial, será definida uma série de parâmetros importantes para a análise e o projeto de circuitos amplificadores.

Ganhos de Corrente, Tensão, Potência e Defasagem

Ganho de Corrente

Como a ordem de grandeza das variações da corrente de base é menor que a da corrente de coletor, observamos que a corrente de entrada foi amplificada de um fator A_i , denominado ganho de corrente:

$$A_i = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

Ganho de Tensão

Da mesma forma, como existe uma diferença na ordem de grandeza entre as tensões de entrada (V_{BE}) e saída (V_{CE}), observamos que a tensão de entrada foi amplificada de um fator A_v , denominado ganho de tensão:

$$A_v = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta V_{BE}}$$

No caso do ganho de tensão, para este circuito de referência, seu resultado é negativo, pois uma variação positiva na tensão de entrada causa uma variação negativa na tensão de saída. Isto significa que o amplificador defasa a saída em 180° .

Já o ganho de corrente tem um resultado positivo, significando que o amplificador mantém a corrente de saída em fase com a corrente de entrada, ou que a defasagem é nula. A figura 34 demonstra graficamente a relação de fase entre as correntes e tensões de entrada e saída de um transistor.

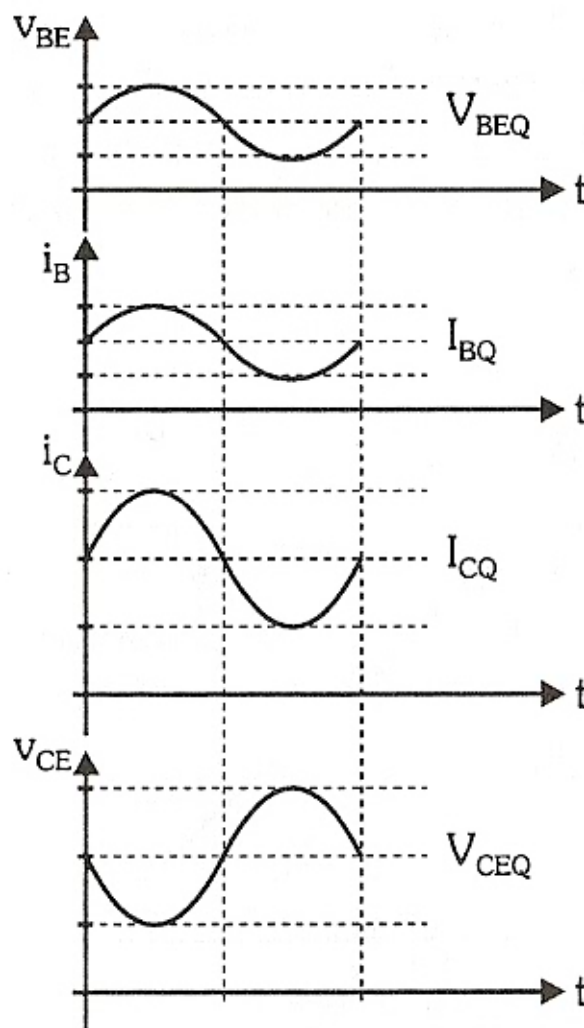


FIGURA 34: GRÁFICO DAS TENSÕES E CORRENTES DE ENTRADA E SAÍDA NO TRANSISTOR

Ganho de Potência

Os parâmetros ganho de tensão e ganho de corrente dão origem à esse parâmetro complementar, denominado ganho de potência, definido como:

$$A_p = |A_i \cdot A_v|$$

A_p é calculado em módulo, pois não faz sentido levar em conta um sinal negativo, já que este sinal só diz respeito à defasagem entre variações de entrada e saída. Substituindo as equações (1) e (2) em (3), obtemos:

$$A_p = \left| \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \cdot \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta V_{BE}} \right|$$

Um amplificador genérico pode ser representado pelo símbolo mostrado na figura 35, sendo A ganho de corrente, tensão ou potência, em função do parâmetro que se deseja enfatizar.

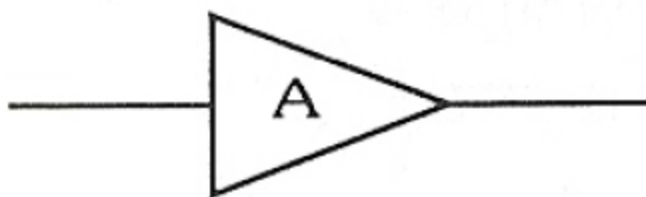


FIGURA 35: SÍMBOLO DE UM AMPLIFICADOR GENÉRICO

Capacitores de Acoplamento

Para operarem de forma linear como amplificadores, os transistores devem estar polarizados na região ativa, cujas tensões e correntes quiescentes são valores contínuos impostos por resistores e pela fonte de tensão contínua que alimenta o circuito.

Porém, se o sinal variável de entrada possuir também um nível DC, este soma-se à tensão V_{BEQ} que, por sua vez, provoca um aumento em I_{BQ} , que aumenta I_{CQ} e diminui V_{CEQ} , deslocando o ponto quiescente na reta de carga para próximo da região de saturação, como mostra a figura 36.

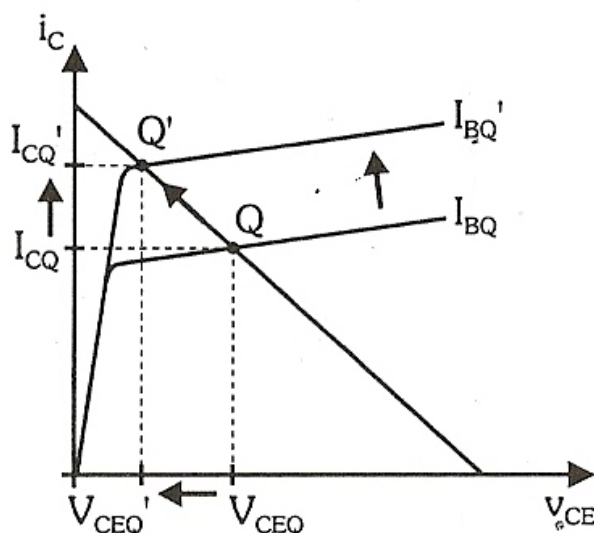


FIGURA 36: DISTORÇÃO CAUSADA POR UM NÍVEL DC (POSITIVO) PRESENTE NO SINAL DE ENTRADA

Com isso, o sinal de entrada, com um nível DC, distorce o sinal de saída, podendo levar o dispositivo à saturação, se o sinal DC de entrada for positivo, ou ao corte, se negativo.

Para evitar este problema, entre o circuito gerador do sinal de entrada e a entrada do amplificador, é colocado um capacitor de acoplamento de entrada AC, que bloqueia o nível DC, permitindo a passagem apenas da componente AC. Para isso, o capacitor deve ter um valor tal que represente uma baixa impedância para a frequência do sinal alternado, como mostra a figura 37.

Algo semelhante acontece quando a saída do amplificador é ligada à uma carga ou a outro circuito. É ligado na saída do amplificador um capacitor de acoplamento de saída AC, que evita que o nível DC do amplificador não interfira na carga ou no circuito de saída.

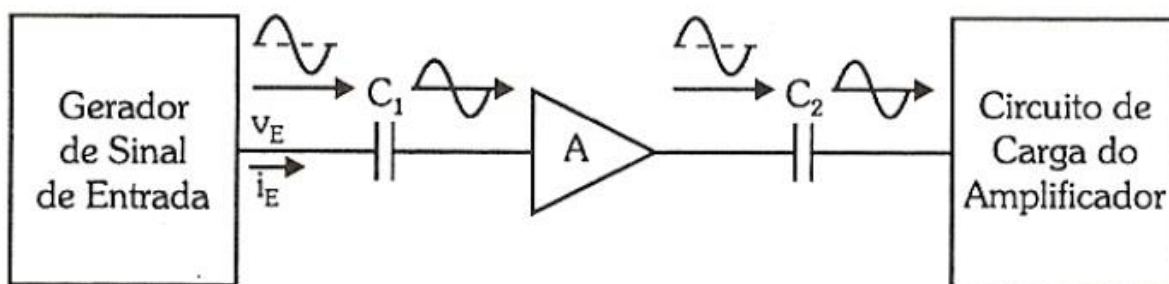


FIGURA 37: USO DE CAPACITORES DE ACOPLAMENTO NA ENTRADA E SAÍDA DE AMPLIFICADOR.

Amplificadores em Cascata

Dependendo do ganho desejado, um amplificador pode ser formado pela associação de vários amplificadores ligados em cascata, figura 38. Neste caso, os ganhos totais de corrente, tensão e potência são:

$$A_{Ti} = \frac{i_{Sn}}{i_{E1}} = A_{i1} \cdot A_{i2} \cdot A_{i3} \dots A_{in}$$

$$A_{Tv} = \frac{V_{Sn}}{V_{E1}} = A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3} \dots A_{vn}$$

$$A_{Tp} = |A_{Tv} \cdot A_{Ti}|$$

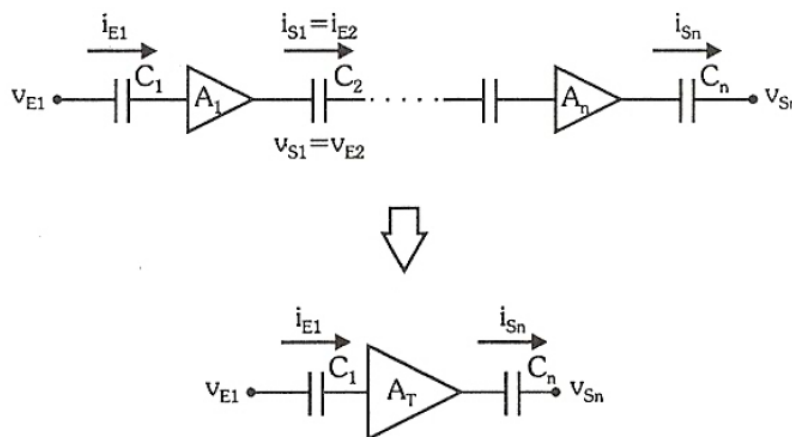


FIGURA 38: AMPLIFICADORES LIGADOS EM CASCATA

Impedância de Entrada e Saída

Considerando amplificadores em cascata, para máxima transferência de potência, é necessário que a impedância de saída de cada estágio amplificador seja igual à impedância de entrada do estágio amplificador seguinte.

Logo, a impedância de entrada Z_E e a impedância de saída Z_S são dois outros parâmetros importantes de um amplificador, sendo essa igualdade entre eles denominada casamento de impedâncias. A figura 39 mostra esse casamento de impedâncias, e estão representadas abaixo, as equações do cálculo de impedâncias de entrada e saída:

$$Z_E = \frac{\Delta V_E}{\Delta i_E}$$

$$Z_S = \frac{\Delta V_S}{\Delta i_S}$$

$$Z_{S(n-1)} = Z_{E(n)}$$

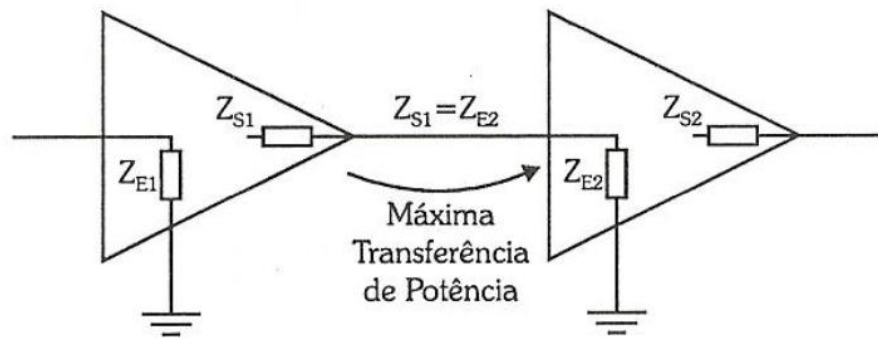


FIGURA 39: CASAMENTO DE IMPEDÂNCIAS

Curva de Resposta em Frequência

Em eletrônica, os sinais alternados podem ser classificados em várias categorias, de acordo com a sua faixa de frequência:

- | | |
|----------------------------------|------------------|
| (1) VLF (Very Low Frequencies) | – 3kHz a 30kHz |
| (2) LF (Low Frequencies) | – 30kHz a 300kHz |
| (3) MF (Medium Frequencies) | – 300kHz a 3MHz |
| (4) HF (High Frequencies) | – 3MHz a 30MHz |
| (5) UHF (Ultra High Frequencies) | – 300MHz a 3GHz |
| (6) SHF (Super High Frequencies) | – 3GHz a 30GHz |
| (7) EHF (Extra High Frequencies) | – 30GHz a 300GHz |

Assim, na prática, são necessários amplificadores para operarem nas mais diversas faixas de sinais elétricos, porém, os transistores em limitações que os impedem de trabalhar em todas as faixas, principalmente pelas capacitâncias parasitas que surgem em suas junções, além dos próprios capacitores de acoplamento utilizados nos circuitos amplificadores.

Desta limitação dos transistores, surge outro parâmetro importante, que deve ser levado em consideração no estudo dos amplificadores: é a curva de resposta em frequência, que corresponde à faixa de frequências que o amplificador opera com um nível mínimo de atenuação (inverso de ganho), sendo limitada por uma frequência de corte inferior f_{CI} e uma frequência de corte superior f_{CS} , como mostra a figura 40.

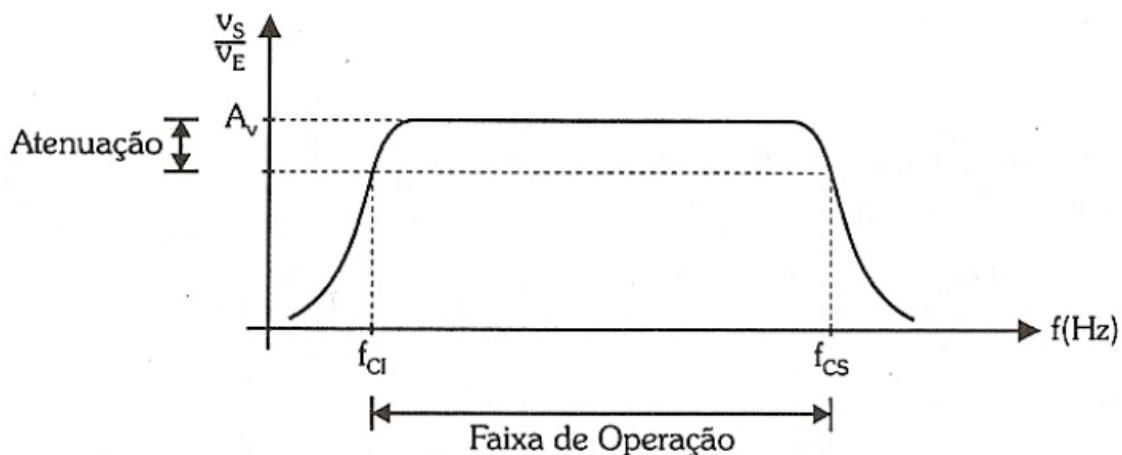


FIGURA 40: CURVA DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Decibel

Bel é a unidade que mede a relação entre grandezas de forma logarítmica e, para adequar a ordem de grandeza dessa unidade de medida aos fenômenos físicos, particularmente os elétricos, a unidade de medida mais prática é o decibel (dB), ficando a relação entre potências da seguinte forma:

$$A_p (db) = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

Está é, então, uma outra forma de apresentar o ganho de potência de um circuito amplificador, tomando-se como referência a potência em uma carga RL, como mostra a figura 41.

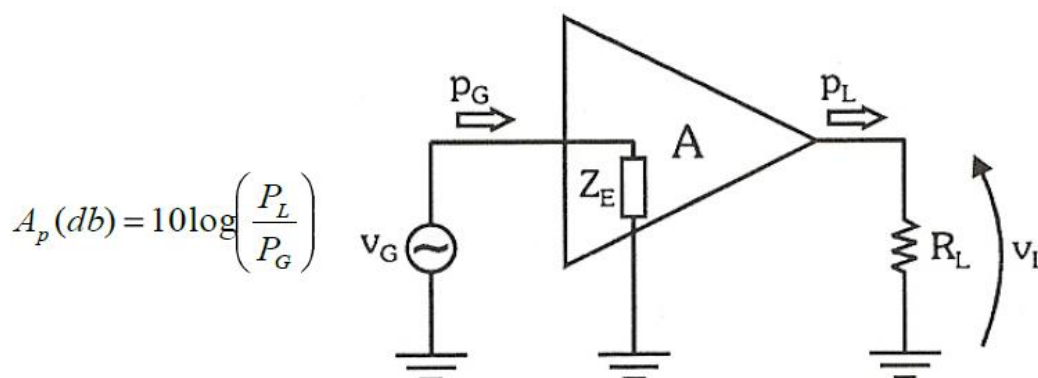


FIGURA 41: GANHO DE POTÊNCIA DE UM AMPLIFICADOR EM DB

Considerando também que $P = v^2/R$, temos as expressões de ganhos de potência e tensão em dB:

$$A_v = \frac{v_L}{v_G} \quad A_v (db) = 20 \log A_v$$

$$A_p = \frac{P_L}{P_G} \quad A_p (db) = 10 \log A_p$$

Podemos concluir que quando a potência dobra ou cai pela metade, as variações correspondentes são, respectivamente, +3dB e -3dB, e quando a potência é multiplicada ou dividida por dez, as variações correspondentes são +10dB e -10dB. Além disso, quando o ganho em dB é positivo, significa que houve amplificação, e quando é negativo, significa que houve atenuação.

No caso de amplificadores ligados em cascata, o cálculo do ganho total em dB é muito mais simples. Supondo, por exemplo, dois amplificadores com ganhos A_{v1} e A_{v2} , o ganho total é dado por:

$$A_{Tv} = A_{v1} \cdot A_{v2} \quad \text{ou} \quad A_{Tv} (dB) = A_{v1} (dB) + A_{v2} (dB)$$

Essas relações entre potências e suas respectivas variações em dB são muito utilizadas na prática, principalmente na parte de áudio amplificadores.

No caso da curva de resposta em frequência, considera-se como frequências de corte inferior e superior, aquela em que a potência de saída cai para sua metade, ou seja, sofre uma atenuação de 3dB. Isto significa que a curva de resposta toma a própria potência de saída como referência, porém o mais comum é representar a curva de resposta em frequência, tendo como referência a tensão de saída, sendo necessário,

portanto, determinar qual a correspondência entre a queda de tensão e a atenuação de 50% ou de 3dB na potência de saída.

Assim, na região plana da curva de resposta em frequência, tem-se como referência uma tensão de saída v_{LR} e uma potência de saída p_{LR} (tensão e potência de referências na carga).

Nas frequências de corte inferior e superior, como a potência de saída p_L cai à metade de p_{LR} , tem-se:

$$\frac{p_L}{p_{LR}} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{v_L^2 / R_L}{v_{LR}^2 / R_{LR}} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{v_L}{v_{LR}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cong 0,707$$

Isto significa que, quando a potência de saída cai pela metade, a tensão de saída cai para $v_L = 0,707 v_{LR}$, isto é, tem uma queda de -3dB.

A curva de resposta em frequência, assim representada, é denominada curva de resposta em frequência normalizada. A figura 42 mostra as várias possibilidades de se representar uma curva de resposta em frequência, tendo tensões ou ganhos de tensão em função da frequência do sinal.

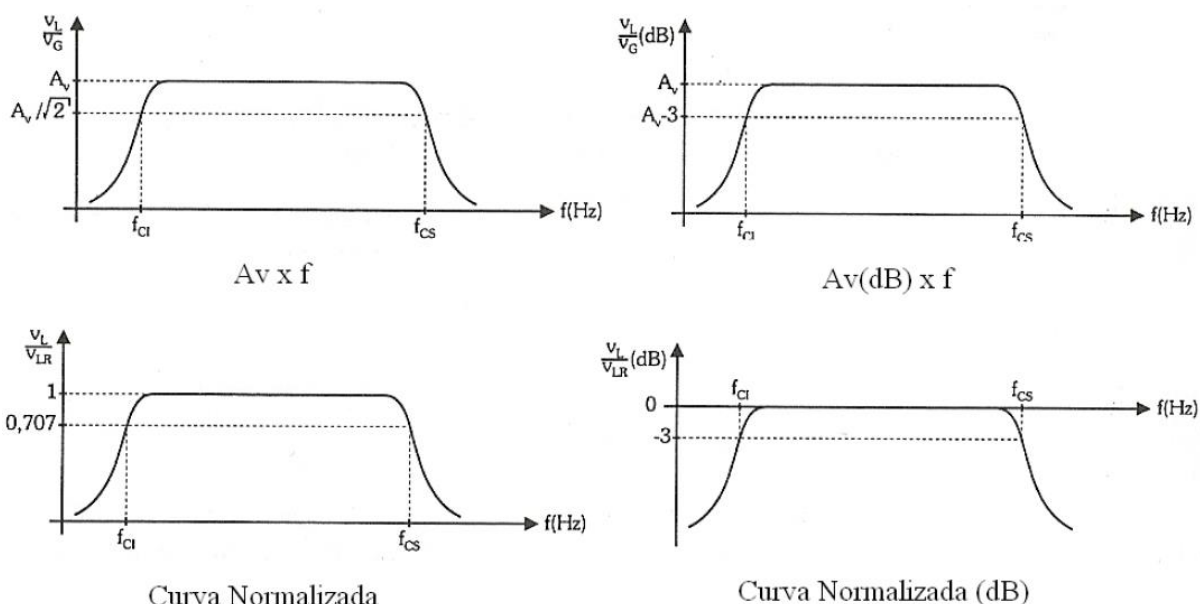


FIGURA 42: REPRESENTAÇÕES DA CURVA DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Tipos de Amplificadores

Classificação dos amplificadores de acordo com a amplitude:

- I. Amplificadores de pequeno sinal ou baixa potência, cujos sinais de entrada são da ordem de unidades de μV a dezenas de mV, ou correntes de coletor na ordem de unidades a centenas de mA., ou potências de coletor na ordem de mW. Podemos empregá-los como pré-amplificadores.
- II. Amplificadores de média potência, cujos sinais de entrada são da ordem de centenas de mV, ou correntes de coletor na ordem de centenas de mA a unidades de Ampère, ou potências de coletor na ordem de centenas de mW a unidades de Watt. Podem ser empregados como amplificadores intermediários.

- III. Amplificadores de potência, cujos sinais de entrada são da ordem de centenas de mV, ou correntes de coletor na ordem de unidades a dezenas de Ampère., ou potências de coletor na ordem de unidades a centenas de Watt. São empregados como amplificadores finais de potência.

De acordo com a frequência dos sinais:

- I. Amplificadores de baixa frequência: operam com frequências 0,1Hz a 30KHz.
- II. Amplificadores de média frequência: operam com frequência na faixa de LF.
- III. Amplificadores de alta frequência: operam acima da frequência de LF (sendo classificadas em VHF, UHF, microondas, etc).

Classes de Amplificadores de Potência

São quatro os tipos de amplificadores de potência: classe A, B, AB e C.

- I. Amplificador Classe A: o transistor está operando com ponto Q no meio da reta de carga, e o sinal faz com que o ponto Q oscile na região linear da curva do transistor. Neste caso temos a reprodução de 360° do sinal. Ótimo para AF de baixa ou média potência.
- II. Amplificador Classe B: é aquele que trabalha com o ponto Q próximo do ponto de corte. Aqui somente 180° do sinal é amplificado. Para AF, temos a necessidade de trabalhar com dois transistores, cada um reproduzindo 180° do sinal.
- III. Amplificador Classe AB: é aquele que trabalha com o ponto Q próximo do entre o centro da reta de carga e o ponto de corte. Aqui mais 180° do sinal é amplificado. Para AF, temos a necessidade de trabalhar com dois transistores, cada um reproduzindo 180° do sinal. Este tipo de polarização é empregado para que não ocorra a distorção cruzada típica dos amplificador classe B.
- I. Amplificador Classe C: Neste caso, o ponto Q está abaixo do corte, de tal forma que o transistor conduza menos de 180° do sinal. A classe C é empregada para amplificadores de RF.

AMPLIFICADORES DE SINAL

AMPLIFICADOR DE SINAL EMISSOR COMUM

Ao injetar um pequeno sinal ca à base do transistor, ele se somará a tensões cc de polarização e induzirá flutuações na corrente de coletor de mesma forma e frequência. Ele será chamado de amplificador linear (ou de alta-fidelidade - Hi-Fi) se não mudar a forma do sinal na saída. Desde que a amplitude do sinal de entrada seja pequena, o transistor usará somente uma pequena parte da reta de carga e a operação será linear. Por outro lado se o sinal de entrada for muito grande, as flutuações ao longo da reta de carga levarão o transistor à saturação e ao corte.

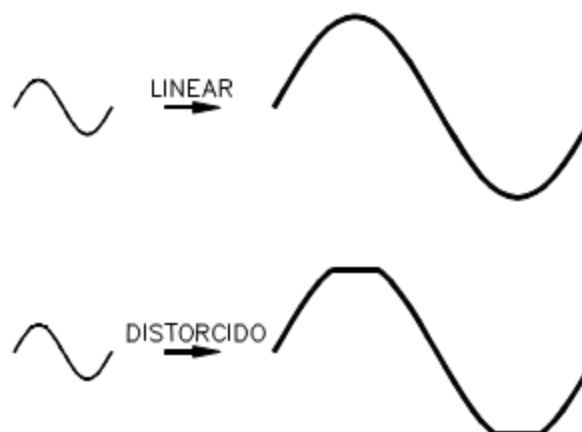


FIGURA 43: SINAL AMPLIFICADO

Um circuito amplificador é mostrado na Figura 44. A polarização é por divisor de tensão. A entrada do sinal é acoplada à base do transistor via o capacitor $C1$ e a saída do sinal é acoplada à carga RL através do capacitor $C2$. O capacitor funciona como uma chave aberta para corrente cc e como chave fechada para a corrente alternada. Esta ação permite obter um sinal ca de uma estágio para outro sem perturbar a polarização cc de cada estágio.

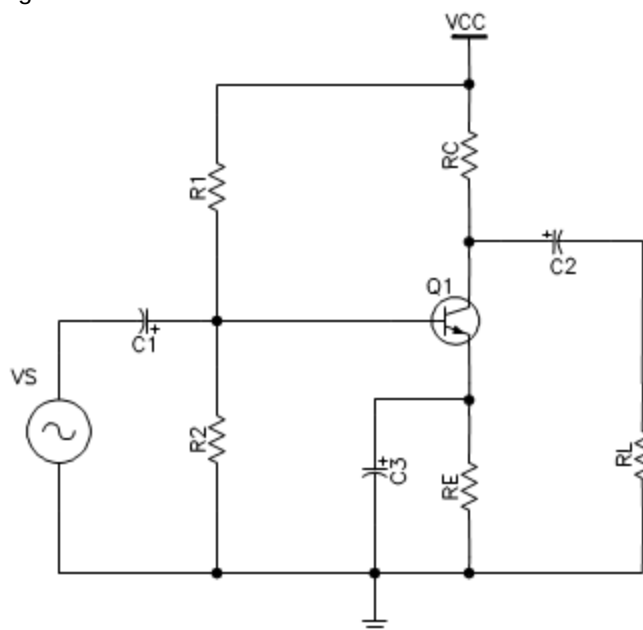


FIGURA 44: CIRCUITO AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM

Capacitor de acoplamento

O capacitor de acoplamento faz a passagem de um sinal *ca* de um ponto a outro, sem perda significativa do sinal. Por exemplo na Figura 45 a tensão *ca* no ponto A é transmitida ao ponto B. Para não haver atenuação apreciável do sinal, a capacitância reativa X_C , comparada com a resistência em série (R_{TH} e R_L), precisa ser bem menor.

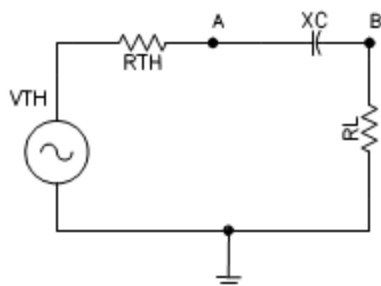


FIGURA 45: CAPACITOR DE ACOPLAMENTO

Quanto menor a reatância capacitiva, melhor será o acoplamento, naturalmente não é possível uma reatância nula. Se a reatância for no máximo 10% da resistência total tem-se um acoplamento estabilizado. A fórmula da reatância capacitiva é:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Na Eq. 4-1, há duas incógnitas, a frequência e a capacitância. Num amplificador existe uma faixa de frequências de operação, a escolha deve recair para o pior caso, ou seja, a menor frequência do sinal. A resistência total (R) é a soma de R_L e R_{TH} . Para um acoplamento estabilizado $X_C \leq 0,1R$ então a capacitância será:

$$C \geq \frac{1}{0,2\pi f_{MENOR} R}$$

Capacitor de desvio

Um capacitor de desvio é semelhante a um capacitor de acoplamento, exceto que ele acopla um ponto qualquer a um ponto aterrado, como mostra a Figura 46.

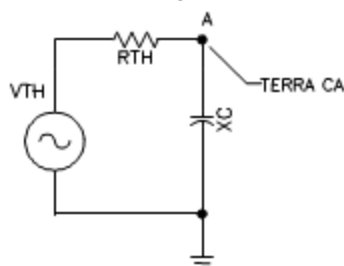


FIGURA 46: CAPACITOR DE DESVIO

O capacitor funciona idealmente como um curto para um sinal *ca*. O ponto A está em curto com o terra no que se refere ao sinal *ca*. O ponto A designado de *terra ca*. Um capacitor de desvio não perturba a tensão *cc* no ponto A porque ele fica aberto para corrente *cc*.

O capacitor C_3 da Figura 44 é um exemplo de capacitor de desvio. A sua função no circuito é a de aterrar o emissor para sinais *ca* e não interferir na polarização *cc*. A menos que se diga o contrário, todos os capacitores de acoplamento e desvio são considerados estabilizados e segue a regra $X_C \leq 0,1R$.

Teorema da superposição para amplificadores

Num amplificador transistorizado, a fonte *cc* estabelece correntes e tensões quiescentes. A fonte *ca* produz então, flutuações nessas correntes e tensões. O jeito mais simples de análise do circuito é dividindo a análise em duas partes: uma análise *cc* e uma análise *ca*.

Em outras palavras, aplica-se o teorema da superposição. O teorema da superposição diz que se pode calcular os efeitos produzidos no diversos pontos de um circuito para cada fonte de alimentação funcionando sozinha. O efeito total será a soma de cada efeito individual.

Circuitos equivalentes CA e CC.

O circuito da Figura 44 tem duas fontes de alimentação (V_{CC} e V_S). Cria-se o circuito devido a fonte *cc* denominado *equivalente cc*. E depois o circuito devido a fonte *ca* denominado *equivalente ca*.

Equivalente CC

Análise do circuito considerando a fonte V_{CC} e desprezando a fonte V_S . Somente correntes *cc* atuam neste caso e, portanto, os capacitores são desprezados. Sequência:

- ✓ Reduzir a fonte *ca* a zero (considerar a fonte V_S em curto).
- ✓ Abrir todos os capacitores.

A Figura 47 mostra o circuito equivalente *cc*.

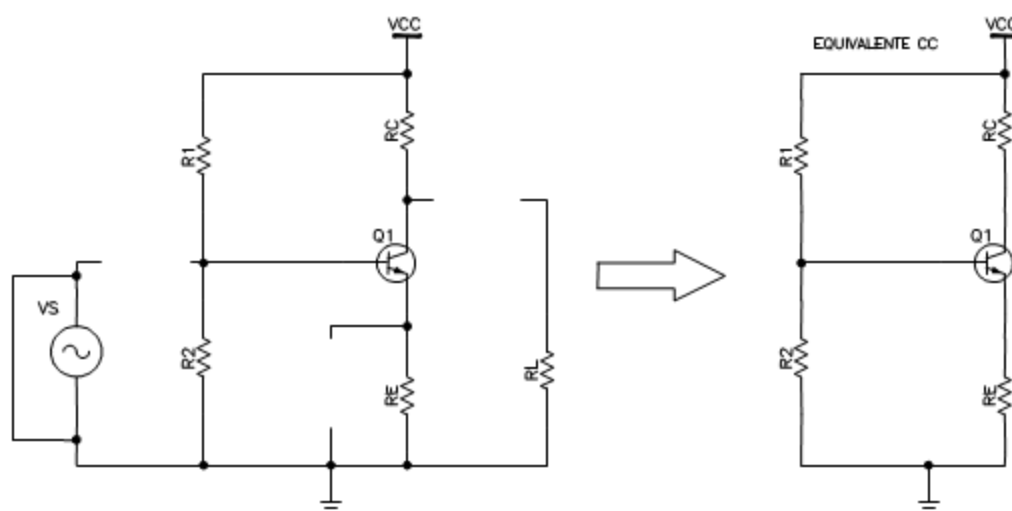


FIGURA 47: EQUIVALENTE CC DE UM AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM

Equivalente CA

Análise do circuito considerando a fonte V_S e desprezando a fonte V_{CC} . Somente correntes *ca* atuam neste caso e, portanto, os capacitores são considerados em curto. Sequência:

- ✓ Reduzir a fonte *cc* a zero (considerar a fonte V_{CC} em curto).
- ✓ Todos os capacitores em curto.

A Figura 48 mostra o circuito equivalente *ca*.

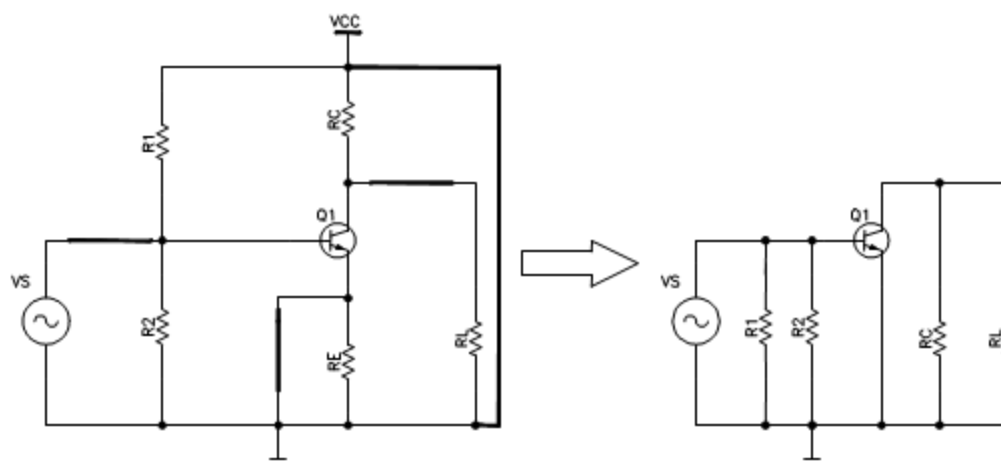


FIGURA 48: EQUIVALENTE CA DE UM AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM

A corrente total em qualquer ramo é a soma das correntes cc e ca. Igualmente a tensão total em qualquer ponto é soma das tensões cc e ca.

Resistência CA do diodo emissor

Ao polarizar corretamente o transistor, o modelo Ebers-Moll é uma alternativa boa e simples de representação do transistor. Até agora, o V_{BE} foi aproximado para 0,7V. O modelo continua válido para pequenos sinais alternados, com uma alteração no diodo emissor.

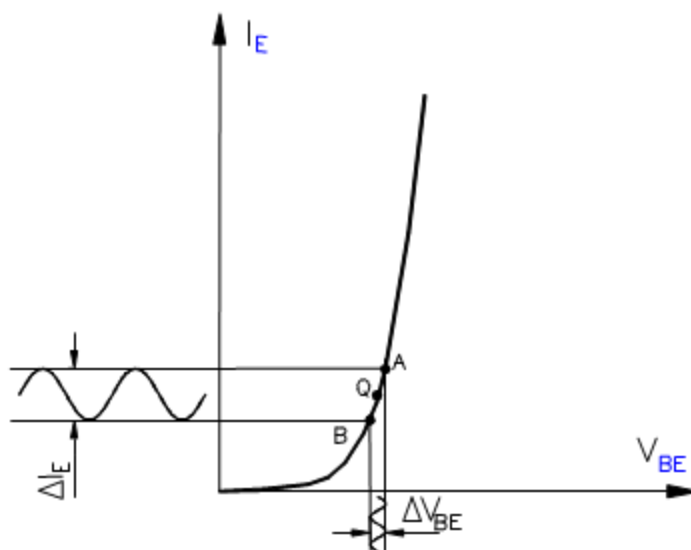


FIGURA 49: CURVA DO DIODO RELACIONANDO I_E E V_{BE}

A Figura 49 mostra a curva do diodo relacionando I_E e V_{BE} . Na ausência de um sinal ca o transistor funciona no ponto Q, geralmente localizado no meio da linha de carga cc. Quando um sinal ca aciona o transistor, entretanto, a corrente e a tensão do emissor variam. Se o sinal for pequeno, o ponto de funcionamento oscilará senoidalmente de Q a pico positivo de corrente em A e, a seguir, para um pico negativo em B, e de volta para Q, onde o ciclo se repete.

Um sinal é considerado pequeno quando a oscilação de pico a pico na corrente do emissor (i_e) for menor do que 10% do valor da corrente quiescente do emissor (I_E). Se o sinal for pequeno, os picos A e B serão próximos de Q, e o funcionamento é aproximadamente linear. O arco A e B é quase uma linha reta. Logo, o diodo emissor para pequenos sinais ca se apresenta como uma resistência, chamada de *resistência ca do emissor* e pela lei de Ohm:

$$r'_e = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_E}$$

Onde:

r'_e = resistência ca do emissor

ΔV_{BE} pequena variação na tensão de base-emissor

ΔI_E variação correspondente na corrente do emissor.

ΔV_{BE} e ΔI_E , na verdade são, respectivamente, uma tensão e uma corrente alternada. Rescrevendo:

$$r'_e = \frac{V_{be}}{i_e}$$

v_{be} = tensão ca através dos terminais da base-emissor

i_e = corrente ca através do emissor.

A Figura 50 mostra o modelo ca Ebers-Moll. Neste modelo, o diodo base-emissor é substituído pela resistência ca do emissor.

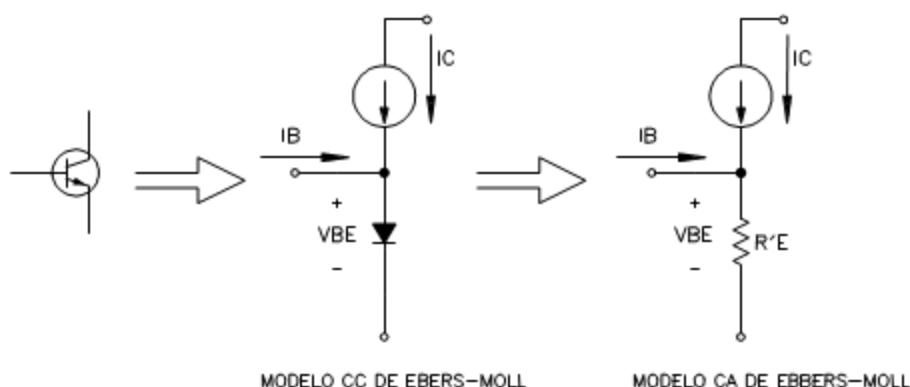


FIGURA 50: MODELO CC E CA EBERS-MOLL

Outra maneira de se conseguir o valor de r'_e é através da seguinte fórmula:

$$r'_e = \frac{25mV}{I_E}$$

Obs.: r'_e depende só de I_E de polarização.

β_{CA} - Ganho de corrente alternada

A Figura 51 mostra a curva $I_C \times I_B$. β_{CC} é a razão entre a corrente de coletor e a corrente de base. Como o gráfico não é linear, β_{CC} depende do valor do ponto Q. O ganho de corrente ca (chamado de β_{CA} ou simplesmente β) é a relação entre a variação da corrente de coletor e a variação da corrente de base para pequenos sinais em torno do ponto Q.

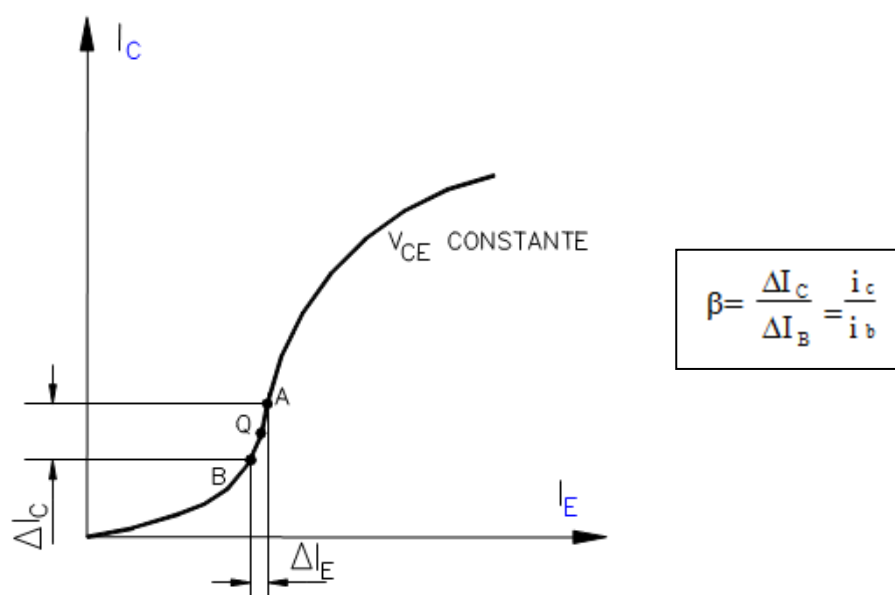


FIGURA 51: CURVA $I_C \times I_B$

Graficamente β é a inclinação da curva no ponto Q. Ele pode assumir diversos valores dependendo da posição Q.

AMPLIFICADOR COM EMISSOR ATERRADO

A Figura 52 mostra um circuito com um capacitor de desvio ligado ao emissor. O capacitor aterra o emissor em termos de ca. A fonte v_s injeta uma pequena onda senoidal à base do transistor através do capacitor de acoplamento. Esta onda faz variar a tensão de v_{be} e pela curva da Figura 49 induz uma variação no i_e .

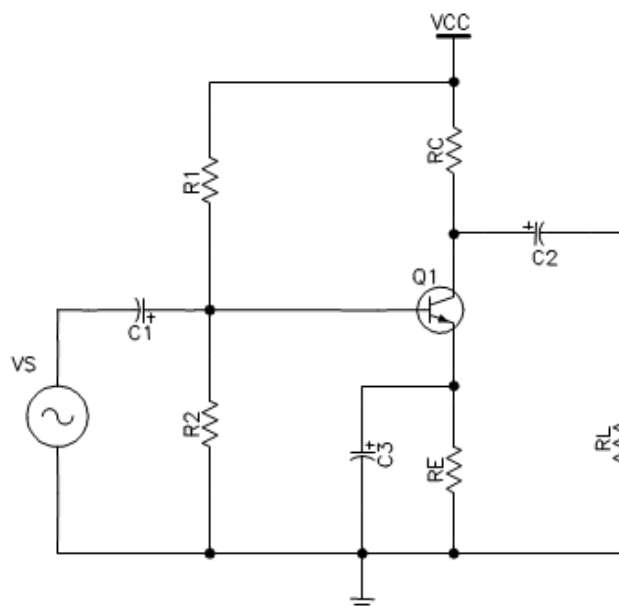


FIGURA 52: CIRCUITO COM UM CAPACITOR DE DESVIO LIGADO AO EMISSOR

Como a corrente de coletor é praticamente igual a corrente de emissor, há uma queda de tensão proporcional no R_C . Sendo mais preciso, um pequeno aumento na tensão v_s , aumenta a tensão de base-emissor, que por sua vez aumenta a corrente i_e , como i_c é igual a i_e , há uma queda de tensão nos terminais do R_C o que culmina com uma queda de tensão de V_{CE} .

Em suma uma variação positiva de v_s produz uma variação negativa em v_{ce} , isto significa que os sinais de entrada e saída estão defasados de 180° . Veja a Figura 53.

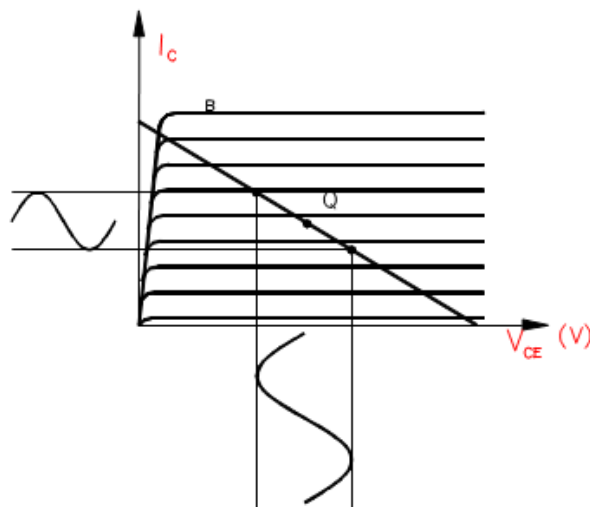


FIGURA 53: SINAL DE SAÍDA AMPLIFICADO E DEFASADO

Ganho de tensão

O ganho de tensão é:

$$A_v = \frac{V_{saída}}{V_{entrada}}$$

A Figura 54 mostra o circuito equivalente ca para amplificador da Figura 52, o resistor do coletor R_C e R_L tem um dos lados aterrado, porque a fonte de tensão V_{CC} aparece como um curto em ca. Por causa do circuito paralelo na entrada, a tensão v_s aparece diretamente sobre diodo emissor. Na Figura 55 o mesmo circuito ao considerar o modelo Ebers-Moll.

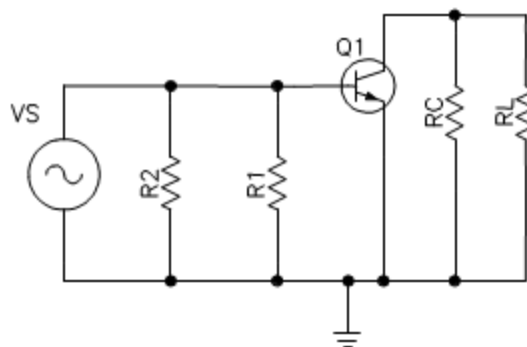


FIGURA 54: CIRCUITO EQUIVALENTE CA DO AMPLIFICADOR COM EMISSOR ATERRADO

A tensão de entrada aparece com uma polaridade mais - menos para indicar o semiciclo positivo. A lei de Ohm aplicada em r'_e :

$$i_e = \frac{V_s}{r'_e}$$

Na Figura 55, a malha do lado direito tem dois resistores em paralelo R_C e R_L .

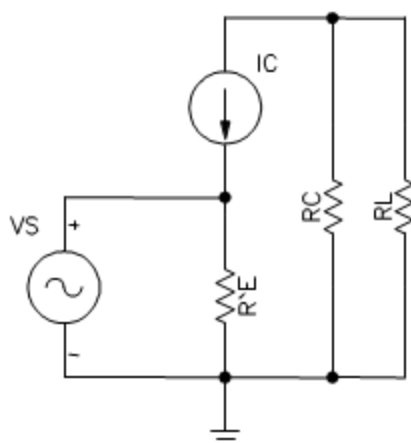


FIGURA 55: MODELO EBERS-MOLL DO AMPLIFICADOR COM EMISSOR ATERRADO

O resistor equivalente é:

$$r_c = R_L // R_C$$

Na malha do lado direito a tensão de saída é a tensão sobre o resistor equivalente r_c :

$$v_{saída} = -i_c r_c$$

Então o ganho vale:

$$A_v = \frac{v_{saída}}{v_{entrada}} = - \frac{i_c r_c}{i_e r_e}$$

Como a corrente do coletor é aproximadamente igual a corrente do emissor:

$$A_v = - \frac{r'_c}{r'_e}$$

REALIMENTAÇÃO

Quando uma parte do sinal de saída de um circuito é aplicada de volta à entrada do mesmo, dizemos que houve uma realimentação no circuito. Quando o sinal aplicado novamente à entrada do circuito possui a mesma fase que o sinal existente na entrada, este processo é designado como realimentação positiva. Por outro lado, se o sinal reaplicado na entrada tiver fase oposta ao sinal já existente na entrada, o nome dado é realimentação negativa.

A realimentação negativa é mais aplicada nos amplificadores e, a realimentação positiva, na maioria dos circuitos osciladores.

A realimentação negativa em amplificadores tem como desvantagem a diminuição do ganho, dado que ela subtrai parcialmente a tensão de entrada. A sua grande vantagem é estabilização do circuito. O próximo item analisa um circuito com realimentação negativa, observando a questão do ganho e da estabilidade.

AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO PARCIAL

No amplificador de emissor comum a tensão de saída é inversamente proporcional a r_e' . E o valor de r_e' depende do ponto de operação. Isto é um problema para a tensão de saída, pois, ela se torna susceptível as variações de temperatura e troca de transistor.

Naturalmente nos amplificadores com controle de volume (tensão de entrada), o problema é contornável. Mas nem todos os amplificadores têm este controle. Uma opção para estabilizar o ganho de tensão é deixar uma resistência de emissor sem ser desviada. Esse resistor não desviado recebe o nome de resistor de realimentação porque ele produz uma realimentação negativa. Veja Figura 56:

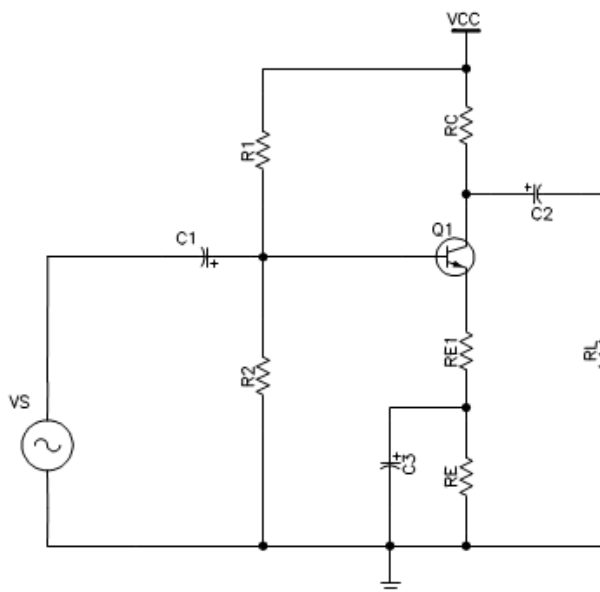


FIGURA 56: AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO PARCIAL

A corrente ca do emissor deve circular através do resistor R_{E1} antes de passar pelo capacitor de desvio e pelo ponto de aterramento. Sem o resistor de realimentação o diodo emissor recebe toda a tensão ca de entrada.

No entanto com a inclusão do R_{E1} , a tensão ca aparece no diodo e no R_{E1} . Ou seja:

$$V_s = V_{be} + V_{R_{E1}} \quad \text{OU} \quad V_{be} = V_s - V_{R_{E1}}$$

Quando a tensão de entrada aumenta, a tensão no emissor aumenta. Isso implica que a tensão de realimentação está em fase com a tensão ca de entrada. Como resultado, a tensão ca no diodo emissor é menor que antes. A realimentação é negativa porque a tensão de realimentação diminui a tensão ca no diodo emissor e portanto a corrente i_e .

Na Figura 57 está o equivalente ca do amplificador com realimentação parcial.

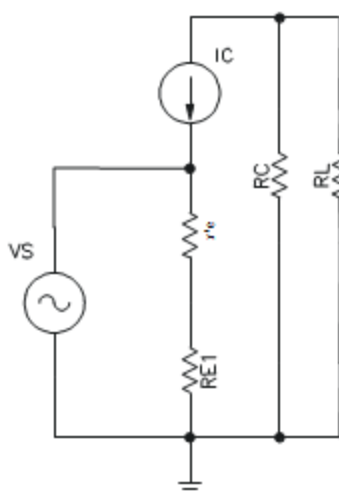


FIGURA 57: EQUIVALENTE CA DO AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO PARCIAL.

A equação da corrente de emissor é:

$$i_e = \frac{v_s}{r'_e + R_{E1}}$$

Já que

$$v_{saida} = -i_c r'_c$$

Temos então que:

$$A_v = \frac{v_{saida}}{v_{entrada}} = - \frac{i_c r'_c}{i_e r'_e} = - \frac{r'_c}{r'_e + R_{E1}}, \text{ considerando } i_c = i_e$$

Em geral o valor de R_{E1} é bem maior que o de r'_e e o ganho de tensão passa a não ser influenciado pelas variações de r'_e . Em contrapartida, quanto maior o R_{E1} menor será o ganho de tensão. Em suma, existe um compromisso entre a estabilidade do ganho de tensão e o valor do ganho.

Impedância de entrada

No circuito da Figura 56 a tensão de entrada é aplicada diretamente na base do transistor. No entanto, na maioria das aplicações a fonte v_s tem uma resistência em série como mostrado na Figura 58

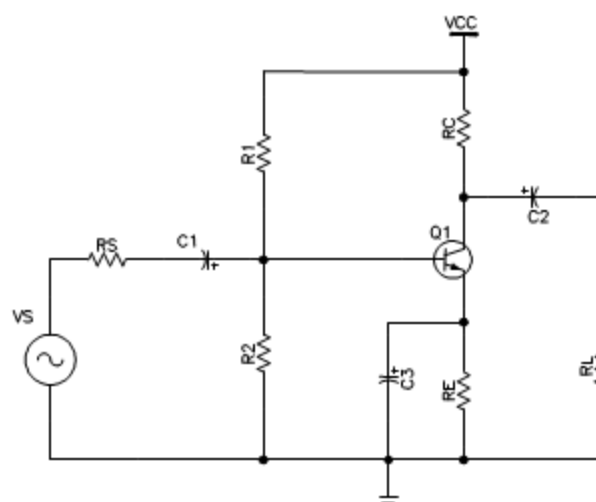


FIGURA 58: AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO PARCIAL COM RS EM SÉRIE COM VS

Para uma análise mais detalhada do comportamento ca, deve-se primeiro criar o equivalente ca como mostrado na Figura 59

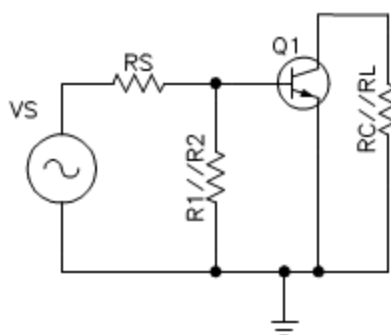


FIGURA 59: EQUIVALENTE CA DO CIRCUITO ANTERIOR

No circuito equivalente, pode-se ver um divisor de tensão do lado da entrada do transistor. Isso significa que a tensão ca na base será menor que a tensão v_s .

O divisor de tensão é formado pelo resistor R_S e os resistores $R_1 // R_2$. Mas como na base do transistor entra uma corrente i_b , ela deve ser considerada. A resistência ca vista da base é conhecida como impedância de entrada da base. Abaixo de 100 kHz basta considerar os elementos puramente resistivos.

A impedância de entrada da base é a razão entre a tensão aplicada na base (v_b) e a corrente i_b .

$$Z_{base} = \frac{v_b}{i_b}$$

Para descobrir a impedância da base é melhor aplicar o modelo de Ebers-Moll no circuito da Figura 60

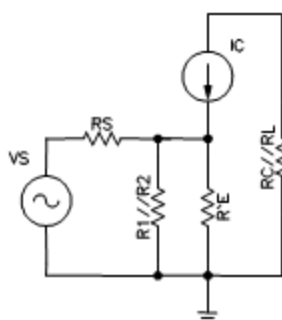


FIGURA 60: MODELO EBERS-MOLL DO CIRCUITO ANTERIOR

Através do circuito é possível saber o valor v_b em função de r'_e .

$$v_b = i_e r'_e$$

Lembrando que a impedância de entrada da base é:

$$Z_{base} = \frac{v_b}{i_b}$$

Temos:

$$Z_{base} = \frac{v_b}{i_b} = \frac{i_e r'_e}{i_b} = \frac{i_b \beta r'_e}{i_b} = \beta r'_e$$

A impedância de entrada do estágio (Z_{ent}) é a resultante do paralelo de R_1 , R_2 e Z_{base} :

$$Z_{ent} = R_1 // R_2 // Z_{base} = R_1 // R_2 // \beta r'_e$$

A tensão ca na base é o divisor de tensão R_S com a impedância de entrada do estágio

$$v_b = \frac{Z_{ent}}{R_S + Z_{ent}} v_s$$

No amplificador com realimentação parcial, aplica-se a mesma regra, a única diferença é a impedância de entrada da base. Ela será:

$$Z_{base} = \beta(r'_e + R_{E1})$$

Estágios em cascata

Para obter um maior ganho de tensão na saída de um amplificador, é usual conectar dois ou mais estágios em série, como mostra a Figura 61. Este circuito é chamado de estágios em cascata, porque conecta a saída do primeiro transistor à base do seguinte:

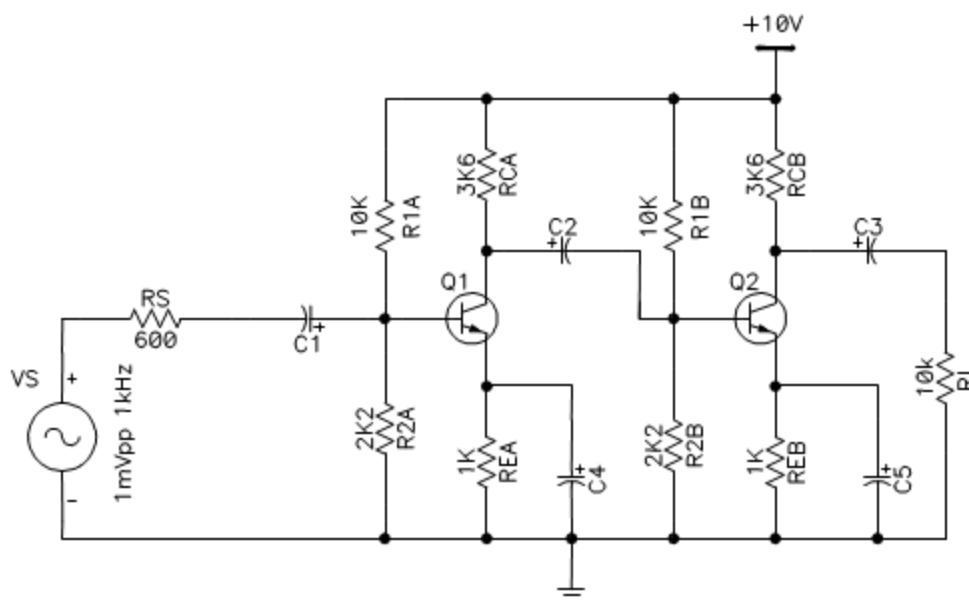


FIGURA 61: ESTÁGIOS EM CASCATA

Abaixo uma sequência de valores a serem calculados para análise de um amplificador de dois estágios:

1. A impedância de entrada do 2º estágio.
2. A resistência ca do coletor do 1º estágio
3. O ganho de tensão do 1º estágio.
4. A tensão de entrada do 1º estágio
5. O ganho de tensão de 2º estágio.
6. O ganho de tensão total.

A polarização cc é analisada individualmente, os capacitores de acoplamento isolam os dois estágios entre si e também da entrada vs e saída RL (o resistor de carga pode, por exemplo, estar representando um terceiro estágio).

Os dois estágios são idênticos para polarização cc.

$$V_B = 1,8V \quad V_E = 1,1V \quad I_E = 1,1mA \quad V_C = 6,04V$$

com o valor de I_E , tem-se r'_e

$$r'_e = 25mV / I_E = 22,7\Omega$$

Análise do 1º estágio

O equivalente ca é mostrado na Figura 62:

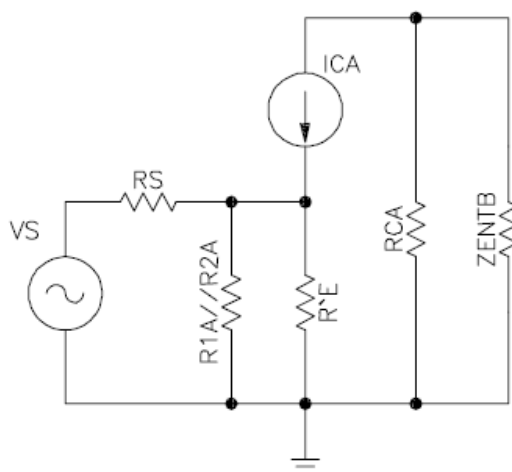


FIGURA 62: MODELO CA DO 1º ESTÁGIO

O segundo estágio age como uma resistência de carga sobre o primeiro. O valor desta carga é a impedância de entrada do segundo estágio Z_{entb} . Supondo $\beta = 100$:

$$Z_{entb} = R_{1A} // R_{2A} // \beta r'_e = 10k // 2k // 100 * 22,7 = 1k\Omega$$

Na Figura 62, R_C está em paralelo com Z_{entb} :

$$r_c = R_C // Z_{entb} = 3,6k // 1k = r_c = 783\Omega$$

O ganho de saída do primeiro estágio é

$$A_v = -783/22,7 \quad A_v = -34,5$$

O primeiro e segundo estágios tem a mesma impedância de entrada:

$$V_b = \frac{1k}{1k + 600} * 1m = 0,625mV_{pp}$$

Logo a tensão ca de saída do primeiro estágio é

$$V_c = -34,5 * 0,625 = -21,6mV_{pp}$$

Análise do 2º estágio

O equivalente ca para o segundo estágio é mostrado na Figura 63:

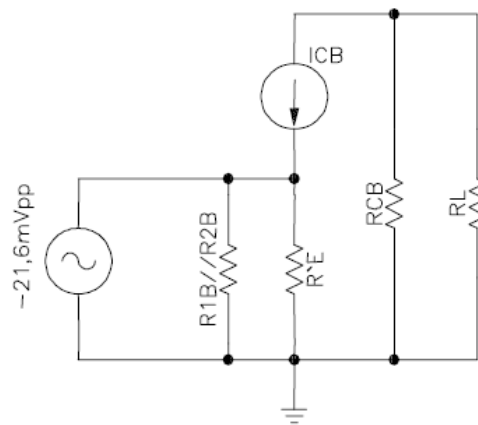


FIGURA 63: MODELO CA DO 2º ESTÁGIO

Por causa do capacitor de acoplamento entre os dois estágios, a tensão ca na base do segundo é igual a $-21,6\text{mVpp}$. O segundo estágio tem um ganho de tensão de:

$$A_v = -2,65\text{k}/22,7 \rightarrow A_v = -117$$

Por fim, a tensão de saída é:

$$V_{\text{saída}} = -117 * (-21,6) \rightarrow V_{\text{saída}} = 2,53\text{Vpp}.$$

Ganho de tensão total

O ganho de tensão total é a razão entre a tensão de saída do segundo estágio pela tensão de entrada:

$$A_{VT} = V_{\text{saída } 2^\circ \text{ est.}} / V_{\text{entrada } 1^\circ \text{ est.}} = 2,53 / 0,625\text{m} = 4048$$

ou seja, o ganho de tensão total é

$$A_{VT} = A_{V1} \times A_{V2}$$

AMPLIFICADOR BASE COMUM

A Figura 64 mostra um amplificador em base comum (BC), a base é ligada ao referencial comum (terra). O ponto Q é dado pela polarização do emissor.

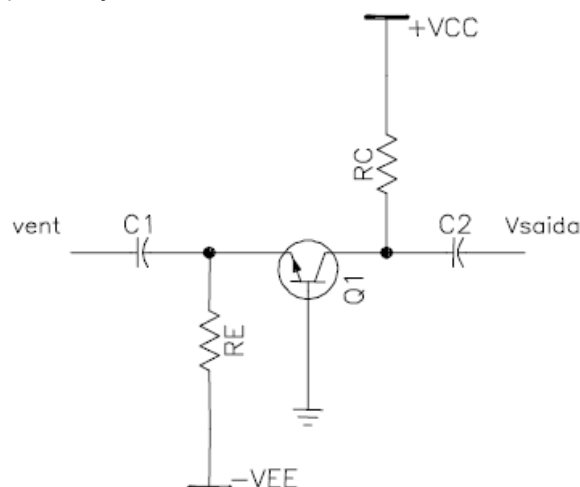


FIGURA 64: AMPLIFICADOR EM BASE COMUM

Portanto a corrente cc do emissor é dada por

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E}$$

O sinal de entrada aciona o emissor e a tensão de saída é tomada do coletor. A impedância de entrada de um amplificador BC é aproximadamente igual a

$$Z_{ent} \cong r'_e$$

a tensão de saída é

$$V_{saída} = i_c R_C$$

Ela está em fase com a entrada. Como a tensão de entrada é igual a

$$V_{ent} = i_e r'_e$$

O ganho de tensão é

$$A_V = \frac{i_c R_C}{i_e r'_e}$$

O ganho de tensão é o mesmo que do amplificador emissor comum sem realimentação parcial, apenas a fase é diferente. Idealmente a fonte de corrente tem uma impedância infinita, e então, a impedância de saída de um amplificador BC é

$$Z_{saída} = R_C$$

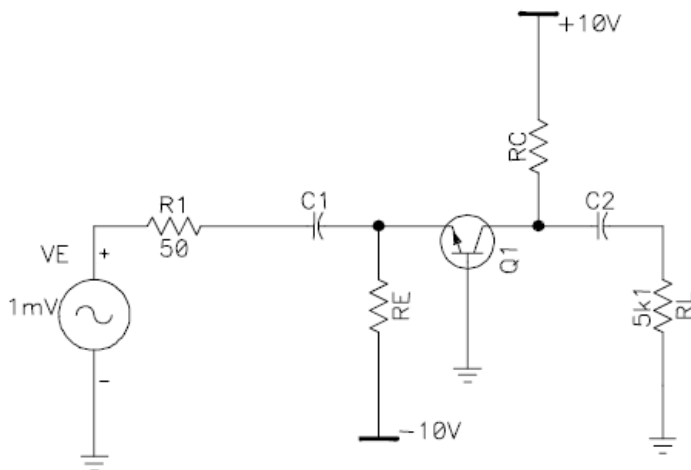
Uma das razões para o não uso do amplificador BC quanto o EC é sua baixa impedância de entrada. A fonte ca que aciona o amplificador BC vê como impedância de entrada

$$Z_{entrada} = r'_e$$

que pode ter um valor bem baixo, em função de I_E .

A impedância de entrada de um amplificador BC é tão baixa que ela sobrecarrega quase todas as fontes de sinais. Por isso, um amplificador BC discreto não é muito utilizado em baixas frequências. Seu uso é viável principalmente para frequências acima de 10MHz, onde as fontes de baixa impedância são comuns.

Exemplo: Qual a tensão de saída ca da figura abaixo. Dados : $R_E=20k\Omega$ e $R_C=10k\Omega$.



Solução: A corrente cc no emissor:

$$I_E = \frac{10 - 0,7}{20k} = 0,465mA$$

E a resistência ca do emissor é de:

$$r'_e = 25m / 0,465m = 53,8\Omega$$

A impedância de entrada:

$$Z_{ENT} = 53,8\Omega$$

O ganho de tensão levando a carga em consideração é:

$$A_V = \frac{10K // 5,1K}{53,8} = 62,8$$

A tensão de entrada no emissor é:

$$V_{ent} = \frac{53,8}{50 + 53,8} 1m = 0,518mV$$

Portanto a tensão na saída é:

$$V_{saída} = A_V V_{ent} = 62,8 * 0,518m = 32,5mV$$

AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM

Ao se conectar uma resistência de carga em um amplificador EC, o ganho de tensão diminui. Quanto menor a resistência de carga, maior a queda do ganho. Esse problema é chamado de sobrecarga. Uma forma de evitar a sobrecarga é usar um amplificador cc (coletor comum), também conhecido como seguidor de emissor. O seguidor de emissor é colocado entre a saída do amplificador EC e a resistência de carga.

A Figura 65 mostra um seguidor de emissor. Como o coletor está no terra para ca, ele é um amplificador coletor comum (CC). O gerador de sinal está acoplado à base do transistor por meio de um capacitor de acoplamento.

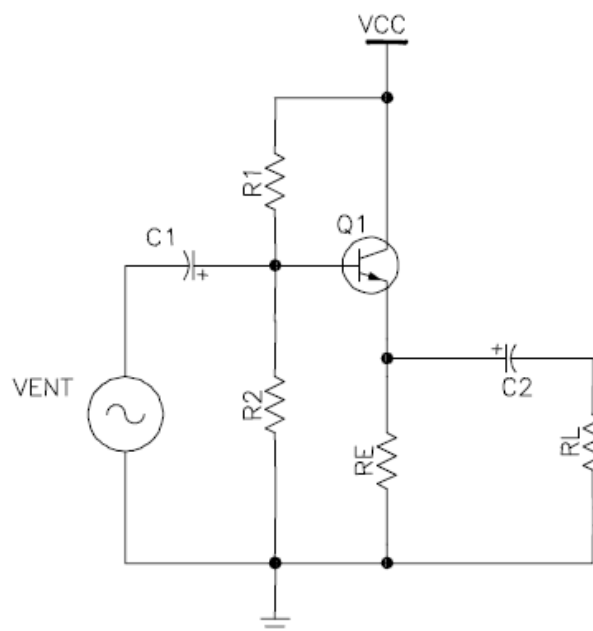


FIGURA 65: CIRCUITO SEGUIDOR DE EMISSOR

Primeiramente a análise cc para descobrir o valor da corrente de coletor a malha externa é:

$$V_{CC} = V_{CE} + I_E R_E$$

isolando a corrente de emissor:

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_E}$$

A Figura 66 mostra o circuito ca para o seguidor de emissor

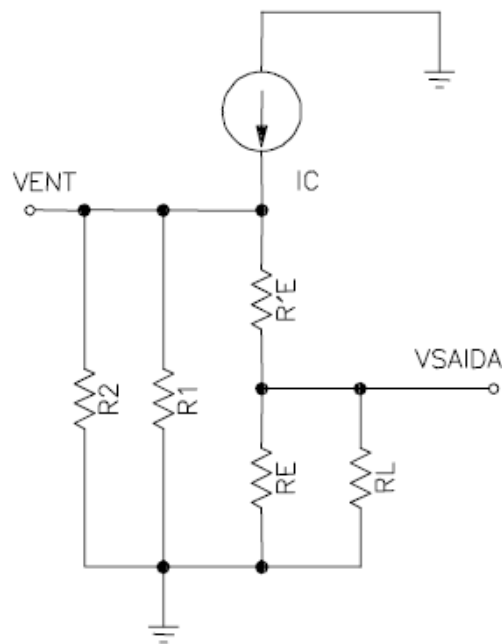


FIGURA 67: EQUIVALENTE CA PARA O SEGUIDOR DE EMISSOR

O ganho de tensão é dado por

$$A_V = \frac{V_{saída}}{V_{ent}} = \frac{i_e r_E}{i_e (r_E + r'_e)} = \frac{r_E}{r_E + r'_e}$$

geralmente $r_E \gg r'_e$. Então

$$A_V \cong 1$$

o uso de uma ou de outra equação depende da precisão desejada no circuito.

Impedância de entrada

Como visto antes, a base se comporta como uma resistência equivalente de:

$$Z_{ent(base)} = \frac{V_b}{i_b}$$

do equivalente ca a corrente de emissor ca é

$$i_e = \frac{V_b}{r_E + r'_e}$$

a resistência r_E é o equivalente do paralelo R_E com R_L .

Isolando v_b

$$v_b = i_e (r_E + r'_e)$$

Temos então

$$Z_{ent(base)} = \frac{i_e (r_e + r'_e)}{i_b}$$

a razão entre a corrente de coletor e a de base é aproximadamente igual β

$$Z_{ent(base)} = \beta(r_E + r'_e)$$

a impedância de entrada do amplificador é o paralelo de R_1 , R_2 e impedância de entrada da base

$$Z_{ent} = R_1 // R_2 // \beta(r_E + r'_e)$$

como $\beta(r'_e + r_E) \gg R_1, R_2$ então::

$$Z_{ent} = R_1 // R_2$$

com base na FIGURA 68, a tensão de emissor segue a tensão na base, sem amplificar. Ou seja a tensão de saída é igual a de entrada. A vantagem de montagem é o fato de ter uma alta impedância de entrada se comparada com emissor comum.

Transistor Darlington

Um caso especial de amplificador coletor comum é a conexão Darlington. Ela consiste na ligação em cascata de dois seguidores de emissor, como mostra a Figura 67.

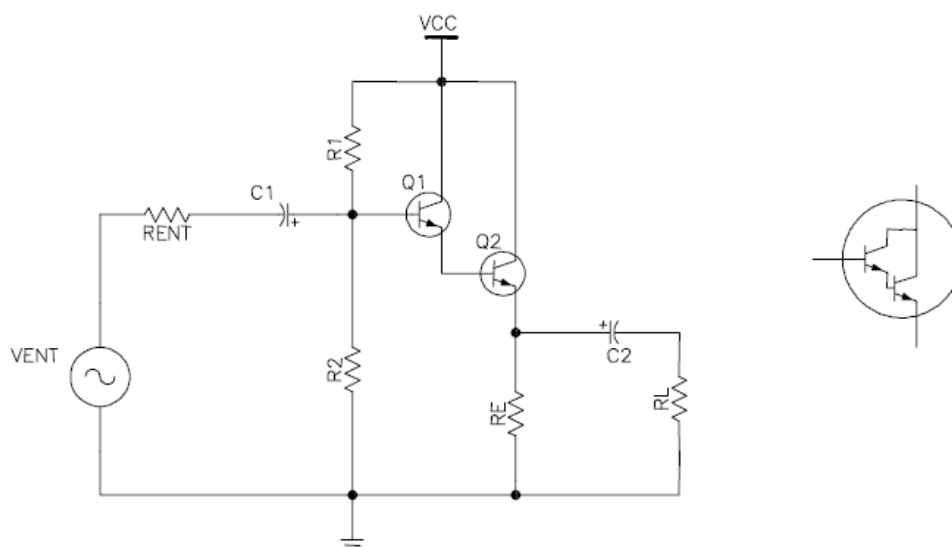


FIGURA 67: CONEXÃO DARLINGTON

A corrente da base do segundo transistor vem do emissor do primeiro transistor. Portanto, o ganho de corrente entre a primeira base e o segundo emissor é

$$\beta = \beta_1 \beta_2$$

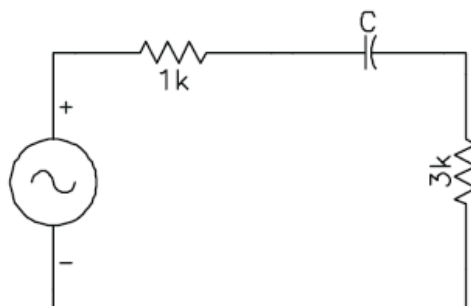
A principal vantagem da conexão Darlington é a alta impedância de entrada olhando para a base do primeiro transistor. E é

$$Z_{ent(base)} = \beta R_E$$

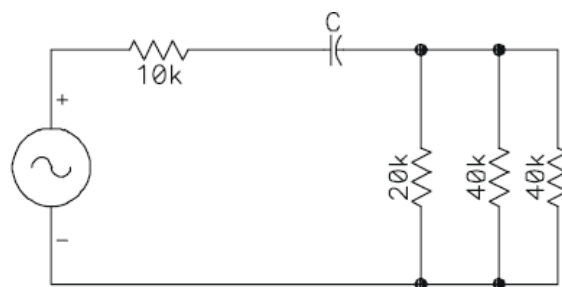
Os fabricantes podem colocar dois transistores montados em coletor comum em um mesmo encapsulamento. Esse dispositivo de três terminais como mostrado no lado direito da Figura 67 é conhecido como transistor Darlington, opera como um único transistor com um β_{CC} entre 1.000 e 20.000. ele pode ser tratado como um transistor comum exceto pelo valor de β e também pelo valor de V_{BE} que passa a ser a soma dos dois V_{BE} 's. Ou seja, aproximadamente igual a 1,4V.

EXERCÍCIOS

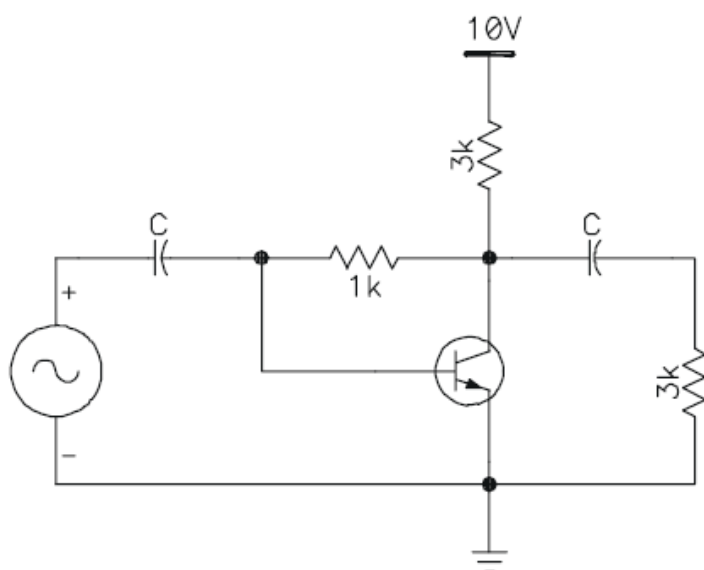
88. A fonte ca da figura abaixo pode ter uma frequência entre 100Hz e 200Hz. Para ter um acoplamento estabilizado ao longo desta faixa, que valor deve ter o capacitor de acoplamento?



89. Na figura, desejamos um capacitor de acoplamento estabilizado para todas as frequências entre 500Hz e 1MHz. Que valor ele deve ter?



90. Desenhe o circuito cc equivalente para o amplificador da figura abaixo. Rotule as três correntes com a notação cc padronizada. A seguir, desenhe o circuito ca equivalente



AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA

O objetivo de uma etapa de potência é fornecer à carga uma potência apreciável com a menor distorção possível e um bom rendimento, dependendo o funcionamento da etapa de saída do amplificador, do local onde se situe o respectivo ponto de repouso, podendo por isso distinguir-se quatro formas distintas de amplificação ou classes de funcionamento.

O sinal de saída de um amplificador deve representar fielmente o sinal de entrada, embora amplificado, por isso mesmo este deve trabalhar nas zonas lineares das suas características, o que acontece se o sinal aplicado for de pequena amplitude.

Quando o sinal é elevado, o deslocamento variável do ponto de funcionamento pode entrar em zonas não lineares, resultando um sinal de saída com distorção em amplitude, podendo mesmo apresentar-se cortado, se eventualmente esse deslocamento atingir as zonas de saturação e de corte.

Assim os amplificadores de potência são amplificadores que trabalham com grandes sinais e o regime de operação destes é severo em relação aos amplificadores de pequenos sinais. Os amplificadores de potência de um modo geral podem ser divididos em quatro classes:

- ✓ Classe A
- ✓ Classe B
- ✓ Classe AB
- ✓ Classe C

As classes dos amplificadores de potência estão relacionadas diretamente com o ponto quiescente ou ponto de operação dos transistores de saída dos amplificadores. Portanto, as classes estão relacionadas também com o ângulo de condução (θ) dos transistores de saída, quando estes estiverem funcionando em regime dinâmico.

A Figura 68 tem um gráfico que relaciona a corrente de coletor, com sua tensão base-emissor. Ele mostra as formas de onda dos quatro tipos básicos de amplificadores de potência, classes A, B, AB e C, e seus pontos quiescentes.

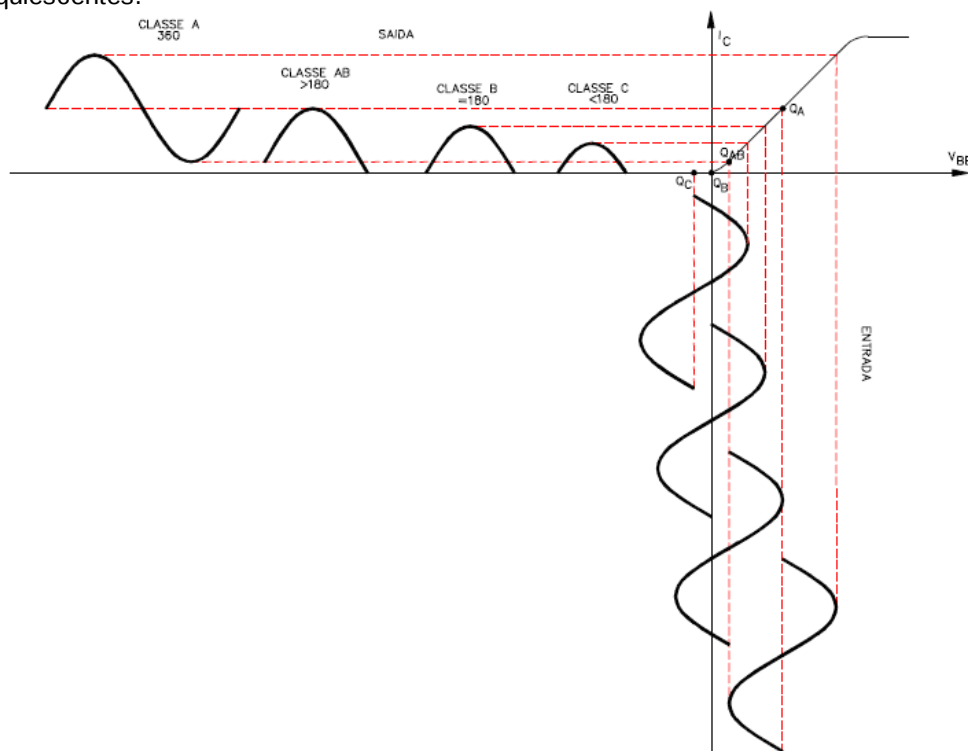


FIGURA 68: EQUIVALENTE CA PARA O SEGUIDOR DE EMISSOR

No amplificador de potência classe C o transistor de saída é polarizado num ponto de operação abaixo da região de corte do transistor, isto é, com $V_{BEQ} < 0$. Isto significa que o sinal V_{BE} aplicado a base do transistor, tem que vencer a tensão V_{BEQ} para iniciar a sua condução. Portanto, a corrente de coletor circula somente durante um intervalo menor que 180° . Em geral, os amplificadores classe C são utilizados em circuitos de RF.

Classe A

No amplificador de potência classe A, a polarização do transistor de saída é feita de tal forma que a corrente de coletor circula durante todo o ciclo do sinal de entrada V_{BE} . Isto resulta num ângulo de condução de $\theta=360^\circ$ para transistor de saída. O ponto de operação do transistor de saída está localizado no centro da região ativa e neste caso a polarização do transistor de saída é semelhante à polarização de transistores de baixo sinal.

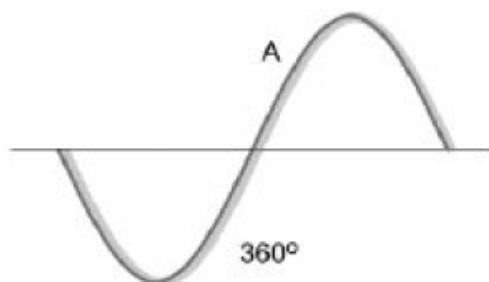


FIGURA 69: ÂNGULO DE CONDUÇÃO DE 360°

Potência de saída

A Figura 70 mostra um exemplo de amplificador de potência classe A. É um emissor comum já comentado antes.

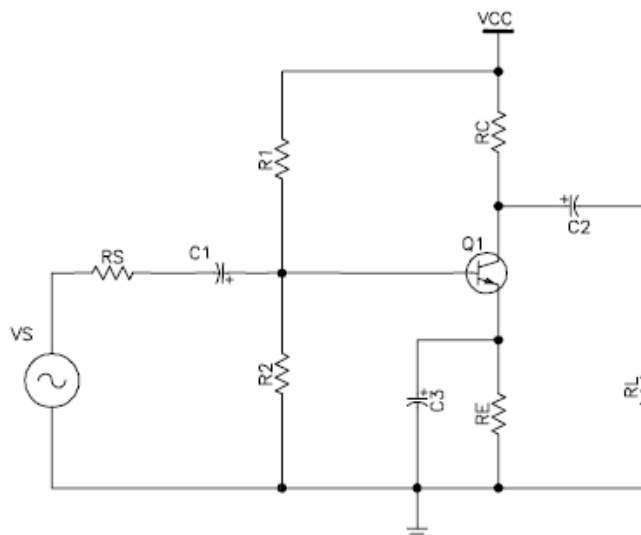


FIGURA 70: AMPLIFICADOR CLASSE A

A resistência de carga R_L , pode ser um alto-falante, um motor, etc. O resistor R_C do coletor, por outro lado, é um resistor comum que faz parte da polarização por divisão de tensão. O interesse é na potência transferida à resistência de carga, porque ela realiza um trabalho útil. Gera ondas acústicas, gira o motor, etc. Em contra partida, qualquer potência no resistor R_C , é uma potência perdida e é transformada em calor. Então quando se fala em potência de saída, é uma referência a potência útil da carga.

Ela é dada por:

$$P_L = V_L I_L \text{ ou } P_L = \frac{V_L^2}{R_L}$$

onde V_L = tensão eficaz na carga
 I_L = corrente eficaz na carga

A potência máxima na carga ocorre quando o amplificador está produzindo a tensão máxima de pico a pico na saída sem ceifamento do sinal. Nesse caso, a potência na carga é:

$$P_L = \frac{(MPP)^2}{8R_L}$$

MPP é o valor (máximo de pico a pico) da tensão v_a sem ceifamento. No denominador tem o número 8 resultante da conversão de rms para pico a pico.

Potência cc dissipada no amplificador

Quando o amplificador está sem sinal na entrada, a dissipação de potência no transistor é igual a:

$$P_D = V_{CEQ} I_{CQ}$$

Há também a potência dissipada no resistores R_1 e R_2

$$P_1 = I_1 V_{CC} = \left(\frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \right) V_{CC} = \frac{(V_{CC})^2}{R_1 + R_2}$$

Então a potência cc total no amplificador é

$$P_S = P_1 + P_D \quad \text{ou} \quad P_S = I_S V_{CC}$$

onde I_S (corrente de dreno), é a soma da corrente no divisor de tensão e corrente no coletor

Eficiência

É a razão entre a potência ca na carga e a potência da alimentação cc multiplicada por 100%

$$\eta = \frac{P_L}{P_S} 100\%$$

Quanto maior a eficiência do amplificador, melhor. Os amplificadores classe A tem uma baixa eficiência, tipicamente em torno de 25% (teoricamente). Isso ocorre por causa de perdas de potência nos resistores de polarização, de coletor, de emissor e transistor.

A corrente de saída provém da fonte de alimentação. Os amplificadores transistorizados funcionando na classe A, com sinais fracos, realizam uma amplificação sem distorção, com um regime de funcionamento linear. Não são muito eficientes.

Teoricamente é obtido um máximo de 50% com carga indutiva na saída, ou 25%, se a carga for capacitiva. Por estar sempre conduzindo, mesmo sem sinal de entrada, a potência é obtida na fonte de alimentação, daí a sua pouca eficiência.

Se for necessária uma maior potência na saída de um amplificador em classe A, será significativo o desperdício na dissipação de potência, mais dissipadores para baixar a temperatura, fontes de alimentação mais caras etc.

Classe B

Na amplificação em classe B, o transistor deve ser polarizado de tal forma que a corrente I_B será igual a zero, na ausência de sinal de entrada. Com sinal de entrada, a corrente de saída flui durante meio ciclo do sinal, ficando o amplificador no corte durante o outro meio ciclo.

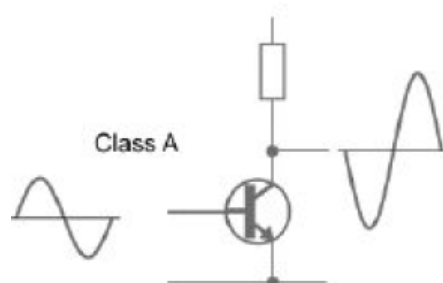


FIGURA 71: AMPLIFICADOR CLASSE B

Como apenas amplifica um semiciclo do sinal aplicado, implica que o seu ponto de funcionamento seja situado na zona de corte, mas apenas durante um semiciclo do sinal de entrada, passando à zona ativa durante o outro semiciclo.

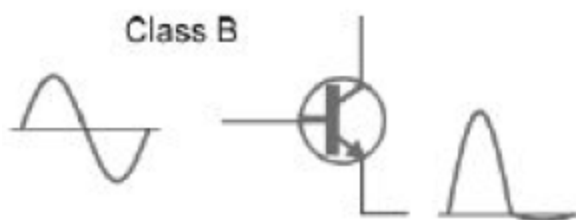


FIGURA 72: AMPLIFICADOR CLASSE B

Amplificando apenas metade do ciclo da tensão de entrada, origina grande distorção, mas a sua eficiência é maior que na classe A. Teoricamente poderá ter um máximo de 78,5% de eficiência, porque o elemento amplificador é desligado metade do tempo, não dissipando potência.

Geralmente os amplificadores de potência classe B e classe AB utilizam dois transistores de potência num montagem denominada *push-pull*. A configuração *push-pull* significa que quando um dos transistores está conduzindo, o outro está em corte e vice-versa. No amplificador classe B, cada um dos transistores de saída é polarizado num ponto de operação situado na região de corte do transistor, isto é, $V_{BEQ} = 0$. Desta maneira, a corrente de coletor de cada transistor, circula durante um ângulo de condução de $\theta = 180^\circ$, ou seja, a cada semiciclo do sinal de entrada V_{BE} . A Figura 5-3 mostra uma forma de conectar um seguidor de emissor *push-pull* classe B. Foi conectado um seguidor de emissor *nnp* e um seguidor de emissor *pnp*. O projetista escolhe os resistores de polarização para situar o ponto de operação no corte. Isso polariza o diodo emissor de cada transistor entre 0,6V e 0,7V. Idealmente,

$$I_{CQ} = 0$$

como os resistores de polarização são iguais, cada diodo emissor é polarizado com a mesma tensão. Como resultado, metade da tensão de alimentação sofre uma queda entre os terminais coletor e emissor de cada transistor. Isto é,

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

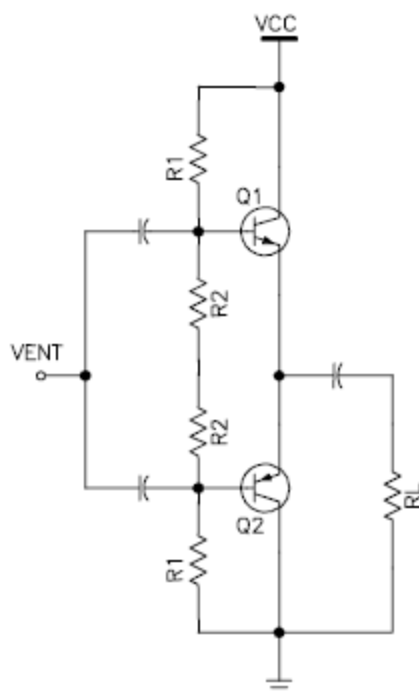


FIGURA 73: AMPLIFICADOR CLASSE B

Reta de carga cc

Como não há resistência cc no circuito do coletor ou do emissor da Figura 73, a corrente de saturação é infinita, ou seja, a reta é vertical, (Figura 74). É muito difícil encontrar um ponto de operação estável na região de corte num amplificador *push-pull*. Qualquer diminuição significativa de V_{BE} com a temperatura pode deslocar o ponto de operação para cima da reta de carga cc a valores muito altos de correntes.

Reta de carga ca

A Figura 74 mostra a reta de carga ca.

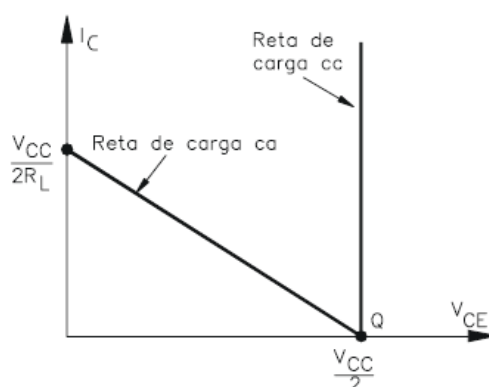


FIGURA 74: RETA DE CARGA CA

Quando um dos transistores está conduzindo, seu ponto de operação move-se para cima ao longo da reta de carga ca. O ponto do outro transistor permanece no corte. A oscilação de tensão do transistor em condução pode seguir todo o percurso desde o corte à saturação. No semiciclo oposto, o outro transistor faz a mesma coisa. Isso significa que a tensão de pico a pico máxima (MPP) não ceifada do sinal de saída é igual a VCC. Isto é o dobro de tensão que de um amplificador classe A sob mesma tensão de alimentação. Em termos de eficiência η máxima teórica será de 78,5%.

A Figura 75 mostra o equivalente ca do transistor em condução. Isso é praticamente idêntico ao seguidor de emissor classe A.

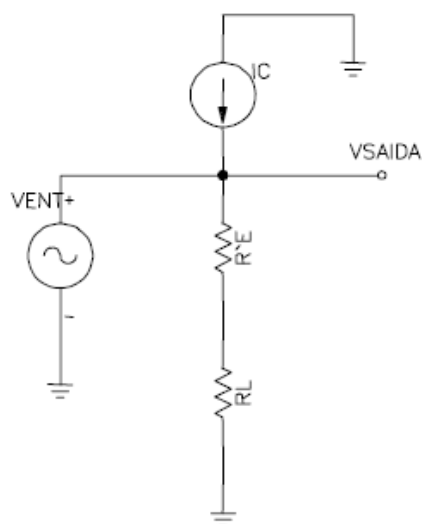


FIGURA 75: EQUIVALENTE CA DO TRANSISTOR EM CONDUÇÃO

O ganho de tensão com carga é

$$A_V = \frac{R_L}{R_L + r'_e}$$

A impedância de entrada da base com carga é

$$Z_{ent(base)} = \beta(R_L + r'_e)$$

Classe AB

A amplificação em classe AB verifica-se quando o transistor se encontra polarizado de tal forma que a corrente de saída flui durante mais de meio ciclo, mas em menos do que um ciclo completo.

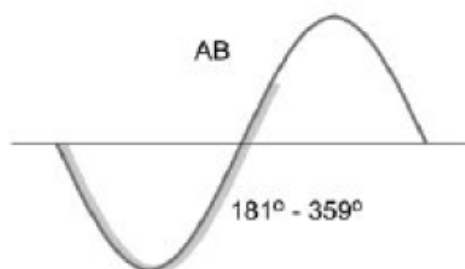


FIGURA 76: ÂNGULO DE CONDUÇÃO DO CLASSE AB

A classe AB mantém uma pequena corrente de base, mesmo não havendo sinal. Um divisor de tensão ajustável resolve o problema.

A classe AB produz menos distorção que a classe B, mas à custa de uma diminuição de rendimento do coletor e à existência de corrente de coletor na ausência de sinal.

A polarização com diodos tem a vantagem de realizar uma boa compensação de temperatura, tanto melhor quanto mais a característica do diodo for semelhante à da junção base-emissor

Os amplificadores de potência AB também utilizam dois transistores de potência numa configuração *push-pull*. A diferença para a classe B, é que cada um dos transistores de saída é polarizado num ponto de operação situado um pouco acima da região de corte do transistor, ($V_{BEQ} > 0$). Isto significa que cada um dos transistores está conduzindo uma pequena corrente de base e, consequentemente, uma corrente de coletor proporcional a ela. A corrente de coletor de cada transistor circula durante um ângulo de condução de $\theta > 180^\circ$, porém, menor que 360° . A eficiência teórica fica entre 50% e 78,5%. A grande vantagem é a eliminação da distorção por *crossover*.

Classe C

Na amplificação em classe C, o transistor é polarizado negativamente, e de tal forma que a corrente de saída circule durante menos de meio ciclo (figura 77). Esta classe tem bom rendimento, mas maior distorção (figura 77).

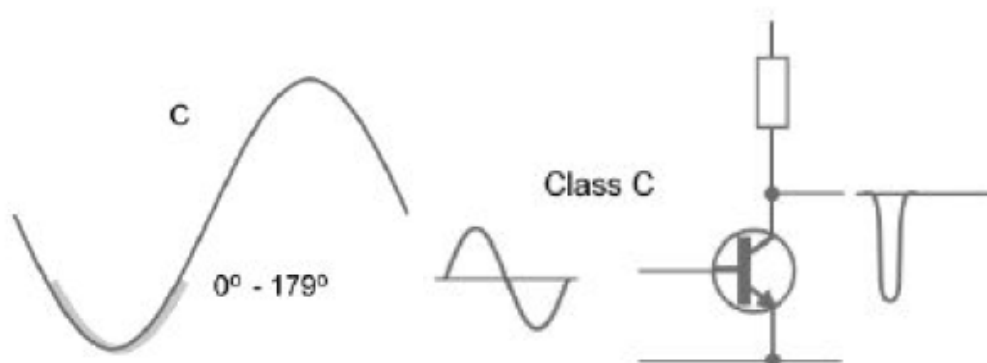


FIGURA 77: AMPLIFICADOR CLASSE C

O ângulo de condução é inferior a 180° , o que permite obter bom rendimento mas maior distorção.

A distorção é algumas vezes aceitável ou, como é o caso de multiplicação de frequência, é mesmo desejável.

A classe C é muitas vezes usada quando não há variação de amplitude do sinal de entrada, como em modulação de frequência, e em que o circuito de saída é sintonizado de modo a suprimir todos os harmônicos indesejáveis.

No circuito da figura 78, é fácil concluir que o circuito só conduz quando a tensão de entrada ultrapassa a tensão de arranque.

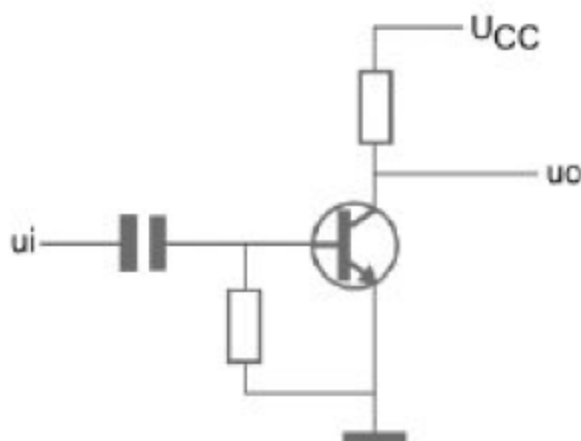


FIGURA 78: CIRCUITO DO AMPLIFICADOR CLASSE C

Também se reconhece na entrada um circuito fixador típico, fixando à tensão de arranque. A tensão é tanto menos distorcida quanto maior for a constante de tempo do circuito, o que reduz a carga perdida pelo capacitor e, conseqüentemente, o tempo de condução da junção base emissor.

A tensão U_o de saída será uma tensão U_{cc} com picos negativos. Deve-se ter em conta que a junção base-emissor fica sujeita a uma tensão inversa, aproximadamente a tensão pico a pico inversa, que pode ultrapassar a tensão de ruptura (figura 79).

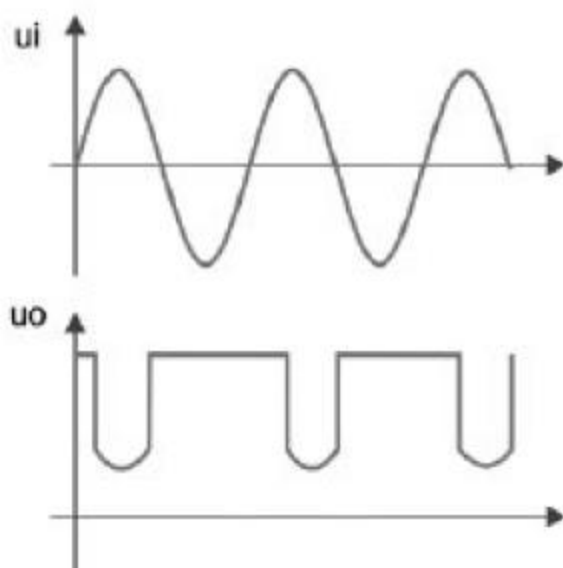


FIGURA 79: TENSÃO DE SAÍDA DO AMPLIFICADOR CLASSE C

A potência dissipada será tanto menor quanto menor for o tempo de condução. Como se obtêm tensões senoidais?

Consideremos um circuito tampão ideal com o capacitor carregado. Este vai se descarregar lentamente pela bobina que armazena toda a energia do componente sob a forma de campo magnético. Uma vez descarregado o capacitor, o campo magnético variável, que pela f.e.m. induzida contrariou as variações de corrente, vai agora fazer circular uma corrente de sentido contrário ao anterior, carregando o capacitor até a sua tensão anterior e com a energia inicial.

Temos um circuito oscilante ideal que gera uma tensão alternada senoidal de frequência igual à de ressonância do circuito ($f_0 = 1/2\pi LC$).

Na realidade o circuito tem perdas, pelo que a onda será amortecida, desaparecendo caso não lhe seja fornecida energia. É essa a função do transistor, no circuito, quando conduz durante intervalos de tempo curtos.

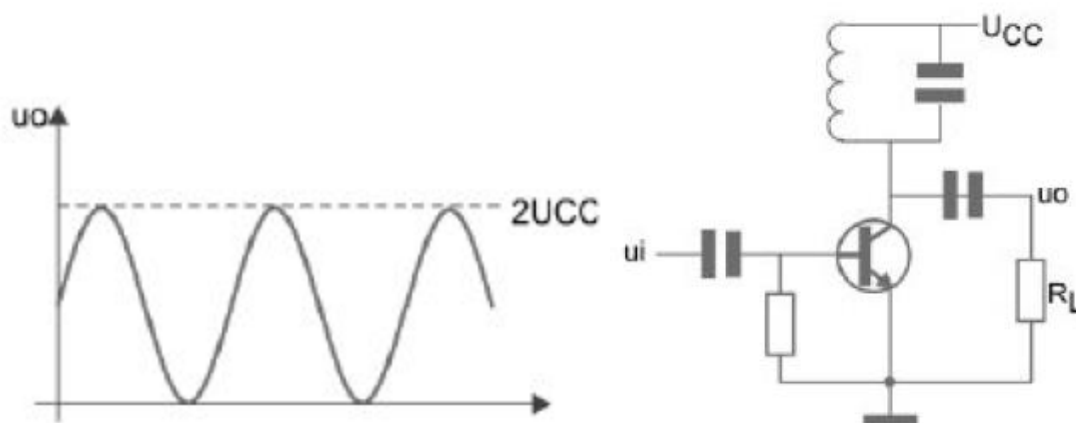
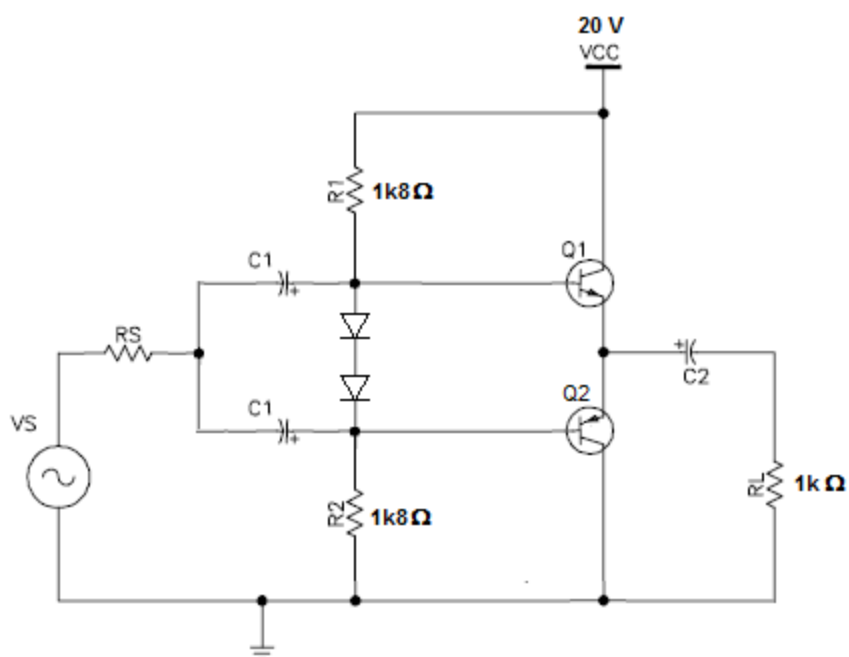
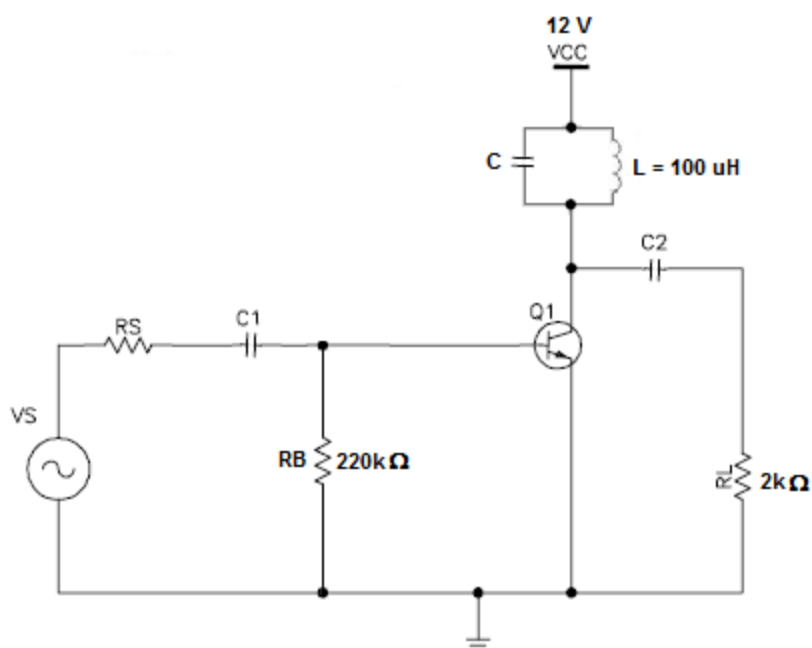


FIGURA 80: ANÁLISE CIRCUITO DO AMPLIFICADOR CLASSE C

92. Dado o circuito amplificador classe AB a seguir, projetado com $I_{CQ} = 10 \text{ mA}$, determinar a tensão e a potência máximas na carga e o rendimento do amplificador



93. Determine o valor de C e a banda de frequência do amplificador sintonizado (Classe C) a seguir, para que ele amplifique apenas o harmônico correspondente ao dobro da frequência do sinal de entrada, sabendo-se que o indutor tem $Q_L = 40$



BIBLIOGRAFIA

- ANZENHOFER, Karl ... et al. **Eletrotécnica para escolas profissionais**. 3ª Edição – São Paulo, Mestre Jou, 1980.
- CASSIGNOL, Etienne. **Semicondutores: física e eletrônica**. Rio de Janeiro, Edgar Blucher, 1980
- . **Semicondutores: circuitos**. Rio de Janeiro, Edgar Blucher, 1980
- CAPUANO, Francisco G. & MARINO, Maria A. M. **Laboratório de eletricidade e eletrônica**. São Paulo, Érica, 1989.
- CAPUANO, Francisco Gabriel. **Elementos da eletrônica digital**. São Paulo. Érica, 1996.
- COMO funciona. **Enciclopédia de ciência e técnica**. São Paulo, Abril Cultural, c. 1974 6V.
- CATHEY, Jimmie J. **Dispositivos e circuitos eletrônicos**. São Paulo, Makron Books, 1994. Coleção Schaum.
- DEGEM SYSTEM. **Eb111: Fundamentos de Semicondutores I**. Israel, Inter Training Systems LTDA, 1991.
- HONDA, Renato. **850 exercícios de eletrônica**, 3ª ed. São Paulo, Érica, 1991.
- MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica**. São Paulo, McGraw-Hill, 1987. Vol. 1
- . **Eletrônica no laboratório**. São Paulo, Makron books, 1991.
- MARQUES, Angelo... et al. **Dispositivos semicondutores: diodos e transistores**. São Paulo, Érica, 1997. Coleção Estude e Use
- MELLO, Hilton Andrade de & INTRATOR, Edmond. **Dispositivos semicondutores**, 3ª ed. Rio de Janeiro, Livros técnicos e Científicos, 1978.
- MILLMAN, Jacob. **Microeletrônica**. Lisboa, McGraw-Hill, 1986. Vol. 1

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
ESCOLA TÉCNICA ESTADUAL “LAURO GOMES”**

APOSTILA DE ELETRÔNICA ANALÓGICA

EXPERIÊNCIAS – PARTE PRÁTICA

AN2 – 2ª SÉRIE DE ELETRÔNICA – PERÍODO NOTURNO

**AS EXPERIÊNCIAS FORAM RETIRADAS NA ÍNTEGRA DOS MANUAIS PRÁTICOS DO
EB-2000 – EB 111 e EB 112 – DEGEM SYSTEM**

PROFº GIUSEPPE GIOVANNI MASSIMO GOZZI

**SÃO BERNARDO DO CAMPO
2014**

LABORATÓRIO 1 (REVISÃO) CARACTERÍSTICAS DO DIODO DE JUNÇÃO

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

3. INICIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA PU-2000

PASSO	PRESSIONE	VISOR	OBSERVAÇÕES
1		PC1	Primeira parte do código numérico da placa PC
2	815	815	815 Digitar os três primeiros dígitos do código de placa PC
3	*	PC2	Segunda parte do código numérico da placa PC
4	017	017	Digitar os três últimos dígitos do código da placa PC
5	*	EB-111	Número da Unidade e confirmação da placa PC, apresentados alternadamente
6	*	Id1	Número de identificação do estudante (três primeiros dígitos)
7	No.	No.	Três primeiros dígitos
8	*	Id2	Número de identificação do estudante (próximos três dígitos)
9	No.	No.	Três dígitos seguintes
10	*	Id3	Número de identificação do estudante (três últimos dígitos)
11	No.	No.	Três últimos dígitos
12	*	FN	Seleção de função
13	1	FN1	Selecionar o Modo de Experiência
14	*	E00	Contador de experiência no valor inicial
15	*	E01	Incrementar o contador de experiência

2 PROCEDIMENTO

1. Insira a placa do circuito impresso EB-111 nas guias (trilhas) de cartão e no conector do PU-2000.

2. Localize o circuito que contém o diodo D1. Este circuito situa-se no canto superior esquerdo do circuito impresso. Conecte o miliamperímetro conforme mostra a Fig. 1.

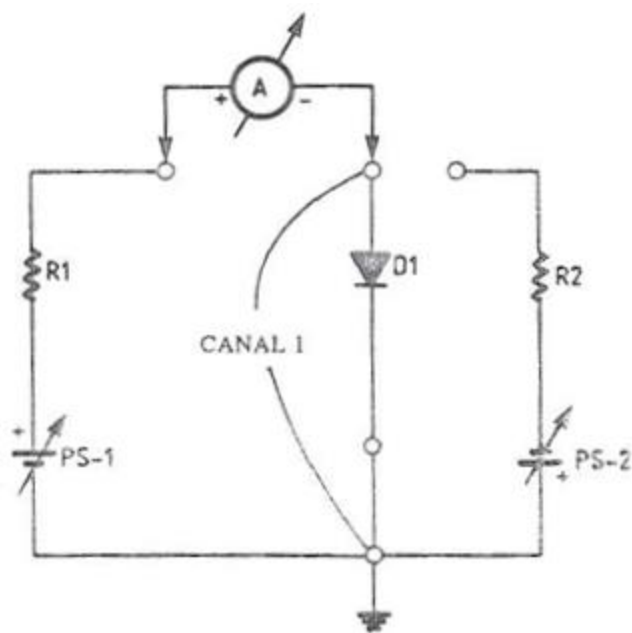


Fig. 1: Polarização Direta

- 3. Conecte o canal 1 do osciloscópio ao circuito, conforme mostra a Fig. 1, de modo a medir a tensão direta no diodo. Use a escala de sensibilidade de 0,1 Volt/divisão para começar. Centralize o traço horizontal na calibração horizontal mais baixa.
- 4. Ligue o sistema e execute o procedimento de inicialização conforme descrito na página de Informações Gerais.
- 5. Ajuste a fonte de alimentação (PS-1) do sistema principal, até obter uma tensão direta sobre o diodo de 0,1V.
- 6. Incremente o indicador de experiência para "2", teclando "*" uma vez. Meça a corrente no circuito.
- 7. Repita os passos 5 e 6 para as tensões da tabela da Fig. 2.

Vdireta(V)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
Idireta(mA)											

Fig: 2: Corrente no Diodo

8. Trace um gráfico com os valores obtidos, tendo a corrente direta I_{direta} (I_F) no eixo vertical e a tensão direta V_{direta} (V_F) no eixo horizontal.

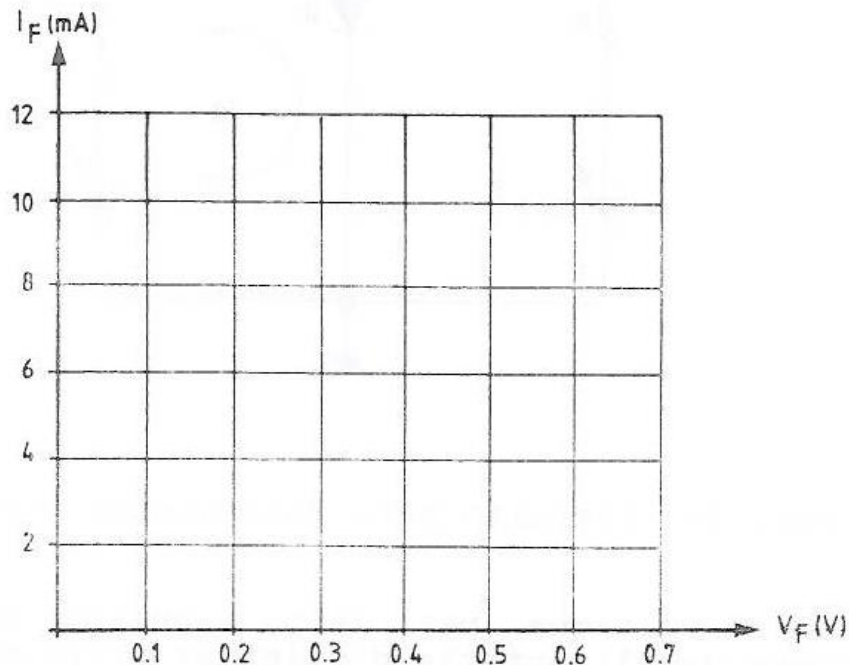


Fig. 3: Característica V-I do Diodo

9. A partir do gráfico, calcule a resistência dinâmica nos pontos $V_{\text{direta}} = 0,5\text{V}$ e $V_{\text{direta}} = 0,65\text{V}$. Use a seguinte equação:

$$\text{Res.dinâmica} = \frac{dV_F}{dI_F}$$

$$R_{\text{direta}} (V_{\text{direta}} = 0,5\text{V}) = \dots\dots\dots$$

$$R_{\text{direta}} (V_{\text{direta}} = 0,65\text{V}) = \dots\dots\dots$$

POLARIZAÇÃO INVERSA

10. Incremente o indicador de experiência para "3", teclando "*" uma vez. Monte o circuito da Fig. 4. Desconecte o osciloscópio do CKT.

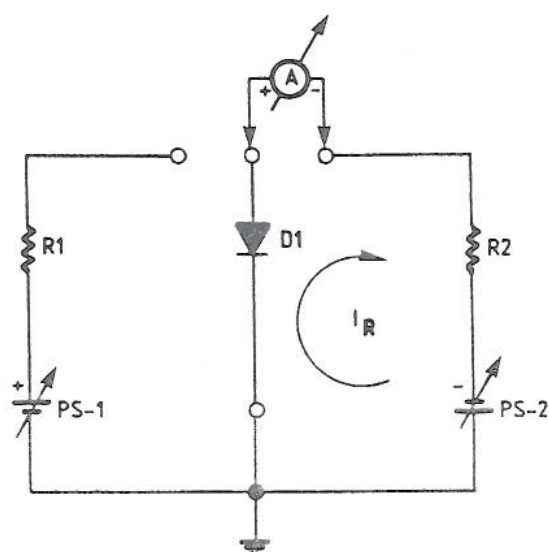


Fig. 4: Circuito para Polarização Inversa

11. Ajuste a voltagem para zero, regulando o potenciômetro PS-2 na fonte de alimentação do sistema principal.
12. Meça a corrente no circuito para as voltagens especificadas na Fig. 5, registrando em seguida os valores. As diferentes voltagens são obtidas ajustando-se o potenciômetro PS-2.

PS-2 (V)	0	-1	-5	-10
----------	---	----	----	-----

Modo Experimental
I _{inversa} (μ A)

Fig. 5: Corrente Inversa

MODO DE PRÁTICA

13. Incremente o contador de experiência para 4. Para introduzir o modo de prática, siga o procedimento da Fig. 6.

PASSO	PRESSIONE	VISOR	COMENTÁRIOS
1	#	"1"	Encerre o Modo de Experiência
2	2	"2"	Selecione uma nova função
3	*	FN	Seleção de função
4	2	FN2	Selecione o Modo de Prática
5	*	P.00	Você está agora no Modo de Prática
6	4	P.04	Selecione o código de falha. Um "4" piscará por um breve período, indicando que a primeira falha foi fixada

Fig. 6: Introduzindo o Modo de Prática

14. Repita as medições para polarização inversa e registre os resultados obtidos na tabela da Fig. 5.

PS-2 (V)	0	-1	-5	-10
Modo Prática				
Iinversa (μA)				

Fig. 5: Corrente Inversa

15. Compare os valores da modalidade prática na Fig. 5 com os valores originais.

16. O componente conectado ao diodo no modo de prática é:

17. Explique por quê a corrente não é zero.

18. Calcule o componente que foi acrescentado ao circuito.

19. Esboce na Fig. 7 o circuito que inclui este componente.

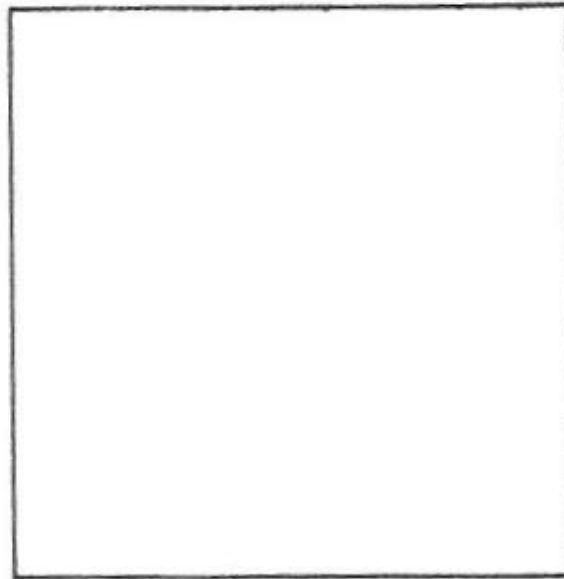


Fig. 7: Diodo Inversamente Polarizado - Novo Circuito
VOLTANDO À MODALIDADE EXPERIMENTAL

20. Antes que se possam desenvolver as próximas atividades de laboratório, você deve voltar ao modo de experiência executando os seguintes passos.

PASSO	PRESSIONE	VISOR	COMENTÁRIOS
1	*	FN	Seleção de Função
2	1	FN1	Retorno ao Modo de Experiência
3	*	E.04	Número do contador de experiência anterior
4	*	E.05	Incremente o contador

Fig. 8: Voltando ao Modo de Experiência

LABORATÓRIO 2 (REVISÃO) O DIODO COMO RETIFICADOR

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

1 PROCEDIMENTO

1. Incremente o contador para 6.
2. Insira a placa do circuito impresso EB-111 nas guias de cartão e no conector do PU-2000.
3. Localize o circuito da Fig. 1, que contém o diodo D2. Este circuito está na porção central superior do circuito impresso.

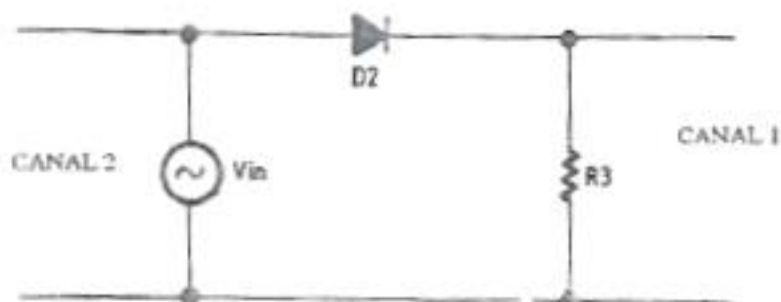


Fig. 1: O Diodo como Retificador

4. Conecte um gerador de sinais aos terminais de Ventrada (V_{in}).
5. Ajuste a saída do gerador de sinais para +4V de pico a pico, com frequência de 200Hz e forma de onda senoidal. Ajuste o "offset" do gerador de sinais em zero volts.
6. Conecte o Canal 2 do osciloscópio de modo a medir Ventrada, e o Canal 1 de modo a medir a tensão nos terminais da carga R3, conforme a Fig. 1. Ambos os canais deverão estar no modo DC.
7. Ajuste a escala de sensibilidade do amplificador vertical do osciloscópio para 1V/div e a da varredura horizontal em 2mseg/div.
8. Incremente o contador de experiência para 7.

9. Esboce na Fig. 2 as formas de onda da tensão de entrada e da tensão nos terminais da carga R3. Há alguma diferença mensurável entre um diodo real e um diodo ideal neste circuito?

10. Ajuste o osciloscópio na modalidade X-Y (Ventrada = X, VR3 = Y), de modo a obter a curva de transferência $VR3 = f(Ventrada)$. Plote a curva de transferência para os valores de Ventrada = -2V a +2V, na Fig. 3.

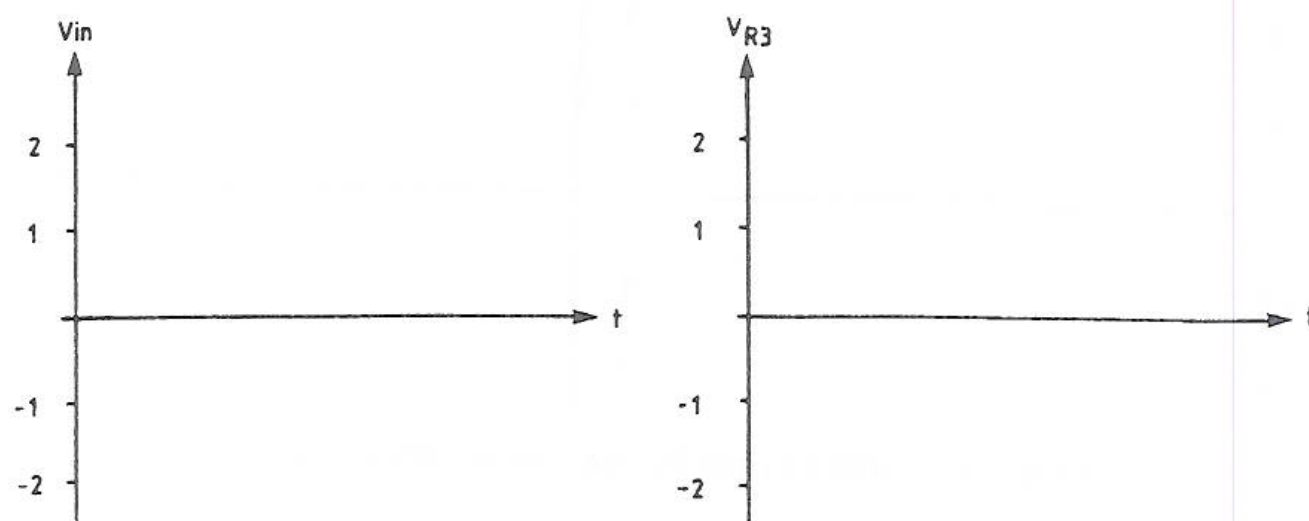


Fig. 2: Retificação da Onda Senoidal

11. Repita todo o procedimento para as ondas triangular e quadrada de 200Hz. Plote as formas de onda nas Figs. 4 e 5.

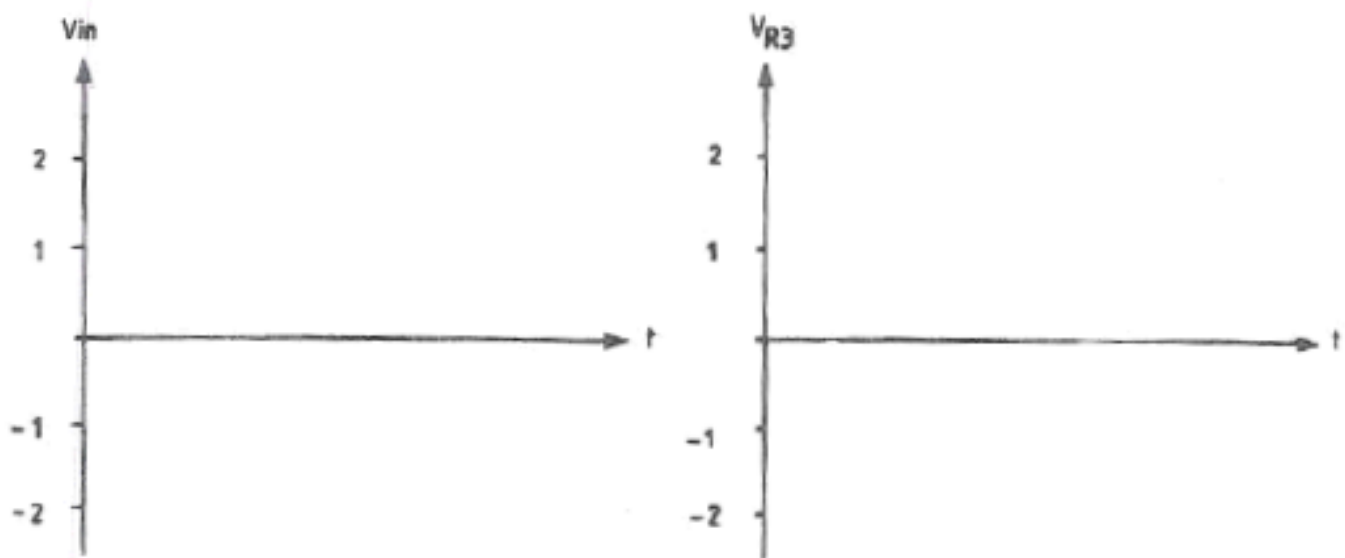


Fig. 4: Retificação da Onda Triangular

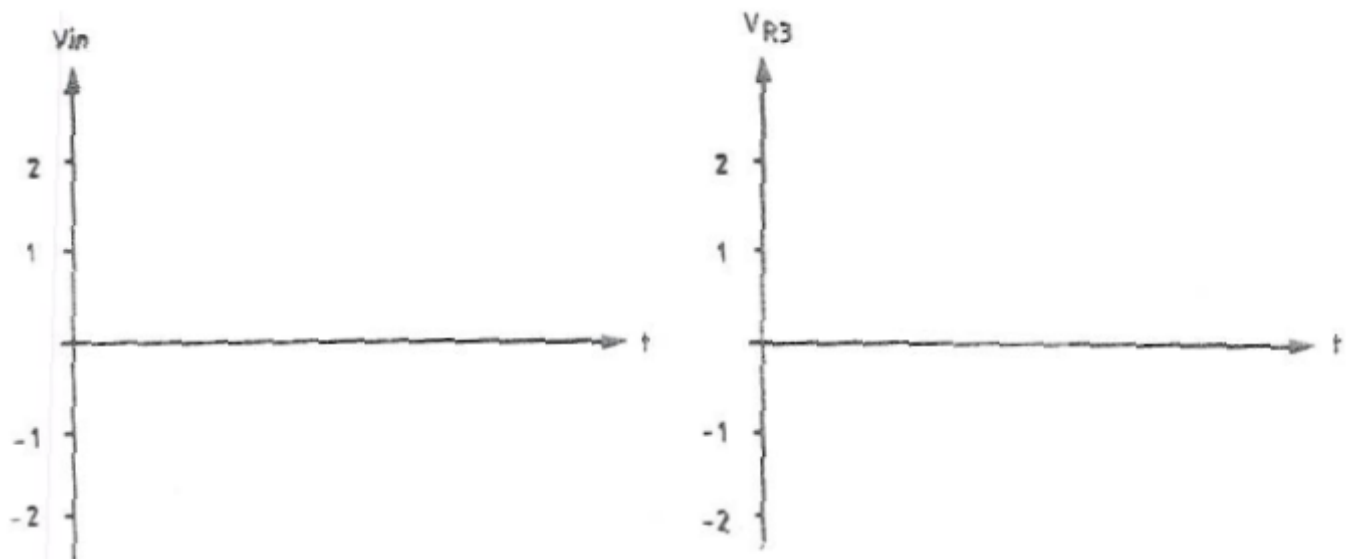


Fig. 5: Retificação da Onda Quadrada

MODO DE PRÁTICA

13. Incremente o contador de experiência para 8.
14. Insira uma onda senoidal de 200Hz.
15. Introduza o modo de prática, executando os seguintes passos:

PASSO	PRESSIONE	VISOR	COMENTÁRIOS
1	#	"1"	Encerre o Modo de Experiência
2	2	"2"	Selecione uma nova função
3	*	FN	Seleção de função
4	2	FN2	Selecione o Modo de Prática
5	*	P.00	Você está agora no Modo de Prática
6	5	P.05	Selecione o código de falha. Um "5" piscará por um breve período, indicando que a primeira falha foi fixada.

Fig. 6: Introduzindo o Modo de Prática

16. Que aconteceu com a forma de onda na saída?
17. Qual a alteração em D2 que causa mudança na forma de onda de saída?
18. Calcule o seu valor e esboce o novo circuito na Fig. 7.

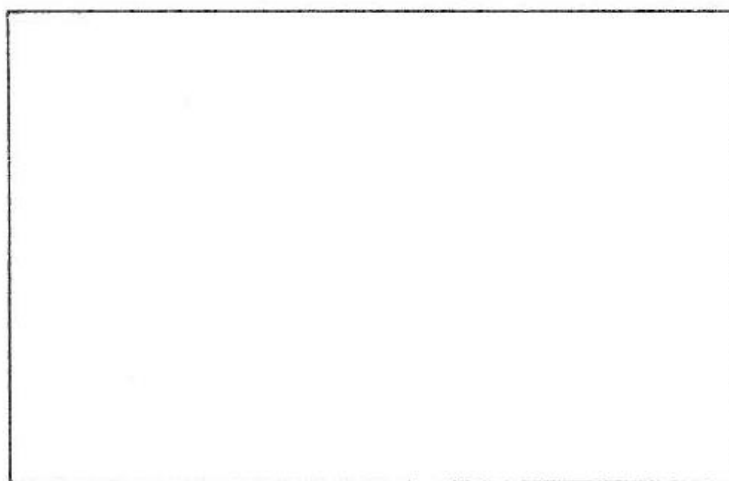


Fig. 7: Novo Circuito

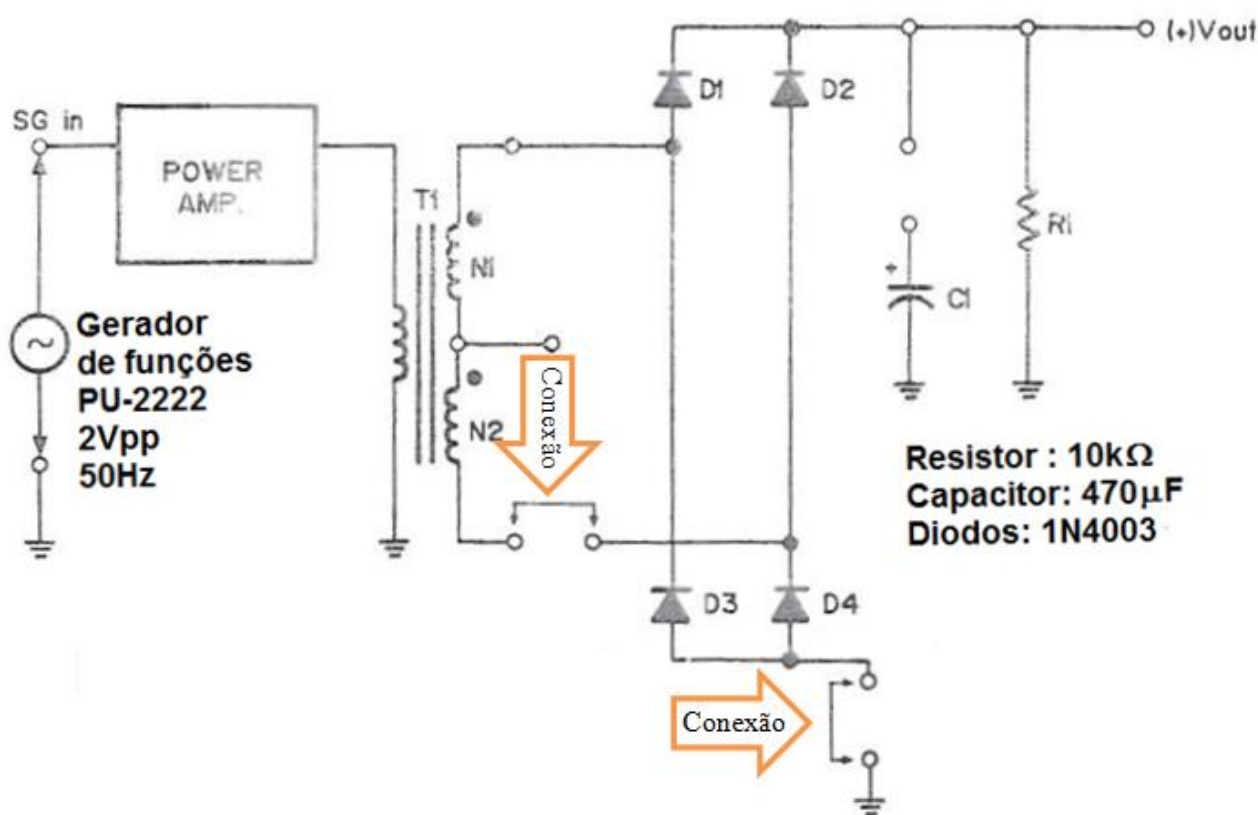
19. Retorne ao modo de experiência, de acordo com o seguinte procedimento:

LABORATÓRIO 3 FONTE DE TENSÃO NÃO REGULADA

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

PARTE 1: SEM FILTRO CAPACITIVO

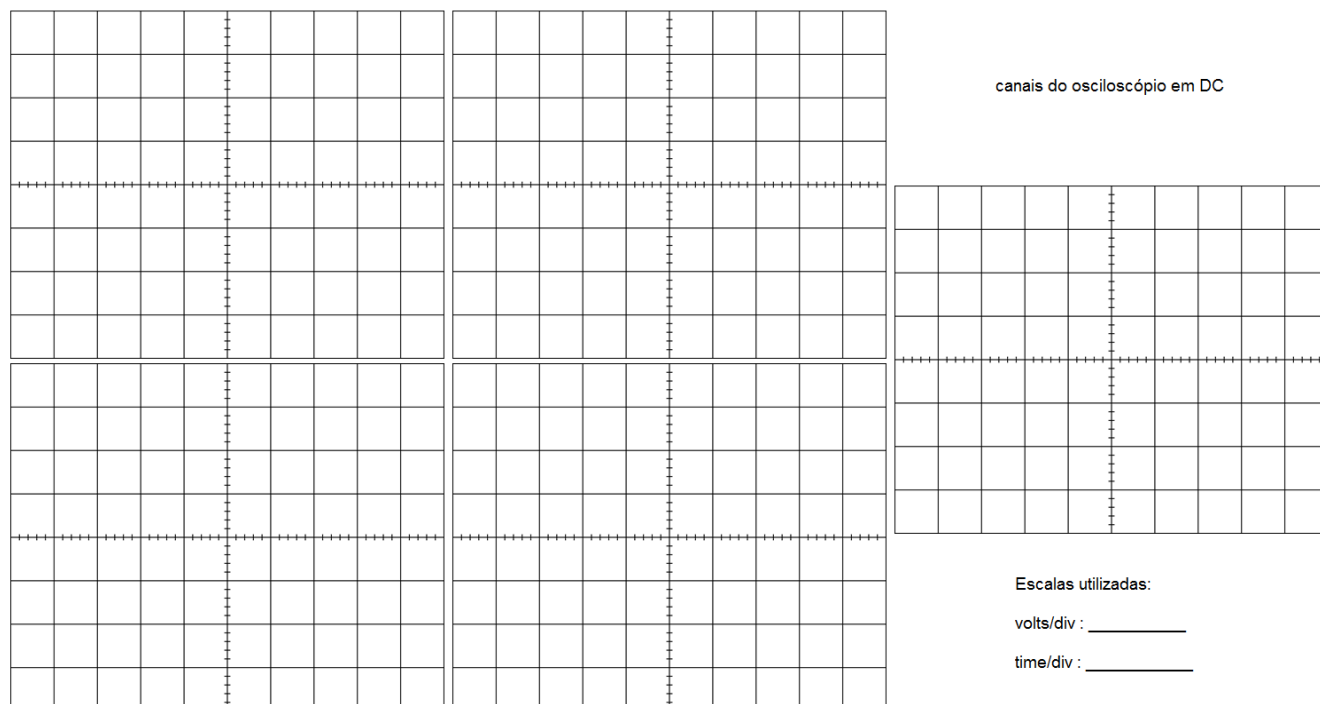
- 1) COLOQUE A PLACA EB-141 NO MÓDULO, **MAS NÃO LIGUE A ENERGIA NO MB-U AINDA.**
- 2) Localize o circuito abaixo no EB 141 e faça as conexões pedidas:



- 3) No gerador de funções do PU-2222, ajuste um sinal senoidal de 2 V de pico a pico com uma frequência de 50 Hz e insira no circuito (SG in). O amplificador de sinal (POWER AMP.) deverá amplificar esse sinal quatro vezes, aproximadamente.
- 4) Agora, ligue o módulo MB-U e digite a seguinte sequência:

PASSO	TECLAR	DISPLAY	COMENTARIOS
1		PC1	Primeira parte do número de código do PCB.
2	213	213	Tecle os 3 primeiros dígitos do código do PCB.
3	*	PC2	Segunda parte do número de código do PCB.
4	284	284	Tecle os 3 últimos dígitos do código do PCB.
5	*	Eb-141	Confirmação do PCB e do número da Unidade mostrados alternadamente.
6	*	Id1	Número de identidade do aluno (3 primeiros dígitos).
7	(número)	(número)	Três primeiros dígitos.
8	*	Id2	Número de identidade do aluno (3 dígitos seguintes).
9	(número)	(número)	Três dígitos seguintes.
10	*	Id3	Número de identidade do aluno (3 últimos dígitos).
11	(número)	(número)	Três últimos dígitos.
12	*	FN	Seleção de Função.
13	1	FN1	Selecione o Modo de Experiência
14	*	E.00	Indicador de experiência no valor inicial.
15	*	E.01	Incremento no indicador de experiência.

- 5) Com o osciloscópio CALIBRADO, meça e anote as formas de onda das tensões de cada diodo e da saída (resistor).

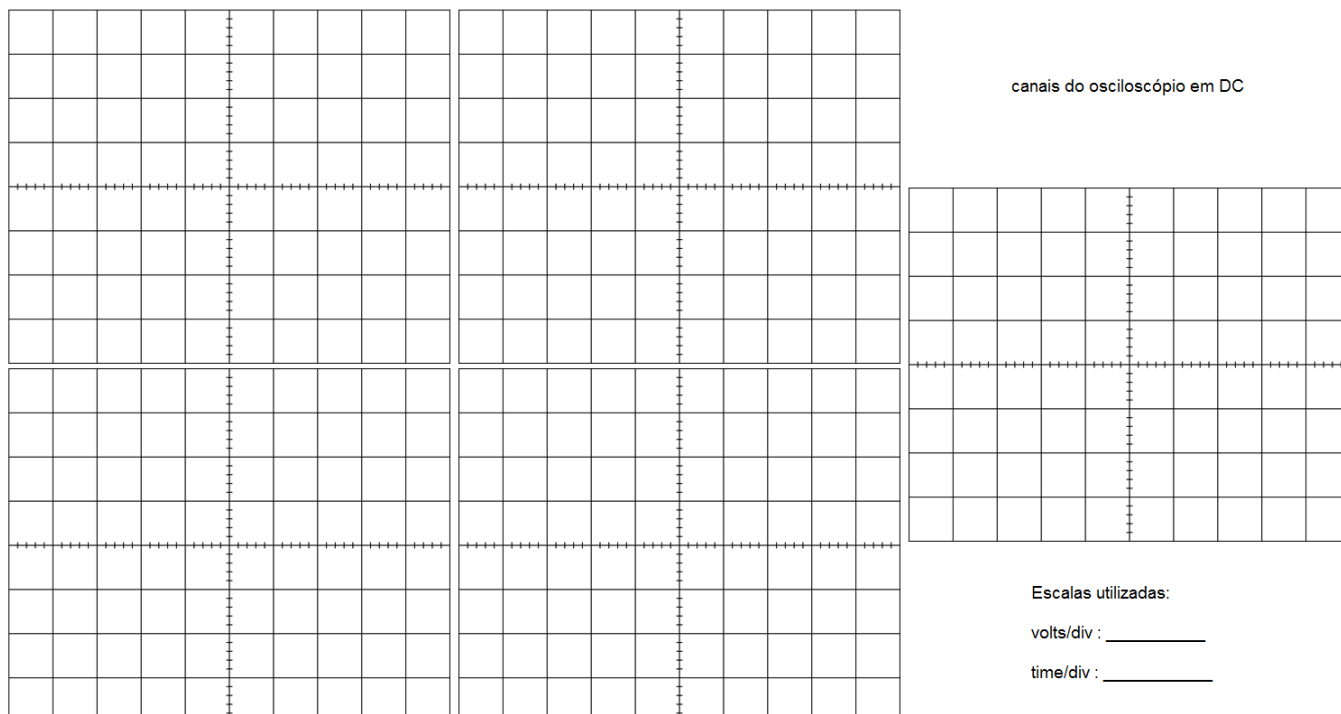


6) Agora, digite a seguinte sequência:

PASSO	TECLAR	VIDEO	COMENTARIOS
1	#	No."1"	Termine o modo de experiência.
2	2	"2"	Selecione uma nova função.
3	*	FN	Seleção de Função.
4	2	FN2	Selecione o Modo de Prática
5	*	P.00	Você está agora no Modo de Prática.
6	5	P.05	Selecione o código de defeito (5). 0 5 piscará por um pequeno intervalo para indicar que o defeito está selecionado.

7) O que aconteceu com a tensão de saída?

8) Verifique novamente as tensões nos diodos e no resistor

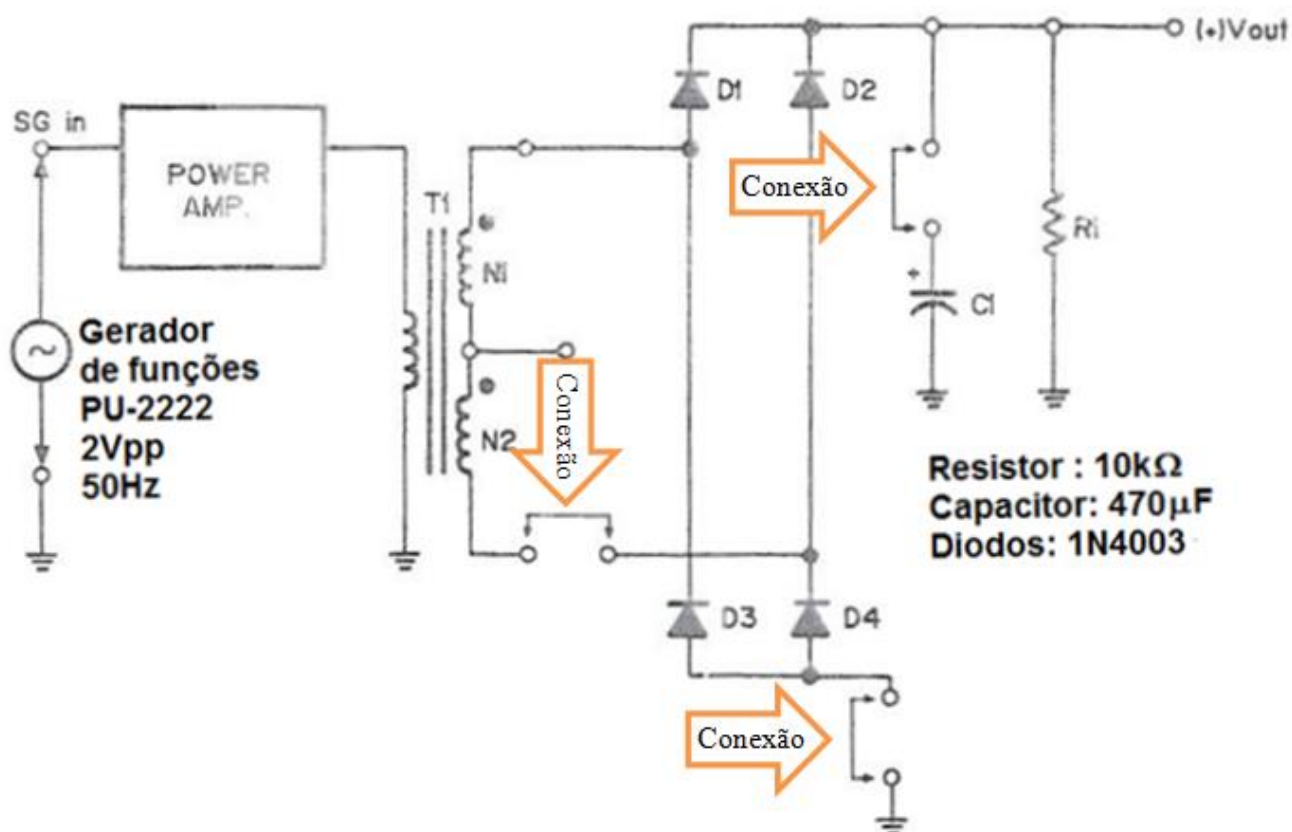


9) Há um defeito na ponte de diodos. Qual é?

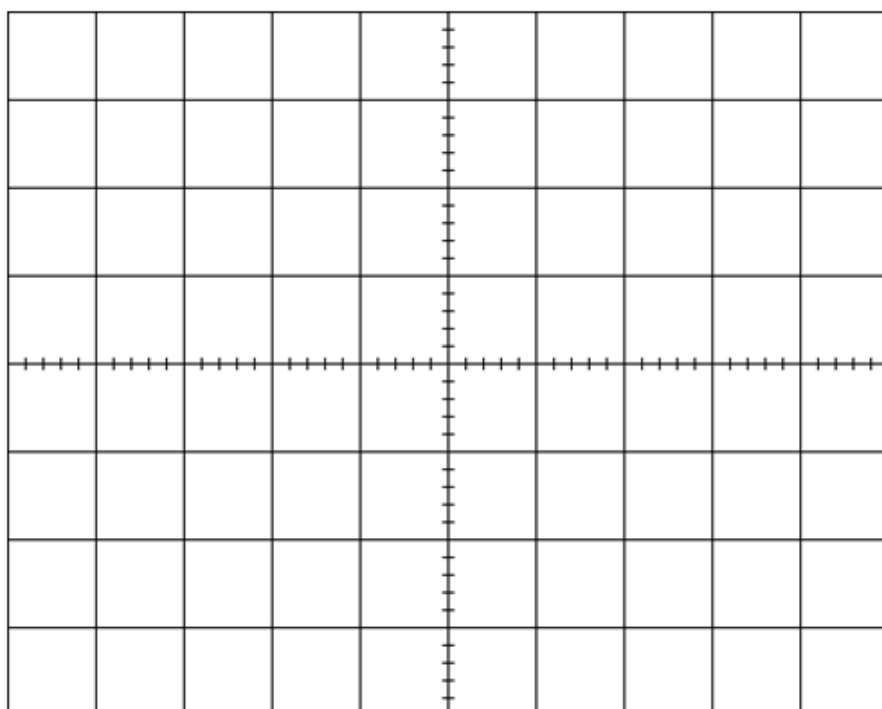
10) Tecle "0" (ZERO) para remover o defeito.

PARTE 2: COM FILTRO CAPACITIVO

11) Insira no circuito o capacitor C1:



12) Meça e anote a saída do circuito com o osciloscópio



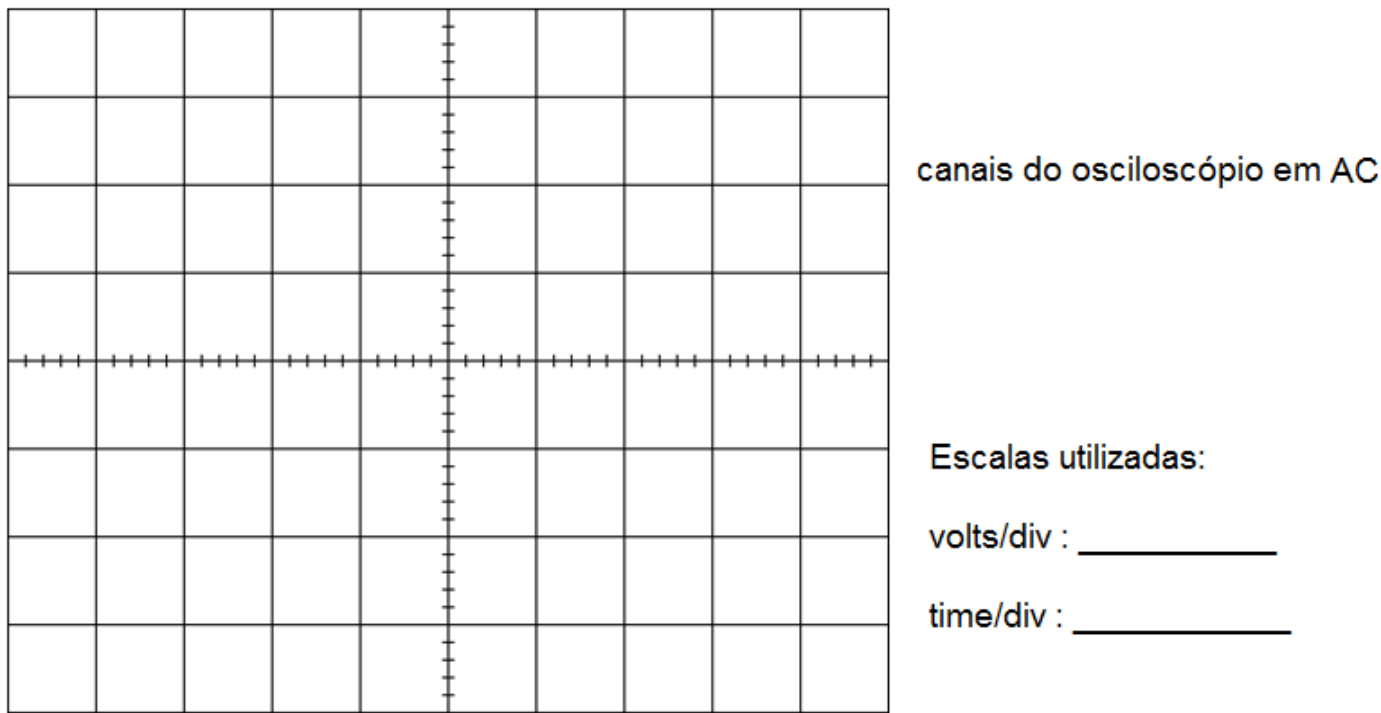
canais do osciloscópio em DC

Escalas utilizadas:

volts/div : _____

time/div : _____

13) Coloque os canais do osciloscópio em AC e meça a ondulação (ripple) na saída do circuito:



14) Digite "4"(CÓDIGO DE DEFEITO 4). O que aconteceu com a ondulação? Por quê?

LABORATÓRIO 4
REGULADOR A DIODO ZENER – 1ª PARTE

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

1.0 OBJETIVOS

Após completar estas atividades de laboratório, você deverá ser capaz de:

- 1.1 Traçar a curva característica de um diodo Zener.
- 1.2 Determinar a tensão nominal Zener (tensão de ruptura) a partir de valores medidos usados para plotar a curva característica.
- 1.3 Testar um circuito regulador a diodo Zener.
- 1.4 Determinar a regulação da tensão a partir de valores medidos.

2. INICIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA PU-2000

PASSO	PRESSIONE	VISOR	OBSERVAÇÕES
1		PC1	Primeira parte do código numérico da placa PC
2	815	815	815 Digitar os três primeiros dígitos do código de placa PC
3	*	PC2	Segunda parte do código numérico da placa PC
4	017	017	Digitar os três últimos dígitos do código da placa PC
5	*	EB-111	Número da Unidade e confirmação da placa PC, apresentados alternadamente
6	*	Id1	Número de identificação do estudante (três primeiros dígitos)
7	No.	No.	Três primeiros dígitos
8	*	Id2	Número de identificação do estudante (próximos três dígitos)
9	No.	No.	Três dígitos seguintes
10	*	Id3	Número de identificação do estudante (três últimos dígitos)
11	No.	No.	Três últimos dígitos
12	*	FN	Seleção de função
13	1	FN1	Selecionar o Modo de Experiência
14	*	E00	Contador de experiência no valor inicial
15	*	E01	Incrementar o contador de experiência

2.0 PROCEDIMENTO

1. Incremente o contador de experiência para 10.

2. Insira a placa do circuito impresso EB-111 nas guias de cartão e no conector do PU-2000.

3. Localize o circuito da Fig. 1, que contém D3. Este circuito situa-se na parte central do lado direito da placa do circuito impresso.

4. Conecte R6 à fonte de tensão variável PS-1, conforme indicado na Fig. 1.

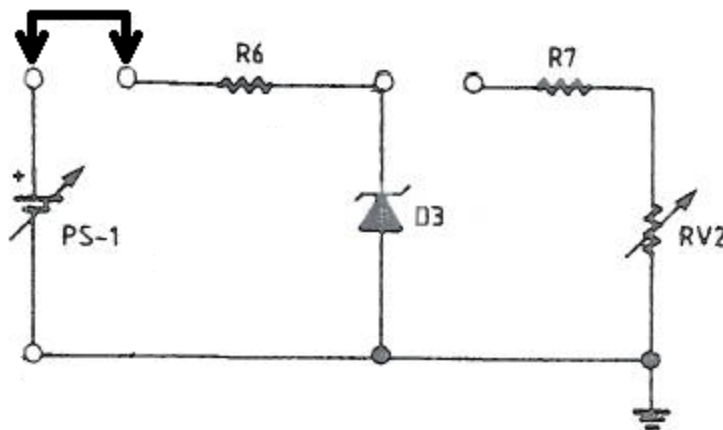
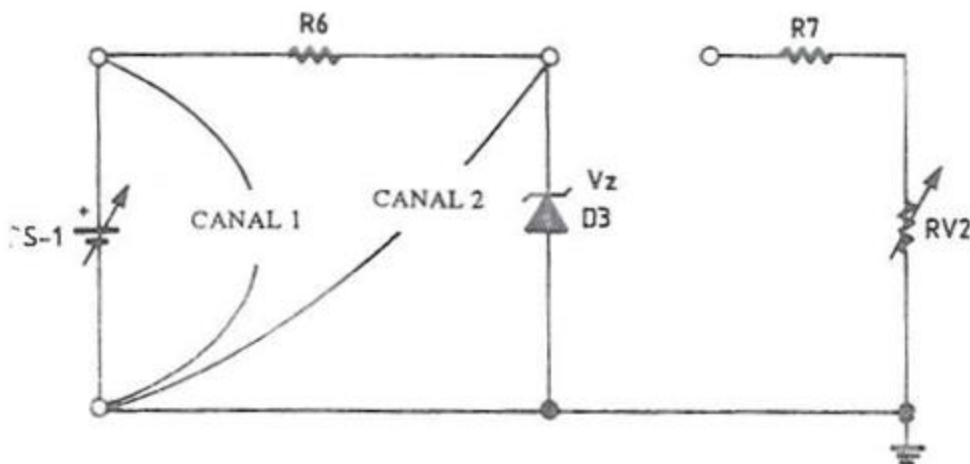


Fig. 1: Regulador a Diodo Zener

5. Conecte o canal 1 do osciloscópio aos terminais de PS-1 e o canal 2 do osciloscópio ao diodo, conforme a Fig. 1.



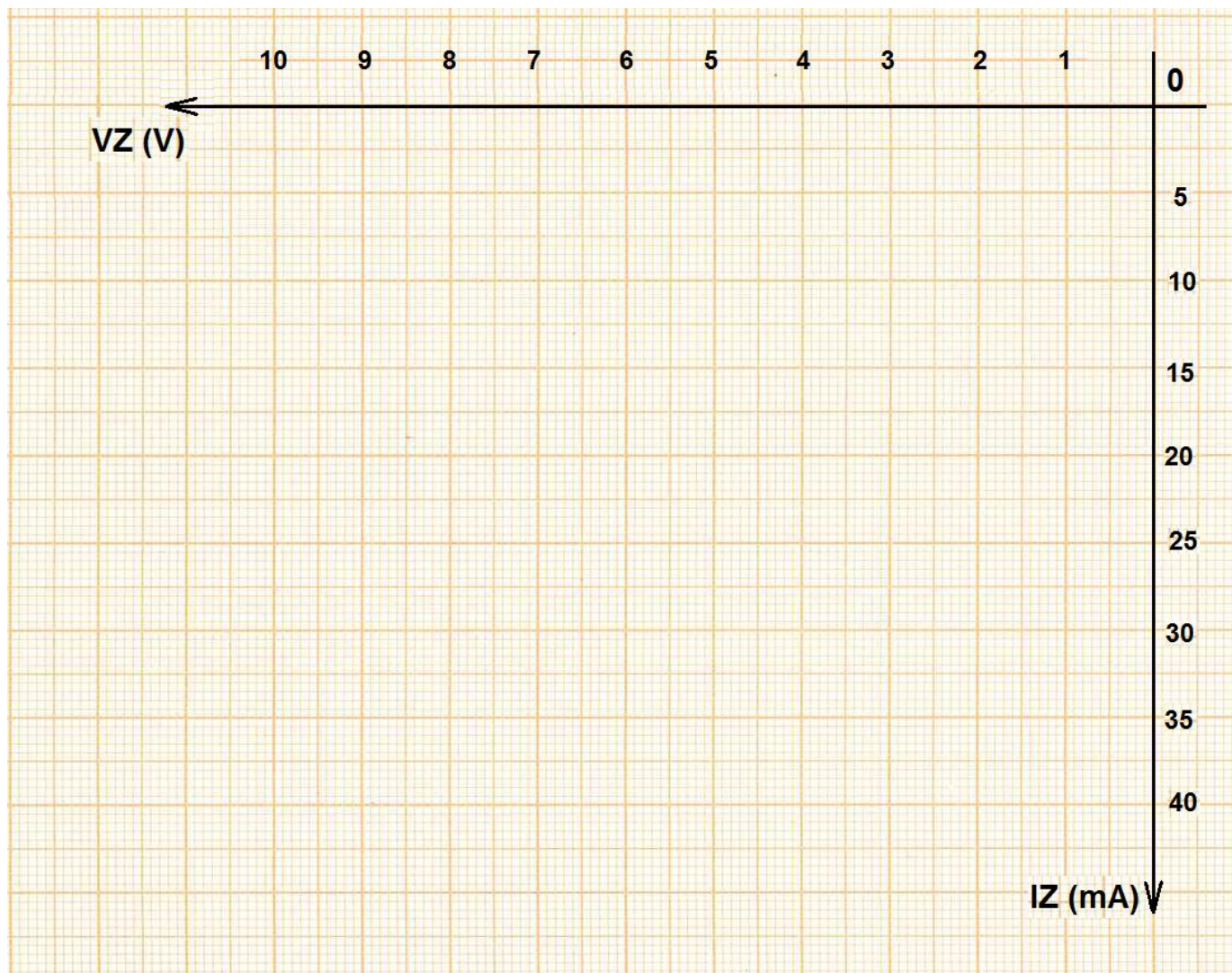
6. Incremente o contador de experiência para 11.
7. Ajuste PS-1 para obter uma entrada como mostrado na tabela da Fig. 2. Inicie com Ventrada = 0V.
8. Meça a tensão Vz nos terminais de D3.
9. Registre seus resultados na tabela da Fig. 2.
10. Repita os passos 7 a 9 para todos os valores de Ventrada mostrados na tabela da Fig. 2.
11. Calcule o seguinte para todos os valores da Fig. 2

$$I_z = \frac{V_{entrada} - V_z}{R_6} \quad R_6 = 150 \text{ ohms}$$

PS-1 (V)	VZ (V) - <i>medido</i>	I _Z (mA) - <i>medido</i>
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Fig.2 : Tensão e Corrente no Zener

12. Trace a curva característica V-I do diodo Zener na Fig.3.



**LABORATÓRIO 5
REGULADOR A DIODO ZENER – 2ª PARTE**

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

1.0 OBJETIVOS

Após completar estas atividades de laboratório, você deverá ser capaz de:

- 1.1 Traçar a curva característica de um diodo Zener.
- 1.2 Determinar a tensão nominal Zener (tensão de ruptura) a partir de valores medidos usados para plotar a curva característica.
- 1.3 Testar um circuito regulador a diodo Zener.
- 1.4 Determinar a regulação da tensão a partir de valores medidos.

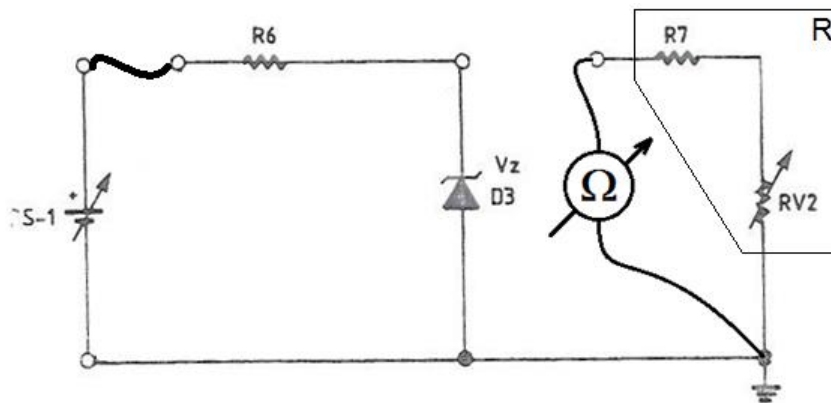
2. INICIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA PU-2000

PASSO	PRESSIONE	VISOR	OBSERVAÇÕES
1		PC1	Primeira parte do código numérico da placa PC
2	815	815	815 Digitar os três primeiros dígitos do código de placa PC
3	*	PC2	Segunda parte do código numérico da placa PC
4	017	017	Digitar os três últimos dígitos do código da placa PC
5	*	EB-111	Número da Unidade e confirmação da placa PC, apresentados alternadamente
6	*	Id1	Número de identificação do estudante (três primeiros dígitos)
7	No.	No.	Três primeiros dígitos
8	*	Id2	Número de identificação do estudante (próximos três dígitos)
9	No.	No.	Três dígitos seguintes
10	*	Id3	Número de identificação do estudante (três últimos dígitos)
11	No.	No.	Três últimos dígitos
12	*	FN	Seleção de função
13	1	FN1	Selecionar o Modo de Experiência
14	*	E00	Contador de experiência no valor inicial
15	*	E01	Incrementar o contador de experiência

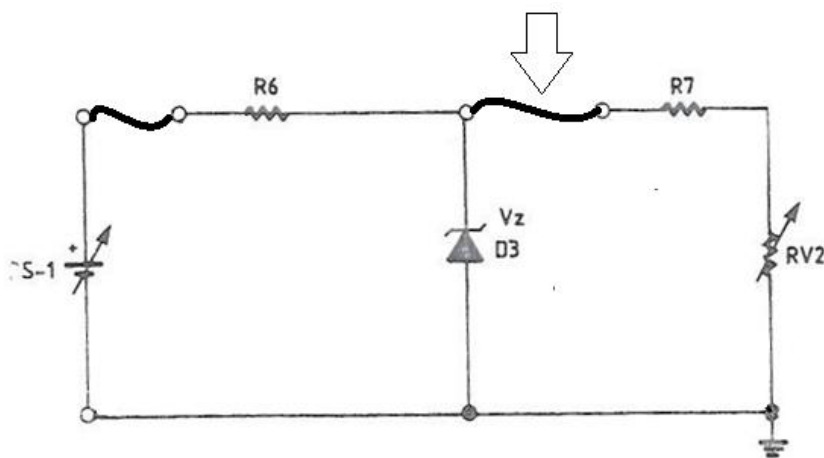
3.0 REGULAÇÃO DA CARGA

13. Incremente o contador de experiência para 12.

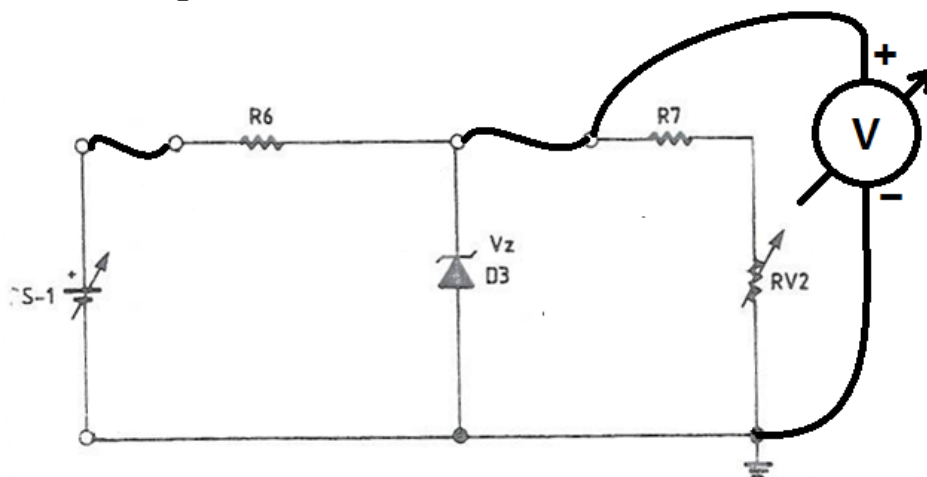
14. Ajuste a resistência $R = (RV2 + R7)$ para 800Ω , utilizando o ohmímetro ($R7=100 \Omega$):



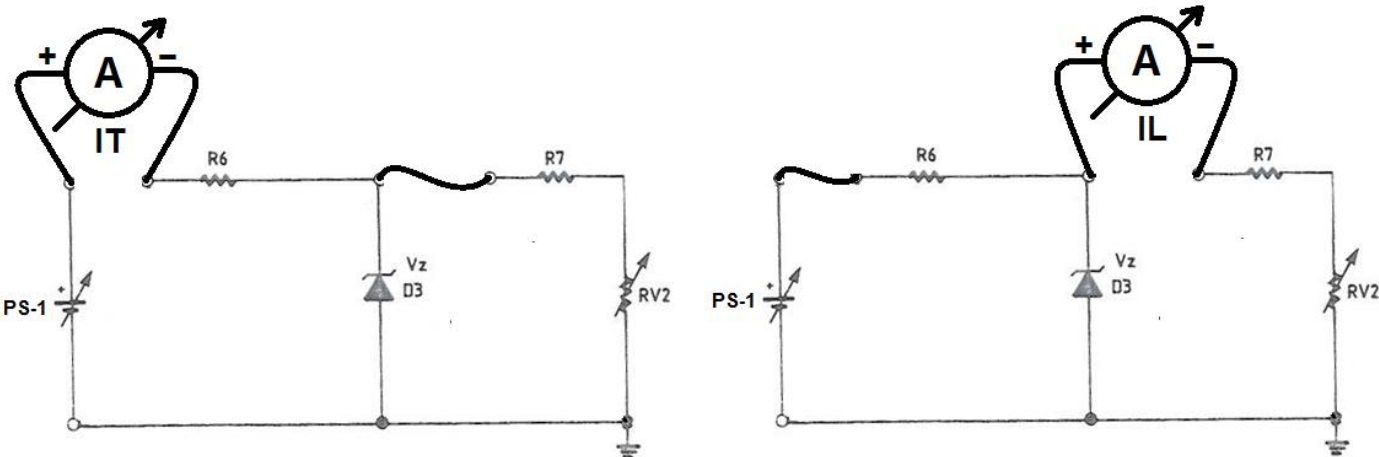
15. Desconecte o ohmímetro e faça a ligação entre D3 e R7 por meio de um “jumper”:



16. Com Ventrada PS-1 = 5V, meça a tensão Vz nos terminais da carga e anote na tabela da Fig. 4.



17. Meça com o amperímetro a corrente total (IT) e a corrente na carga (IL) e anote na tabela da figura 4



17. Varie a tensão de entrada de acordo com a tabela e meça a tensão zener e as correntes total e de carga em cada caso.
18. Incremente o indicador de experiência para 13.
19. Repita a experiência para $R = (RV2 + R7) = 500\ \Omega$; $R = (RV2 + R7) = 200\ \Omega$ e $R = (RV2 + R7) = 100\ \Omega$, como aparece na figura 4:

PS-1 (V)	R = 800 Ω			R = 500 Ω			R = 200 Ω			R = 100 Ω		
	VZ (V)	IT (mA)	IL (mA)	VZ (V)	IT (mA)	IL (mA)	VZ (V)	IT (mA)	IL (mA)	VZ (V)	IT (mA)	IL (mA)
5												
6												
7												
8												
9												
10												

FIGURA 4: Tabela do regulador

20. Calcule a corrente IZ em cada caso e anote na tabela abaixo:

$$I_Z = I_T - I_L$$

PS-1 (V)	R = 800 Ω	R = 500 Ω	R = 200 Ω	R = 100 Ω
	I _Z (mA)	I _Z (mA)	I _Z (mA)	I _Z (mA)
5				
6				
7				
8				
9				
10				

FIGURA 5: Tabela da corrente do zener

MODO DE PRÁTICA

22. Incremente o contador de experiência para 14.

23. Introduza o modo de prática executando o seguinte procedimento:

PASSO	PRESSIONE	VISOR	COMENTÁRIOS
1	#	"1"	Encerre o Modo de Experiência
2	2	"2"	Selecione uma nova função
3	*	FN	Seleção de Função
4	2	FN2	Selecione o Modo de Prática
5	*	P.00	Você está agora no Modo de Prática
6	7	P.07	Selecione o código de falha. Um "7" piscará por um breve período indicando que a primeira falha foi fixada

24. Repita as medições de VZ, IT, IL e cálculo de IZ para um R de 800 Ω. Anote na tabela da figura 6:

PS-1 (V)	R = 800 Ω			
	VZ (V)	IT (mA)	IL (mA)	IZ (mA)
5				
6				
7				
8				
9				
10				

FIGURA 5: Tabela no modo de prática

25. Compare os resultados e explique a diferença.
26. O diodo Zener atua como regulador de tensão, agora?
27. O dispositivo acrescentado ao circuito é e está conectado
28. Retorne ao modo de experiência seguindo o procedimento abaixo descrito.

PASSO	PRESSIONE	VISOR	COMENTÁRIOS
1	*	FN	Seleção de Função
2	1	FN1	Retorne ao Modo de Experiência
3	*	E.14	Número do contador da experiência anterior
4	*	E.15	Incremente o contador

LABORATÓRIO 6
CARACTERÍSTICAS DO TRANSISTOR BIPOLAR

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

1.OBJETIVOS

- 1.1 Traçar as curvas características de entrada de um transistor a partir de valores medidos.
- 1.2 Determinar o valor do ganho de corrente (β) a partir de valores medidos.
- 1.3 Testar um circuito em emissor comum para determinar se o mesmo é uma fonte de corrente constante.
- 1.4 Identificar as regiões ativas, de saturação e de corte, na família de curvas características.
- 1.5 Determinar o ganho de corrente (β) a partir da família de curvas de saída.

1. PROCEDIMENTO

INICIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA PU-2000

PASSO	PRESSIONE	VISOR	OBSERVAÇÕES
1		PC1	Primeira parte do código numérico da placa PC
2	815	815	815 Digitar os três primeiros dígitos do código de placa PC
3	*	PC2	Segunda parte do código numérico da placa PC
4	017	017	Digitar os três últimos dígitos do código da placa PC
5	*	EB-111	Número da Unidade e confirmação da placa PC, apresentados alternadamente

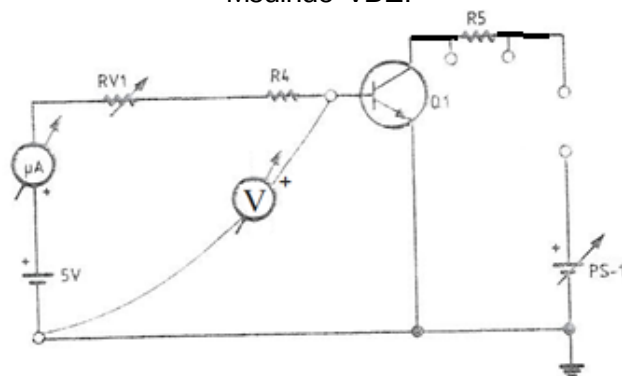
6	*	Id1	Número de identificação do estudante (três primeiros dígitos)
7	No.	No.	Três primeiros dígitos
8	*	Id2	Número de identificação do estudante (próximos três dígitos)
9	No.	No.	Três dígitos seguintes
10	*	Id3	Número de identificação do estudante (três últimos dígitos)

INICIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA PU-2000

PASSO	PRESSIONE	VISOR	OBSERVAÇÕES
11	No.	No.	Três últimos dígitos
12	*	FN	Seleção de função
13	1	FN1	Selecionar o Modo de Experiência
14	*	E00	Contador de experiência no valor inicial
15	*	E01	Incrementar o contador de experiência

1. Incremente o contador de experiência para 16.
2. Insira a placa do circuito impresso EB-111 nas guias de cartão e no conector do PU-2000.
3. Localize o circuito que contém o transistor Q1. Este circuito está situado no canto superior direito da placa EB-111 e é mostrado na Fig. 1.
4. Conecte o seguinte circuito e ligue o microamperímetro e o voltímetro conforme ilustrado na Fig. 1.

Medindo VBE:



Medindo VCE:

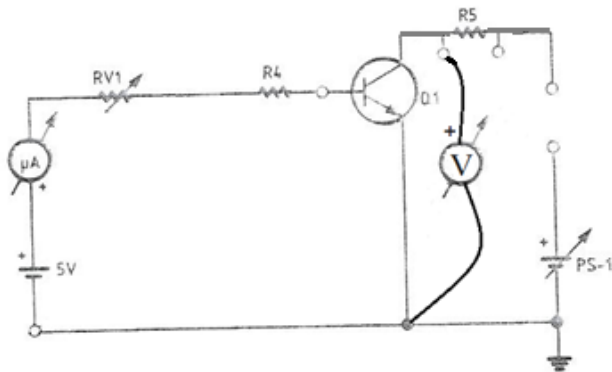


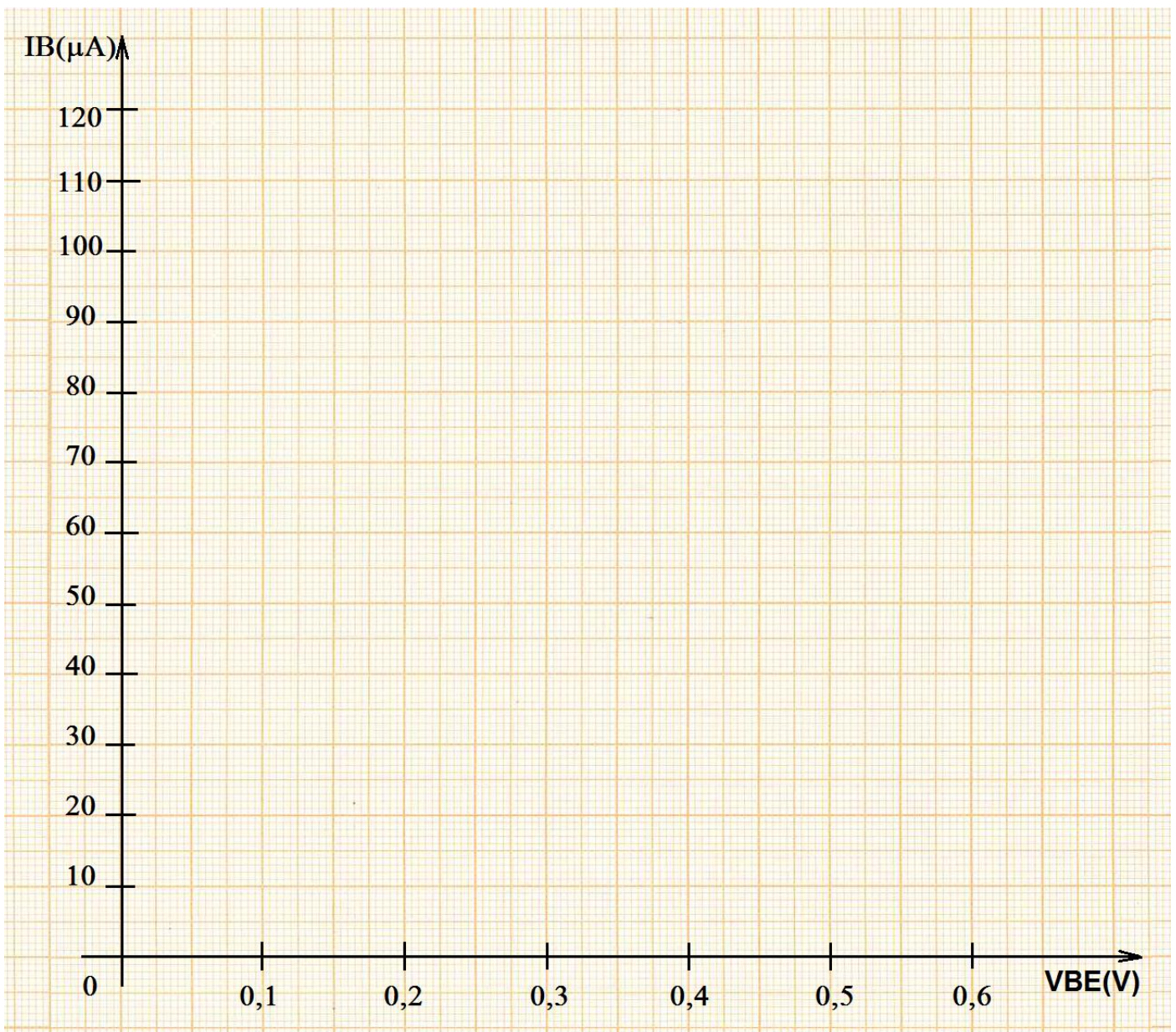
Fig. 1: Características de Entrada do Transistor Bipolar

5. Ajuste RV1 de modo a obter diversas correntes de base conforme a Fig. 2.
6. Para cada valor de corrente de base, meça a tensão entre base e terra, registrando os resultados na Fig. 2.

IB (μA)	VBE (V)	VCE (mV)
10		
15		
20		
25		
30		
40		
50		
60		
70		
90		
100		
105		
110		
115		
120		

Fig. 2: Ganho de Corrente

7. Trace o gráfico de corrente de base versus tensão base-emissor na Fig. 3.

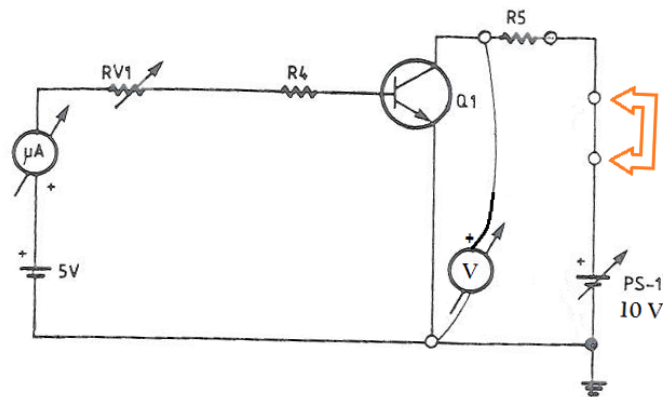


GANHO DE CORRENTE

8. Incremente o indicador de experiência para 17. Conecte o circuito ilustrado na Fig. 4.

9. Ajuste a tensão de PS-1 para 10V.

MEDINDO IB:



MEDINDO IC:

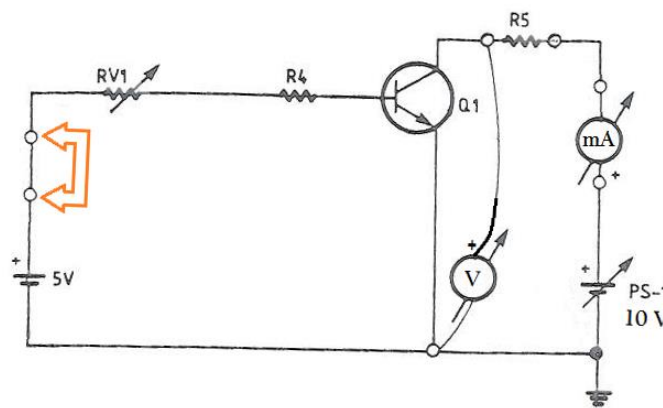


Fig. 4: Ganho de Corrente

10. Varie a corrente de base através do potenciômetro RV1, como mostrado na figura 5.

IB (μA)	IC (mA)	β	VCE (V)
10			
15			
20			
25			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			
105			
110			
115			
120			

Fig. 5

LABORATÓRIO 7

AMPLIFICADOR TRANSISTORIZADO BÁSICO I

1.0 OBJETIVOS

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

Após completar essas atividades de laboratório, você deverá ser capaz de:

- 1.1 Determinar a corrente de base a partir de medições de tensão nos terminais de um resistor de valor conhecido.
- 1.2 Determinar o ganho de tensão de um amplificador transistorizado a partir de valores medidos.
- 1.3 Determinar o ganho de corrente de um amplificador transistorizado a partir de valores medidos.
- 1.4 Determinar o ganho de potência a partir de ganhos de tensão e de corrente.
- 1.5 Determinar o motivo por que a forma de onda da tensão de saída é distorcida.

2.0 EQUIPAMENTO NECESSÁRIO

- 1 Multímetro
- 1 Gerador de Sinais
- 1 Osciloscópio de duplo traço
- 1 Unidade Central de Processamento PU-2000
- 1 Placa de Circuito impresso EB-111
- 1 Placa Mestra

3.0 DISCUSSÃO

Deve-se escolher um ponto de operação CC adequado, de modo que o amplificador funcione corretamente. O valor de VCE deve ser aproximadamente igual à metade de PS-1 a fim de permitir a geração de um sinal de CA simétrico na saída.

4.0 PROCEDIMENTO

2. Insira a placa do circuito impresso EB-111 nas guias de cartão e no conector do PU-2000.

3. Localize o circuito da Fig. 1 que contém o transistor Q4. Este circuito situaa-se na parte inferior esquerda da placa.

PONTO DE OPERAÇÃO CC

4. Monte o circuito da Fig. 1. Ajuste PS-1 para 10 Volts.

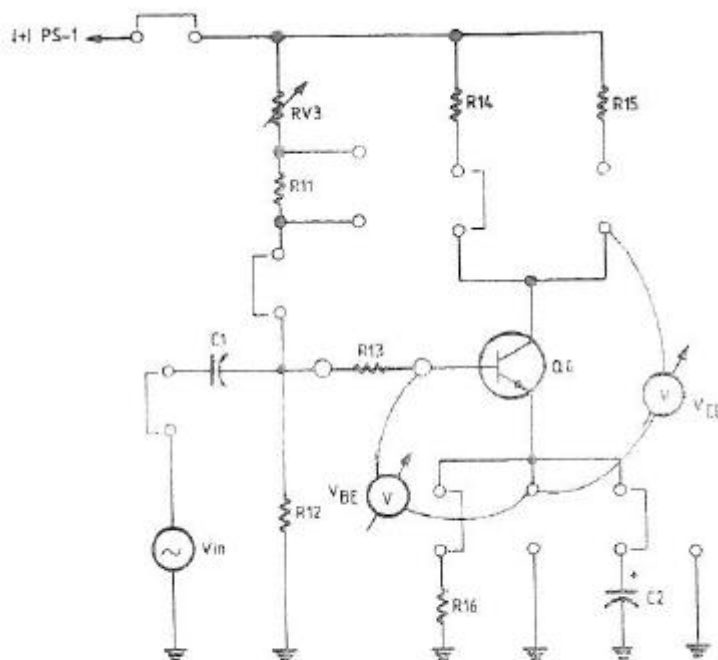


Fig. 1: Amplificador Transistorizado

5. Ajuste RV3 para obter $V_{CE} = 5V$, que é aproximadamente metade da tensão de alimentação do coletor.

6. Meça o seguinte:

$$V_{BE} = \dots\dots\dots V \quad V_{CE} = \dots\dots\dots V$$

$$V_{R16} = V_{EN} = \dots\dots\dots V \quad V_{R13} = \dots\dots\dots V$$

Onde V_{EN} é a tensão entre emissor e terra.

7. Calcule:

$$I_C = \frac{PS-1 - (V_{CE} + V_{EN})}{R_{14}} = \dots\dots\dots \text{mA} \quad R_{14} = 4,7 \text{ Kohm}$$

8. Calcule:

$$I_B = \frac{V_{R13}}{R_{13}} = \dots\dots\dots \mu\text{A} \quad R_{13} = 22 \text{ Kohm}$$

9. Calcule o ganho de corrente CC: $\beta = \frac{I_C}{I_B} = \dots\dots\dots$

AMPLIFICAÇÃO DE CA

24. Conecte o gerador de sinais ao terminal de entrada.

25. Ajuste o gerador para uma onda senoidal de 2KHz.

26. Monitore o sinal de entrada do gerador de funções com um canal do osciloscópio, como ilustrado na Fig.4.

27. Monitore a tensão de coletor com o segundo canal, como ilustra a Fig. 4.

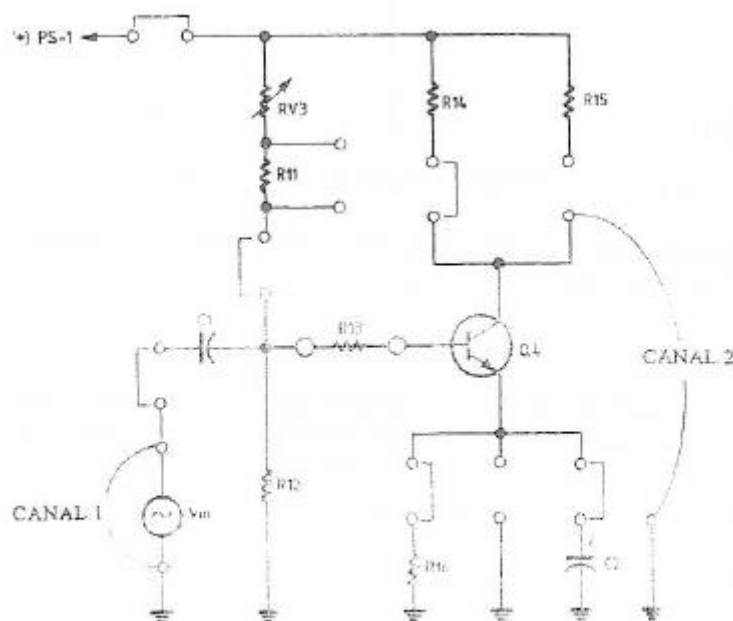


Fig.4 : Amplificador de CA

28. Desconecte temporariamente o gerador de sinais. Ajuste RV3 para obter $V_{CE} = 5\text{volt}$ e reconecte o gerador de sinais.

29. Ajuste a saída do gerador de sinais de modo a obter um sinal sem distorção de 4 Volt pico-a-pico.

30. Registre os resultados na Fig. 5.

V_{out} significa $V_{saída}$ e R_L significa R_{carga} .

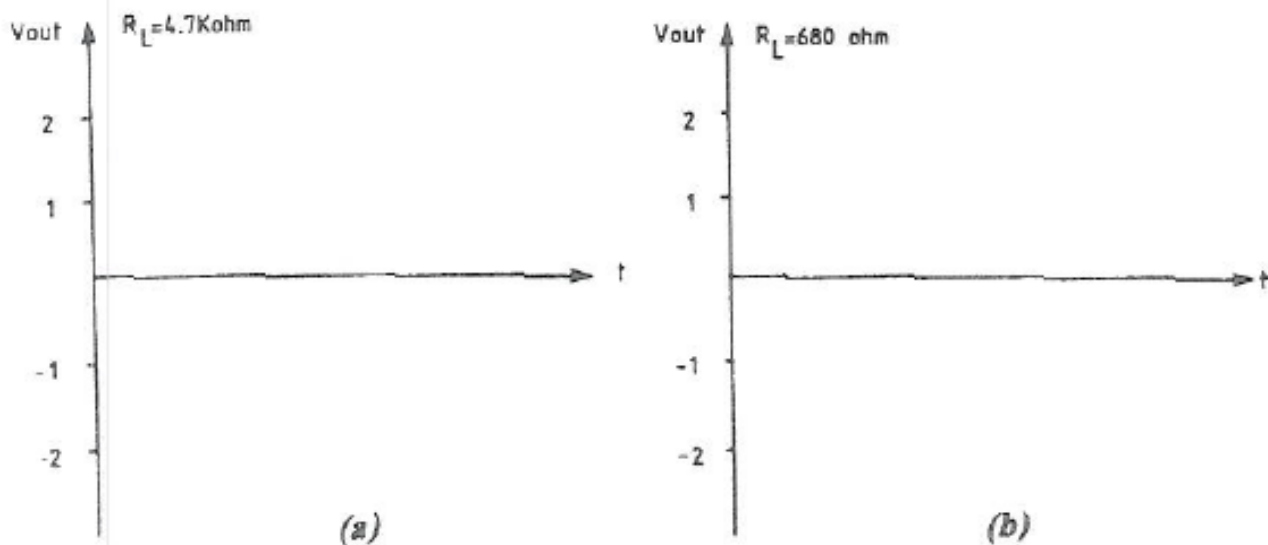


Fig. 5: Amplificação de CA

31. Calcule o ganho de tensão de CA, $V_{saída}/V_{entrada}$, e anote o resultado na tabela da Fig. 6.

	Ganho de tensão (A_v)	Ganho de Corrente (A_i)	Ganho de Potência (A_p)
$R_{carga} = 4,7\text{ Kohm}$			
$R_{carga} = 680\text{ ohm}$			

Fig. 6: Ganho do Circuito

33. Desconecte o capacitor de bypass C2.
34. O que acontece ao ganho de tensão?
35. Reconecte C2.
36. Desconecte temporariamente o gerador de sinais.
37. Ajuste RV3 para obter uma tensão de operação VCE igual a 8 Volt.

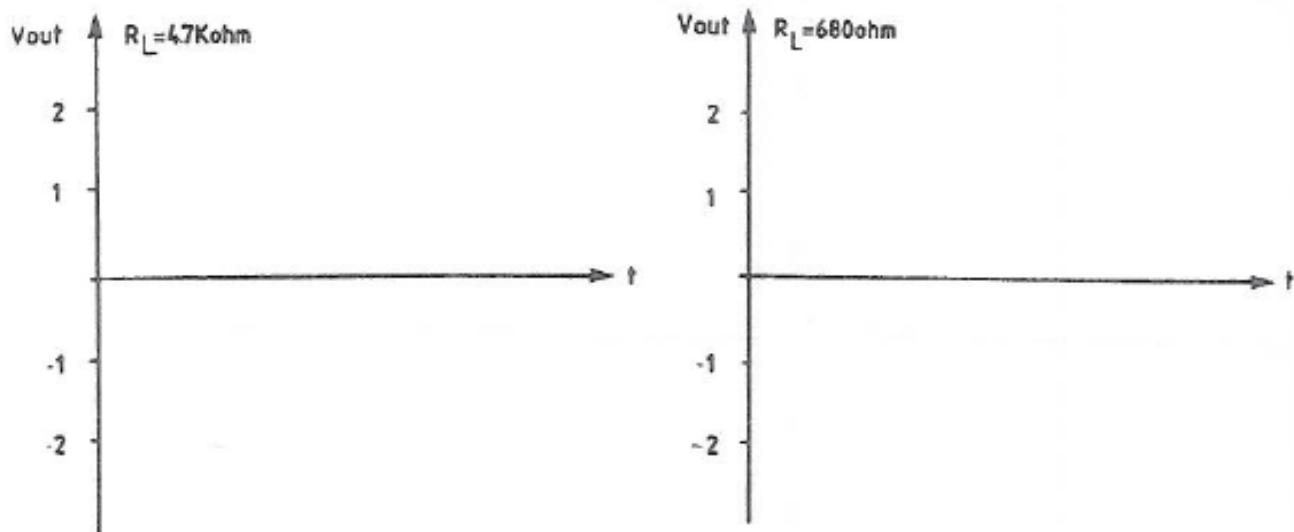


Fig. 7: Distorção na Tensão de Saída Devido ao Ponto de Operação Não-linear

38. Reconecte o gerador de sinais. Ajuste o gerador de modo a obter uma saída distorcida.
39. Esboce a forma de onda da tensão de saída na Fig. 7.
40. Explique a causa da distorção.
41. O sinal de CA força o transistor a operar fora da região ativa? Se positivo, para que região de operação o transistor é levado?

43. Desconecte temporariamente o gerador de sinais.
44. Ajuste RV3 para obter um ponto de operação com $V_{CE} = 2,5$ V. Faça um curto-circuito nos terminais de R11 utilizando um "jumper", caso o alcance ("range") de RV3 não seja suficiente para obter o ponto de operação desejado.
45. Reconecte o gerador de sinais, de modo a obter uma saída amplificada distorcida.
46. Esboce a tensão de saída na Fig. 8.
47. Explique a causa das distorções.

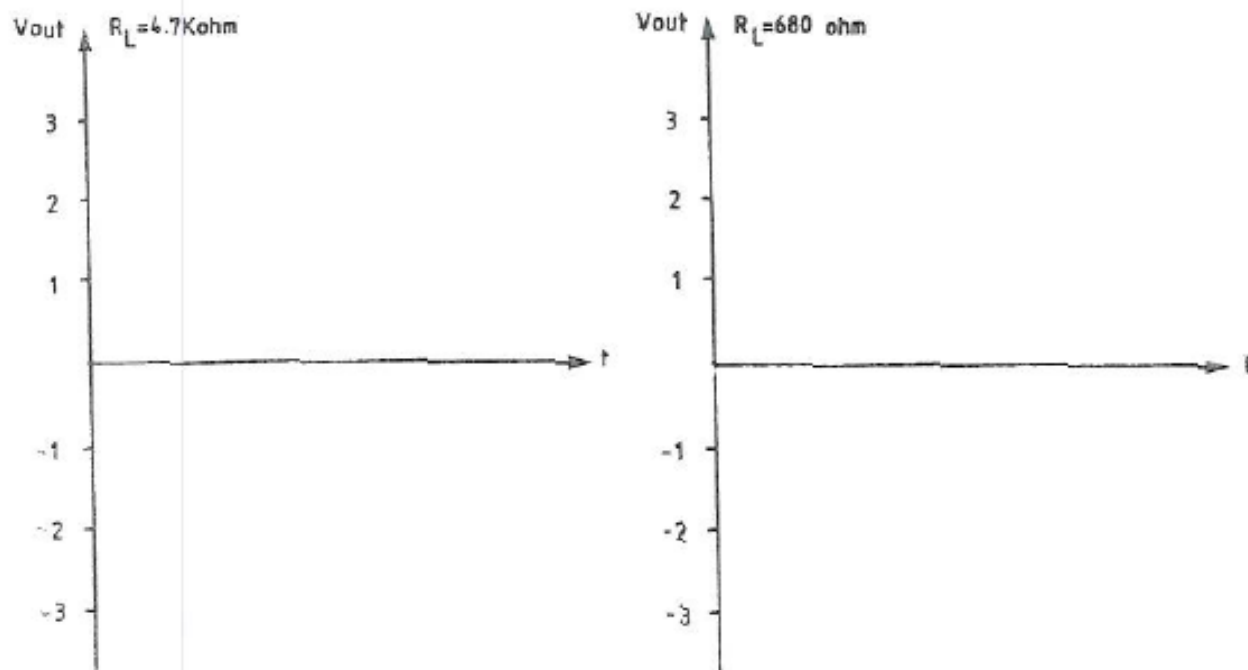


Fig. 8: Distorção da Tensão de Saída Devido ao Ponto de Operação Não-Linear

48. Para que região de operação o transistor é levado pelo sinal de CA?
50. Repita a experiência do passo 28 a 40 com uma resistência de coletor igual a 680 ohm no lugar do resistor de 4,7K ohm, desconectando R14 e conectando R15 ao circuito. Faça um curto-circuito nos terminais de R11 usando um "jumper" para obter o ponto de operação requerido caso o alcance ("range") de RV3 não seja suficiente.

51. Calcule o ganho de corrente da seguinte equação:

$$A_i = \frac{I_{saída}}{I_{entrada}} = \frac{V_{saída}/R_{saída}}{V_{entrada}/R_{entrada}} = A_v \frac{R_{entrada}}{R_{saída}}$$

Admita que $R_{entrada} = R_{12} // R_{13}$ (desprezando a resistência de base) e que $R_{saída} = R_{carga}$. Registre o resultado na tabela da Fig. 6.

52. Calcule o ganho de potência, isto é, o produto dos ganhos de corrente e de tensão. Anote seus resultados na tabela da Fig. 6.

$$A_p = A_v \cdot A_i$$

LABORATÓRIO 8

AMPLIFICADOR TRANSISTORIZADO BÁSICO II

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

1.0 OBJETIVOS

Após completar estas atividades de laboratório, você deverá ser capaz de:

- 1.1 Determinar a resposta de frequência de um amplificador transistorizado a partir de valores medidos.
- 1.2 Medir o tempo de ascensão de amplificador transistorizado.
- 1.3 Testar um amplificador inversor.

2.0 EQUIPAMENTO NECESSÁRIO

- 1 DMM
- 1 Gerador de Sinais
- 1 Osciloscópio de duplo traço
- 1 Placa de Circuito impresso EB-111
- 1 Unidade Central de Processamento PU-2000
- 1 Placa Mestra

3.0 DISCUSSÃO

A resposta de frequência de um amplificador transistorizado é afetada por: capacitores, os quais determinam o limite inferior de frequências, e parâmetros dos transistores e diversas capacitâncias de dispersão de circuito, que influenciam o limite superior de frequências.

O transistor também pode funcionar como um inversor digital.

O tempo de ascensão é uma medida do tempo de resposta de um circuito, sendo usualmente definido como o tempo necessário para que o sinal de saída aumente de 10% para 90% do seu valor final.

4.0 PROCEDIMENTO

RESPOSTA DE FREQUÊNCIAS

2. Insira a placa do circuito impresso EB-111 nas guias de cartão e no conector do PU-2000.
3. Localize o circuito da Fig. 1 que está situado no lado inferior esquerdo.
4. Monte o circuito como mostrado na Fig. 1.

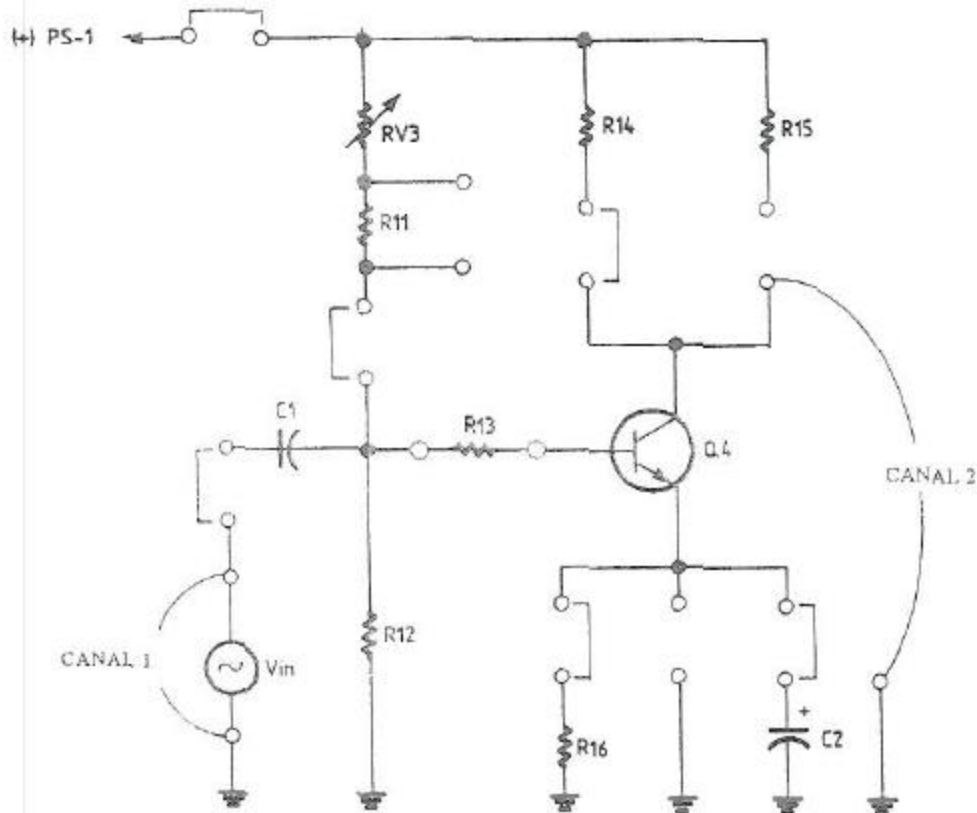


Fig. 1: Resposta de Frequências do Amplificador de CA

5. Ajuste RV3 para obter $V_{CE} = 5V$.
6. Fixe o gerador de sinais em 100 Hz e ajuste a amplitude do sinal de modo a obter um pico-a-pico de 6V na saída do coletor (meça com o osciloscópio).
7. Registre a tensão pico-a-pico de saída na tabela da Fig. 2.
8. Meça a tensão da entrada pico-a-pico e anote o resultado na Fig. 2.

FREQÜÊNCIA (Hz)	100	200	500	1000	2000	5000	10K	20K	50K	100K
TENSÃO DE SAÍDA (p-p)										
TENSÃO DE ENTRADA (p-p)										
GANHO DE TENSÃO										

Fig. 2: Resposta de Freqüências

10. Repita as medições para todas as freqüências listadas na Fig. 2.
11. Desconecte C2 para introduzir retroalimentação ("feedback") negativa no sinal de CA.
12. Ajuste o gerador de sinais de modo a obter na saída do coletor uma tensão pico-a-pico de 3V.
13. Anote as tensões de entrada e de saída para as diversas freqüências listadas na tabela da Fig. 3.
14. Complete a seqüência: "a retroalimentação negativa de CA (diminuiu, aumentou) o ganho de tensão e (diminuiu, aumentou) a largura de faixa do amplificador".

FREQÜÊNCIA (Hz)	20	50	100	200	500	1K	2K	5K	10K	20K	50K	100K
TENSÃO DE SAÍDA (p-p)												
TENSÃO DE ENTRADA (p-p)												
GANHO DE TENSÃO												

Fig.3: Resposta de Freqüências com Retroalimentação Negativa

MEDIÇÃO DO TEMPO DE ASCENSÃO

16. Troque o sinal senoidal de entrada por uma onda quadrada de frequência igual a 20 KHz.

17. Desconecte o capacitor C2.

18. Meça o Tempo de Ascensão, apresentando em um canal a tensão de entrada e no segundo canal a tensão de saída.

Tempo de Ascensão: =

19. Conecte o capacitor C2.

20. Meça novamente o Tempo de Ascensão.

Tempo de Ascensão: =

21. Complete a sequência: "a retroalimentação negativa de CA (diminuiu, aumentou) o Tempo de Ascensão".

O TRANSISTOR COMO INVERSOR DIGITAL

23. Monte o circuito ilustrado adiante, na Fig. 4.

24. Ajuste PS-1 de modo a obter 5 volts.

25. Ajuste RV3 de modo que VCE assuma um valor entre 2,4 e 2,6 Volts.

26. Ajuste o gerador de sinais para fornecer uma onda quadrada de frequência igual a 2 KHz.

27. Conecte o gerador de sinais ao circuito.

28. Monitore a entrada com um dos canais do osciloscópio e a tensão de coletor com o segundo canal.

29. Observe que, à medida que o sinal de entrada é lentamente aumentado a partir de zero, a onda quadrada na saída "cresce" acima e abaixo do ponto de operação de 2,5V.

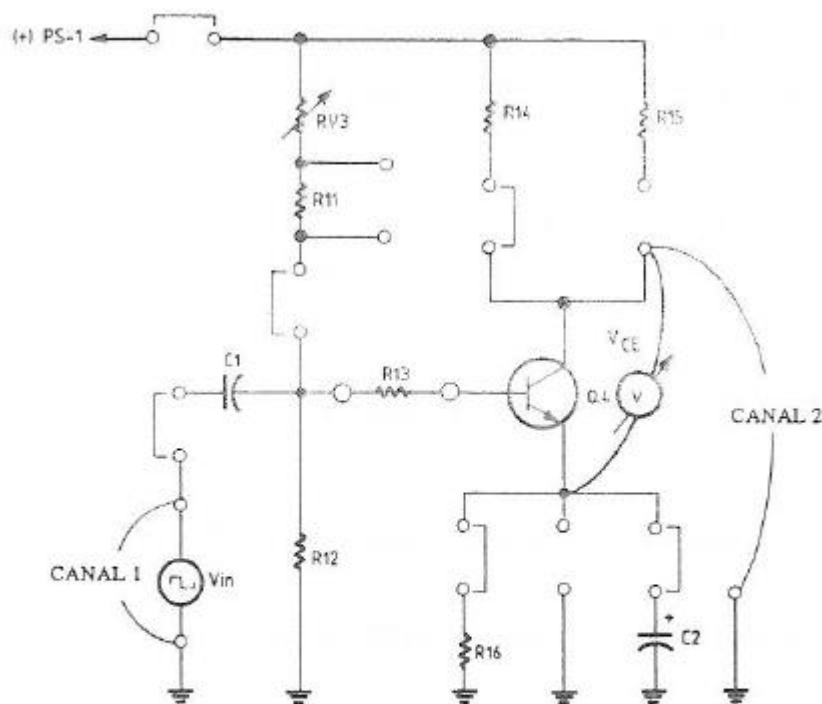


Fig. 4: Inversor Digital

30. Continue a aumentar o sinal de entrada até que o sinal de saída pare de crescer.
31. Observe a tensão de saída do osciloscópio.
32. Incremente o contador de experiência para 32.
33. Ajuste a tensão de entrada para 0,5V pico-a-pico, como ilustrado na Fig. 5.

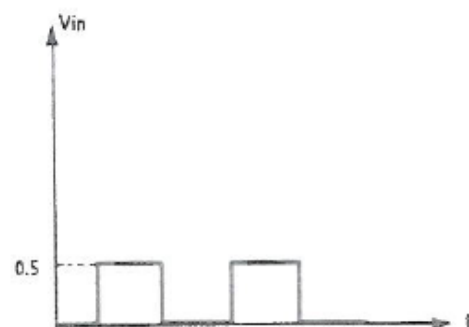


Fig. 5: Sinal de Entrada de Baixa Amplitude

34. Anote a tensão de saída na tabela da Fig. 6.

TENSÃO DE ENTRADA (V)	0	0.5
TENSÃO DE SAÍDA (V)		

Fig. 6: Entrada de Baixa Amplitude

35. Aumente a tensão de entrada para 4 Volts, como ilustra a Fig. 7.

36. Anote a tensão de saída na tabela da Fig. 8.

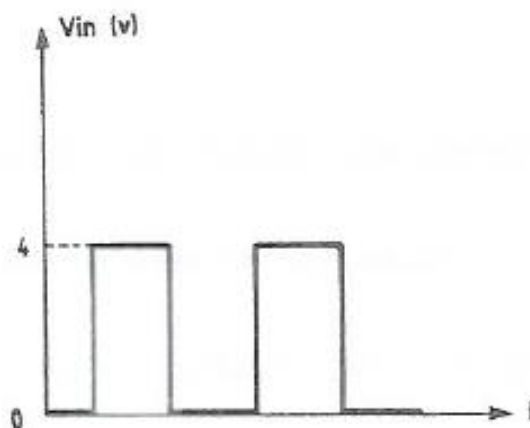


Fig. 7: Sinal de Entrada de Alta Amplitude

TENSÃO DE ENTRADA (V)	0	4
TENSÃO DE SAÍDA (V)		

Fig. 8: Entrada de Alta Amplitude

BIBLIOGRAFIA

- ANZENHOFER, Karl ... et al. **Eletrotécnica para escolas profissionais**. 3ª Edição – São Paulo, Mestre Jou, 1980.
- CASSIGNOL, Etienne. **Semicondutores: física e eletrônica**. Rio de Janeiro, Edgar Blucher, 1980
- . **Semicondutores: circuitos**. Rio de Janeiro, Edgar Blucher, 1980
- CAPUANO, Francisco G. & MARINO, Maria A. M. **Laboratório de eletricidade e eletrônica**. São Paulo, Érica, 1989.
- CAPUANO, Francisco Gabriel. **Elementos da eletrônica digital**. São Paulo. Érica, 1996.
- COMO funciona. **Enciclopédia de ciência e técnica**. São Paulo, Abril Cultural, c. 1974 6V.
- CATHEY, Jimmie J. **Dispositivos e circuitos eletrônicos**. São Paulo, Makron Books, 1994. Coleção Schaum.
- DEGEM SYSTEM. **Eb111: Fundamentos de Semicondutores I**. Israel, Inter Training Systems LTDA, 1991.
- HONDA, Renato. **850 exercícios de eletrônica**, 3ª ed. São Paulo, Érica, 1991.
- MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica**. São Paulo, McGraw-Hill, 1987. Vol. 1
- . **Eletrônica no laboratório**. São Paulo, Makron books, 1991.
- MARQUES, Angelo... et al. **Dispositivos semicondutores: diodos e transistores**. São Paulo, Érica, 1997. Coleção Estude e Use
- MELLO, Hilton Andrade de & INTRATOR, Edmond. **Dispositivos semicondutores**, 3ª ed. Rio de Janeiro, Livros técnicos e Científicos, 1978.
- MILLMAN, Jacob. **Microeletrônica**. Lisboa, McGraw-Hill, 1986. Vol. 1

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
ESCOLA TÉCNICA ESTADUAL “LAURO GOMES”**

**APOSTILA DE ELETRÔNICA ANALÓGICA
EXPERIÊNCIAS VIRTUAIS – PARTE PRÁTICA
AN2 – 2ª SÉRIE DE ELETRÔNICA – PERÍODO NOTURNO**

**AS EXPERIÊNCIAS FORAM RETIRADAS NA ÍNTEGRA DO LIVRO ELETRÔNICA NO
LABORATÓRIO – ALBERT PAUL MALVINO – MAKRON BOOKS**

PROFº GIUSEPPE GIOVANNI MASSIMO GOZZI

**SÃO BERNARDO DO CAMPO
2014**

LABORATÓRIO 01 (VIRTUAL)
AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

Objetivo:

Após ter polarizado o transistor de um amplificador emissor comum com o ponto Q próximo do centro da reta de carga CC, você pode acoplar um sinal AC na base. Isto produz um sinal AC amplificado no coletor. Nesta experiência você montará um amplificador emissor e medirá o ganho de tensão, assim como observará as formas de onda CA e CC em vários pontos do circuito.

Monte o circuito abaixo no MultiSIM:

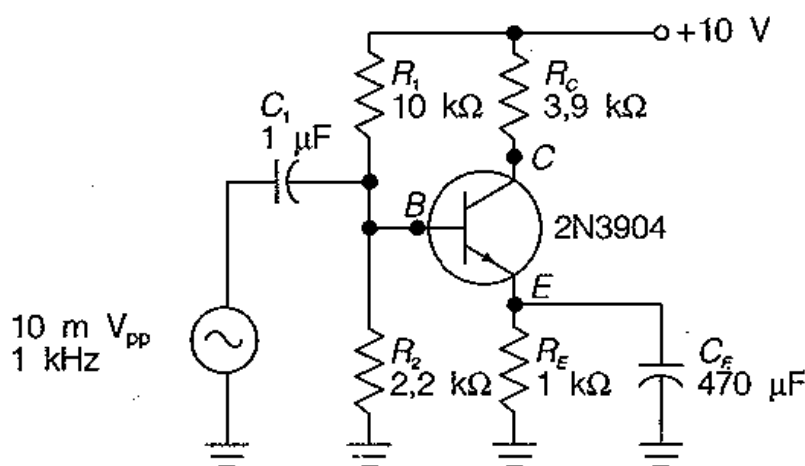


FIGURA 1

TENSÕES CC e CA

- 1 Na Figura 1 calcule a tensão CC na base, emissor e coletor. Anote suas respostas na Tabela 1
- 2 Calcule e anote o valor da tensão AC pico a pico na base no emissor e no coletor.
- 3 Monte o circuito. Ajuste o gerador de sinal com 10mV pico a pico e 1kHz.
- 4 Observe os pontos indicados base, emissor e coletor. Ligue o osciloscópio em cada um destes pontos para medir os valores CC e AC. Anote todos os valores na Tabela 1
- 5 Com o osciloscópio em DC, você deve ver as formas de onda Isto confirma que a tensão total é a soma da tensão CC mais a componente AC.

INVERSÃO DE FASE

- 6 Se você está usando um osciloscópio de traço duplo, observe um sinal na base com uma ponta de prova e outro sinal no coletor com a outra ponta de prova. Você pode também usar o sinal do coletor para acionar o terminal “EXTERNAL TRIGGER” do osciloscópio. (Se tiver dúvidas em usar este terminal pergunte ao instrutor.) Observe que o sinal no coletor está 180° fora de fase do sinal na base.
- 7 Se você está usando um osciloscópio de traço simples, use o terminal “EXTERNAL TRIGGER”, com o sinal do coletor. (Em caso de dúvidas quanto ao uso deste terminal consulte o instrutor.) Observe que eles estão defasados 180° .

GANHO DE TENSÃO

- 8 Na Figura 1, use a equação para calcular a resistência ideal r'_e . Use a equação para calcular o ganho de tensão A. Anote suas respostas na Tabela 2
- 9 Monte o circuito com um dos três transistores. Meça e anote os valores AC da entrada e da saída.
- 10 Calcule o ganho de tensão usando $V_{saída}$ e $V_{ent.}$, medidos no passo 9. A seguir calcule r'_e usando a razão R_c/A . Anote os valores experimentais de A e r'_e na Tabela
- 11 Repita os passos 8 a 10 com os outros transistores.

Tabela 1 Amplificadores em Emissor Comum

VALORES	CALCULADO			MEDIDO		
	B	E	C	B	E	C
CC						
CA						

Tabela 2 Ganho de Tensão

TRANSISTOR	CALCULADO		MEDIDO		EXPERIMENTAL	
	r'_e	A	$v_{ent.}$	$v_{saída}$	A	r'_e
1						
2						
3						

LABORATÓRIO 02 (VIRTUAL)

AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM COM RESISTORES DA FONTE E DA CARGA

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

Objetivo:

Devido à impedância de entrada de um amplificador emissor comum, haverá uma queda de tensão CA do sinal de entrada na impedância do gerador de sinal. Além disso, o circuito equivalente de Thevenin da saída do amplificador é um gerador em série com a impedância de saída do amplificador. Quando uma resistência de carga é ligada no amplificador, há uma queda de tensão CA provocada pela impedância de saída.

Uma forma de aumentar a impedância de entrada é ligar um resistor no emissor. Isto também estabiliza o ganho de tensão contra variações em r'_e , pois este resistor reduz o ganho de tensão. Pode ser necessário ligar dois amplificadores com resistores de emissor em cascata, a fim de obter o mesmo ganho de um amplificador sem o resistor no emissor.

Monte o circuito abaixo no MultiSIM:

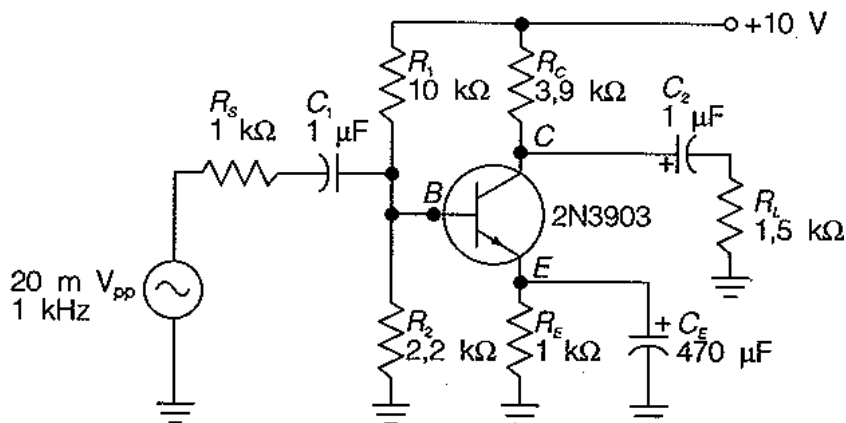


FIGURA 1

- 1 Na Figura 1, suponha h_{fe} igual a 50 (o mesmo que β). Calcule a impedância de entrada do estágio. Calcule também a tensão pico a pico na base e no coletor. Anote suas respostas na Tabela 1.
- 2 Monte o circuito. Ajuste o gerador de sinal com 20mV pico a pico e 1kHz. (Meça este valor entre o lado esquerdo da resistência da fonte e a referência.)
- 3 Observe a base e o coletor. Em cada um destes pontos, use um osciloscópio em DC para verificar se as formas de ondas são a soma das componentes CA e CC. Observe também a forma de onda no emissor. Devido à presença do capacitor de derivação, o emissor deve ter apenas a componente CC.
- 4 Com o osciloscópio em CA, meça a tensão pico a pico na base e no coletor. Anote estes valores na Tabela 1.
- 5 Repita o passo 4 usando agora os outros transistores.

AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO PARCIAL

Monte o circuito abaixo no MultiSIM:

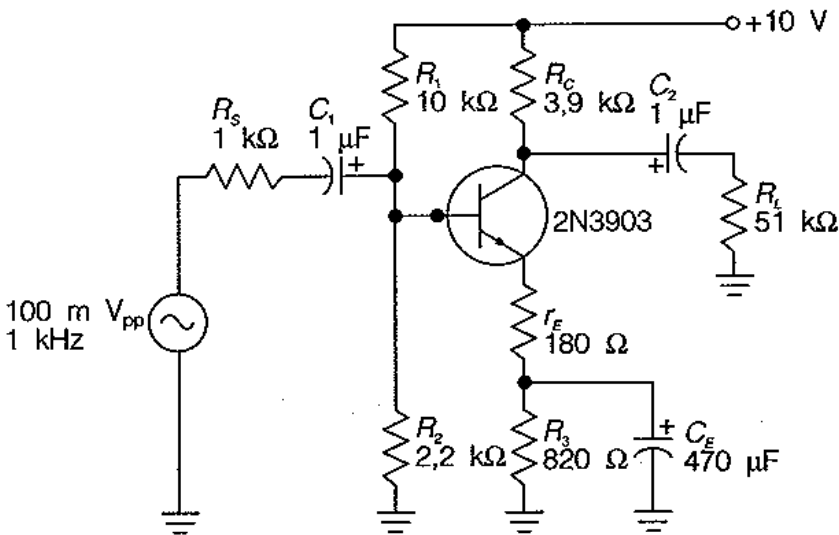


FIGURA 2

- 6 Na Figura 2, suponha um h_{fe} de 150 e calcule a impedância de entrada do estágio. Calcule também a tensão pico a pico na base e no coletor. Anote suas respostas na Tabela 2.
- 7 Monte o circuito. Meça e anote a tensão pico a pico na base e no coletor.
- 8 Repita os passos 6 e 7 com os outros transistores.

Tabela 1 Amplificador EC com Resistências da Fonte e da Carga

TRANSISTOR	CALCULADO			MEDIDO	
	$z_{ent.}$	v_b	v_c	v_b	v_c
1					
2					
3					

Tabela 2 Amplificador com Realimentação Parcial

TRANSISTOR	CALCULADO			MEDIDO	
	$z_{ent.}$	v_b	v_c	v_b	v_c
1					
2					
3					

LABORATÓRIO 02 (VIRTUAL)
ESTÁGIOS DE AMPLIFICADORES EC EM CASCATA

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

Objetivo:

O sinal amplificado na saída de um estágio EC pode ser usado como entrada para outro estágio EC. Desta forma, podemos montar amplificador multiestágio com um ganho de tensão de valor alto. Pelo fato de um estágio EC ter uma impedância de entrada, existe o efeito de carga para o estágio precedente. Em outras palavras, o ganho de tensão com carga é menor que o ganho de tensão sem carga. Nesta experiência você montará um amplificador de dois estágios com resistores de realimentação parcial para estabilizar o ganho de tensão total.

Monte o circuito abaixo no MultiSIM:

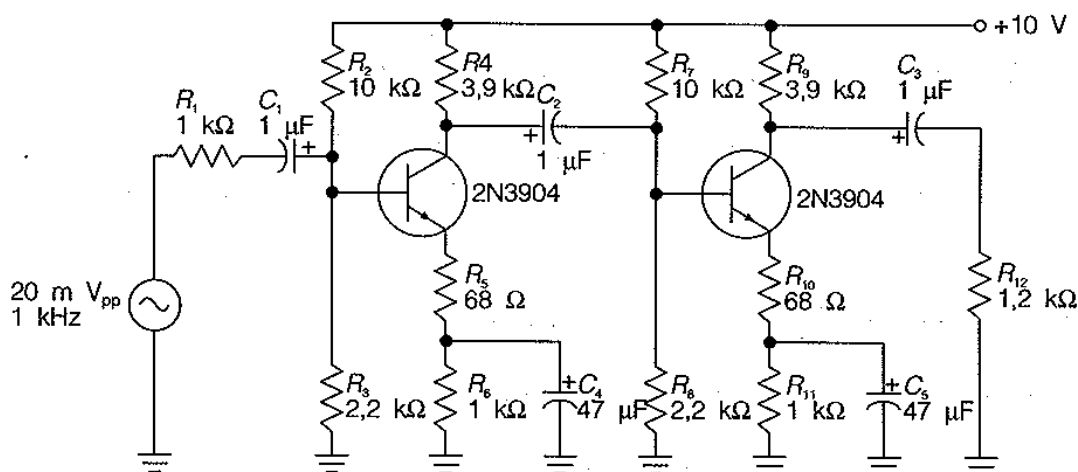


FIGURA 1

1. Na Figura 1, calcule as tensões CC na base, emissor e coletor de cada estágio. Anote suas respostas na Tabela 1.
2. Calcule o valor CA pico a pico da tensão na base, emissor e coletor de cada estágio (Figura 1). Anote todas as tensões CA na Tabela 2.

TESTES

3. Monte o amplificador de dois estágios da Figura 1.
4. Meça a tensão CC na base, emissor e coletor de cada estágio. Registre seus dados na Tabela 1. Considerando a tolerância dos resistores que estão sendo usados, as tensões medidas devem estar de acordo com as tensões calculadas.
5. Meça a tensão CA pico a pico na base, emissor e coletor de cada estágio. Registre seus dados na Tabela 2. Estas medidas devem estar de acordo com os valores calculados.

EFEITO DE CARGA

- 6 Abra o circuito desligando o capacitor de acoplamento entre o primeiro e o segundo estágio. Observe a tensão CA no coletor do primeiro estágio. Reconecte o capacitor de acoplamento e note que o sinal CA diminui significativamente. Não continue até entender e explicar por que o sinal diminui.
- 7 Abra o circuito desligando o capacitor de acoplamento entre o segundo estágio e o resistor de carga. Observe a tensão CA no coletor do segundo estágio. Reconecte o capacitor de acoplamento e note a forte diminuição do sinal. Novamente você deve ser capaz de explicar por que isto acontece.

Tabela 1 Tensões CC

ESTÁGIO	CALCULADO			MEDIDO		
	V_B	V_E	V_C	V_B	V_E	V_C
1						
2						

Tabela 2 Tensões CA

ESTÁGIO	CALCULADO			MEDIDO		
	v_b	v_e	v_c	v_b	v_e	v_c
1						
2						

LABORATÓRIO 04 (VIRTUAL) SEGUIDOR DE EMISSOR

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

Objetivo:

Um circuito seguidor do emissor tem uma alta impedância de entrada, uma baixa impedância de saída e uma baixa distorção não linear. Muitas vezes usamos este circuito como um estágio de reforço¹ (buffer) entre a alta impedância da fonte de sinal e a baixa impedância da carga. Nesta experiência você montará um seguidor do emissor para verificar sua alta impedância de entrada e baixa impedância de saída.

Monte o circuito abaixo no MultiSIM:

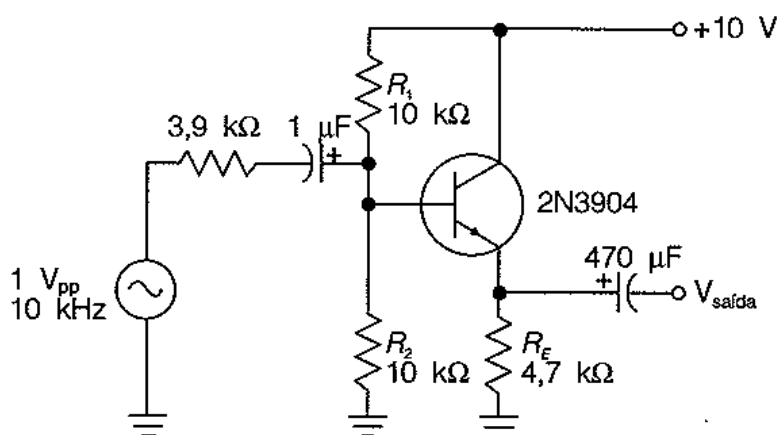


FIGURA 1

SEGUIDOR DE EMISSOR

- 1 Na Figura 1, calcule as tensões CC na base, emissor e coletor. Anote suas respostas na Tabela 1.
- 2 Calcule e anote a tensão CA pico a pico na base, emissor e coletor.
- 3 Monte o circuito. Meça e anote a tensão CC na base, emissor e coletor.
- 4 Ajuste o gerador de sinal para obter um sinal de 1Vpp e 10kHz (meça este sinal entre o lado esquerdo do resistor do gerador de sinal e a referência).
- 5 Meça e anote a tensão pico a pico na base, emissor e coletor.

IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

- 6 Calcule a impedância de saída do circuito diagramado na Figura 1. Anote este valor na Tabela 2.

- 7 Reduza o sinal do gerador de 1V para 100mV.
- 8 Meça e anote a tensão pico a pico na saída (sem carga).
- 9 Conecte uma resistência de carga de 47Ω na saída.
- 10 Meça e anote a tensão pico a pico na saída (com carga).
- 11 Calcule a impedância de saída do seguidor de emissor com os dados obtidos nos procedimentos 8 a 10. Anote sua resposta experimental na Tabela 1.

Tabela 1 Seguidor do Emissor: $h_{fe} =$ _____

VALORES	CALCULADO			MEDIDO		
	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>C</i>
CC						
CA						

Tabela 2 Impedância de Saída

CALCULADA	$F_{saída}$
SEM CARGA	$V_{saída}$
COM CARGA	$V_{saída}$
EXPERIMENTAL	$F_{saída}$

LABORATÓRIO 05 (VIRTUAL)
AMPLIFICADOR BASE COMUM

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

Objetivo:

Com um amplificador base comum (BC), o sinal de entrada aciona o emissor e o sinal de saída é retirado no coletor; a base está aterrada em CA. Diferentemente do amplificador EC, o amplificador BC produz um sinal de saída que está em fase com o sinal de entrada. Além disto, o amplificador BC tem uma impedância de entrada de r'_e , uma impedância de saída de R_C e um ganho de tensão de R_C/r'_e . A principal desvantagem de um amplificador BC é sua baixa impedância de entrada.

Monte o circuito abaixo no MultiSIM:

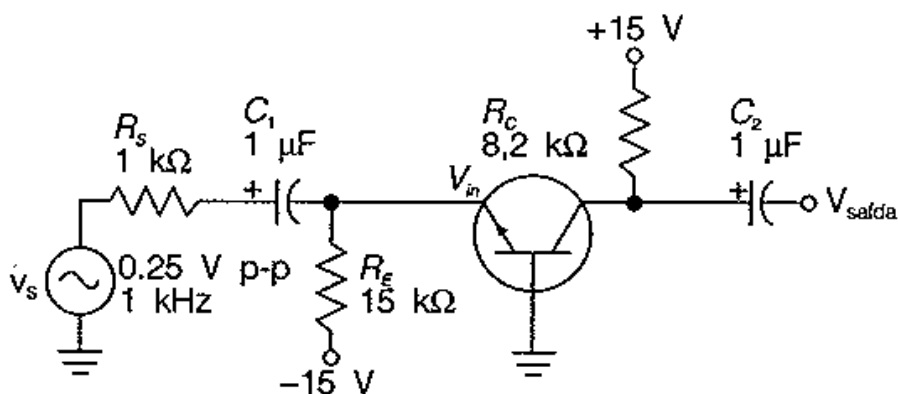


FIGURA 1

TENSÕES CC E CA

- 1 Na Figura 1, calcule a tensão CC no emissor, na base e no coletor. Anote suas respostas na Tabela 1.
- 2 Calcule e anote as tensões CA no emissor, na base e no coletor.
- 3 Monte o circuito. Ajuste o gerador de sinal de modo a obter uma tensão de 0,25V pico a pico e 1kHz. Meça este valor entre o lado esquerdo da resistência R_S e a referência.
- 4 Observe o emissor, a base e o coletor. Em cada ponto, use um multímetro para medir as tensões CC e um osciloscópio para medir as tensões CA pico a pico. Anote todas as tensões na Tabela 1.
- 5 Com o osciloscópio em DC, você deveria ver no coletor uma forma de onda que é a soma das componentes CA e CC.

SAÍDA EM FASE

- 6 Se você está usando um osciloscópio de traço duplo ou de duplo canhão, observe o sinal no emissor com um canal e o sinal no coletor com o outro canal. Use também o sinal do coletor para acionar o circuito de disparo externo (External Trigger) do osciloscópio. (Se houver dúvida quanto ao uso deste terminal, chame o instrutor.) Observe que o sinal no coletor está em fase com o sinal no emissor.
- 7 Se você está usando um osciloscópio de traço simples, ligue o disparo externo (External Trigger), com o sinal do coletor. (No caso de dúvida chame o instrutor.) Observe primeiramente o sinal no emissor, depois o sinal no coletor. Note que os sinais estão em fase.

GANHO DE TENSÃO

- 8 Na Figura 1, calcule o valor ideal da resistência r'_e e o ganho de tensão A . Anote suas respostas na Tabela 2.
- 9 Monte o circuito usando um dos três transistores. Meça e anote as tensões $V_{saída}$ e $V_{ent.}$ de entrada e de saída.
- 10 Calcule o ganho de tensão usando os dados obtidos de $V_{saída}$ e $V_{ent.}$ medidos no passo 9. A seguir calcule o valor de r'_e usando a razão R_C/A . Anote os valores experimentais de A e r'_e na Tabela 2.
- 11 Repita os passos 8 a 10 usando agora os outros transistores.

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

- 12 Calcule a corrente $I_{ent.}$ de entrada na resistência R_S , usando a seguinte fórmula:

$$I_{ent.} = \frac{V_s - V_{ent.}}{R_S}$$

(Use o valor medido de $V_{ent.}$ da Tabela 2.) A seguir, calcule a impedância de entrada usando:

$$Z_{ent.} = \frac{V_{ent.}}{I_{ent.}}$$

Calcule e anote $Z_{ent.}$ para os três resistores da Tabela 2.

Tabela 1 Amplificador BC

VALORES	CALCULADO			MEDIDO		
	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
CC						
CA						

Tabela 2 Ganho de Tensão

TRANSISTOR	CALCULADO		MEDIDO		EXPERIMENTAL		
	r'_e	A	$v_{ent.}$	$v_{saída}$	A	r'_e	$Z_{ent.}$
1							
2							
3							

LABORATÓRIO 06 (VIRTUAL)
AMPLIFICADOR CLASSE A

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

Objetivo:

Em um amplificador classe A, o transistor opera na região ativa durante todo o período do sinal CA. Isto significa que o sinal não aciona o transistor até a saturação e até o corte na reta de carga CA. A compliance CA de saída é o máximo valor pico a pico da tensão de saída sem cortes no sinal que o amplificador pode produzir. Com um amplificador EC, PP é menor do que $2I_{CQ}r_c$ ou $2V_{CEQ}$. Algumas das importantes características de um amplificador classe A são a corrente de dreno, potência de dissipação máxima no transistor, máxima potência não ceifada na carga e eficiência do estágio. Nesta experiência você calculará e medirá as tensões, correntes e potências de um amplificador classe A.

Monte o circuito abaixo no MultiSIM:

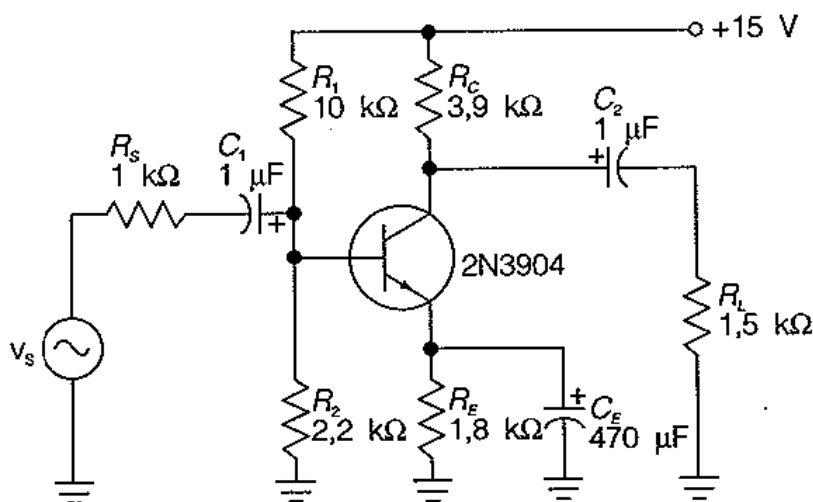


FIGURA 1

AMPLIFICADOR EC

- 1 Na Figura 1, calcule o valor da corrente quiescente no coletor e a tensão quiescente entre coletor e emissor. Anote suas respostas na Tabela 1.
- 2 Calcule e anote a compliance CA de saída e a corrente de dreno do estágio.
- 3 Calcule a potência máxima dissipada pelo transistor, a potência máxima na carga sem ceifamento, a potência CC de entrada do estágio e a eficiência do estágio. Anote estas respostas teóricas na coluna correspondente da Tabela 2.
- 4 Monte o circuito. Reduza o sinal do gerador a zero. Use o multímetro para medir I_{CQ} e V_{CEQ} . Anote este valor.

- 5 Use o osciloscópio para observar a tensão na carga. Ajuste o gerador de sinal até que o ceifamento inicie em ambos os semiciclos. Note como a forma de onda fica quadrada no semiciclo superior e alongada no semiciclo inferior. A causa desta distorção não linear é a grande variação de r'_e quando o coletor se aproxima do corte e da saturação.
- 6 Reduza o sinal do gerador até que não haja mais ceifamentos. Você deve observar bem ao reduzir o sinal porque o ceifamento é atenuado quando o ponto de operação se aproxima do corte. Volte a aumentar o sinal até que o semiciclo positivo tenha a aparência arredondada e lisa, como a senóide. Meça e anote a tensão CA pico a pico. (Este valor medido é uma aproximação da compliance CA de saída PP.)
- 7 Meça e anote a corrente de dreno total do estágio.
- 8 Calcule e anote os valores experimentais listados na Tabela 2, usando os dados medidos, anotados na Tabela 1.
- 9 Ajuste o gerador de sinal até obter uma tensão pico a pico na carga de 2V. Note quanta distorção não linear há no sinal.
- 10 Conecte um resistor de realimentação parcial no emissor de 220Ω . Ajuste o gerador de sinal até obter na carga uma tensão de $2V_{pp}$ e note como a distorção do sinal diminui. Você deve saber pela leitura do livro-texto por que esta diminuição ocorre.

Tabela 1 Amplificador EC

VALORES	CALCULADO	EXPERIMENTAL
I_{CQ}		
V_{CEQ}		
PP		
I_S		

Tabela 2 Potência e Eficiência

VALORES	TEÓRICO	EXPERIMENTAL
$P_{D(max)}$		
$P_{L(max)}$		
P_S		
η		

LABORATÓRIO 07 (VIRTUAL)
AMPLIFICADOR "PUSH PULL" CLASSE B

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

Objetivo:

Em um amplificador 'push-pull' classe B, cada transistor opera na região ativa durante metade do ciclo do sinal CA. Com uma fonte de alimentação simples, a compliance CA de saída é aproximadamente igual a V_{CC} . Amplificadores 'PUSH-PULL' classe B são muito usados nos estágios de saída de sistemas de áudio porque eles podem alimentar cargas de potências maiores do que os amplificadores classe A. Realmente, a eficiência teórica de um amplificador 'PUSH-PULL' classe B aproxima-se de 78,5 por cento, muito maior do que um classe A.

O principal problema com um amplificador 'PUSH-PULL' classe B é estabilizar o ponto Q próximo do corte. A tensão V_{BE} necessária para cada transistor é cerca de 0,6V a 0,7V, com o valor exato determinado pela corrente quiescente do coletor necessária para evitar a distorção de cruzamento. Como a corrente do coletor aumenta por um fator de 10 para cada 60mV de aumento em V_{BE} , ajustar uma corrente I_{CQ} estabilizada e precisa é difícil. A polarização por divisor de tensão não é prática, pois o ponto Q é muito sensível a variações da tensão da fonte de alimentação, temperatura e substituições do transistor. Conforme foi visto no livro-texto, existe realmente a possibilidade de ocorrer um disparo térmico. A polarização com diodos é a forma usual de se polarizar amplificador 'PUSH-PULL' classe B. A idéia é usar diodos cujas curvas características sejam idênticas às curvas dos diodos emissores dos transistores. Assim podemos obter a ação de corrente de espelho e estabilizar o ponto Q.

Nesta experiência você montará um circuito amplificador 'PUSH-PULL' classe B com polarização por divisor de tensão e com polarização por diodos de compensação. Isto permitirá que você observe que a polarização por diodos de compensação é mais estável do que a polarização por divisor de tensão. Você poderá verificar também as relações de potência discutidas no livro-texto.

Monte o circuito abaixo no MultiSIM:

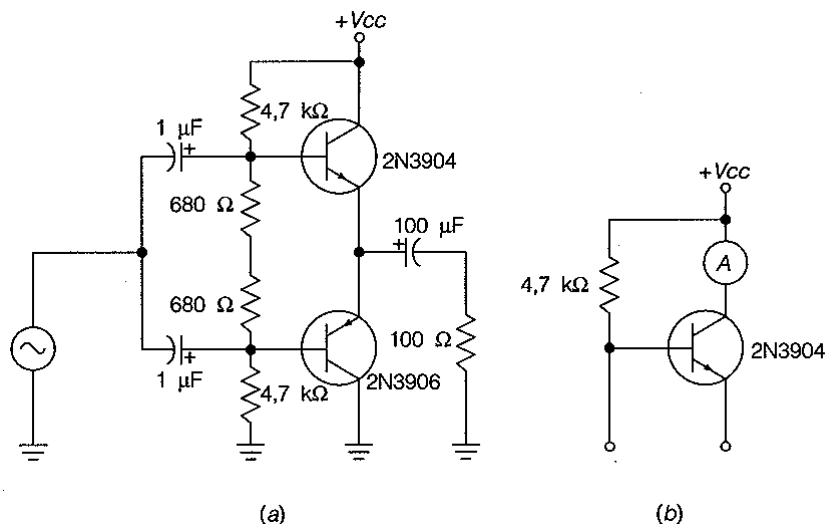


FIGURA 1

DISTORÇÃO DE CRUZAMENTO

- 1 Ajuste sua fonte de alimentação para 5V e monte o circuito da Figura 1a. Alimente este circuito com a fonte.
- 2 Ajuste a frequência de entrada para 1kHz e o nível do sinal de áudio com $2V_{pp}$.
- 3 Observe o sinal de saída no resistor de carga (100Ω). Você deverá ver um sinal com distorção.

SENSIBILIDADE DA TENSÃO-POLARIZAÇÃO POR DIVISOR

- 4 Reduza o nível do sinal a zero e ligue o multímetro como um amperímetro em série com o coletor. (Veja Figura 1b.)
- 5 Ligue o segundo multímetro como um voltímetro na fonte de alimentação.
- 6 Ajuste V_{CC} de modo a obter uma corrente I_{CQ} de $10\mu A$. Anote o valor de V_{CC} na Tabela 1.
- 7 Ajuste V_{CC} de modo a obter os outros valores de I_{CQ} . Anote os valores de V_{CC} .
- 8 Reduza V_{CC} a zero. Calcule a sensibilidade da corrente do coletor em função da tensão da fonte, com a seguinte equação:

$$\text{Sensibilidade} = \frac{I_{CQ(\max)} - I_{CQ(\min)}}{V_{CC(\max)} - V_{CC(\min)}}$$

Use os valores máximos e mínimos da Tabela 1. Anote suas respostas na Tabela 1.

COMPLIANCE DE SAÍDA CA

- 9 Ajuste V_{CC} até obter uma corrente quiescente do coletor de 1mA aproximadamente. Desligue o amperímetro do coletor e ligue o coletor à fonte novamente.
- 10 Aumente o gerador de áudio até que se note cortes no sinal de saída. Volte levemente o ajuste até que o sinal de saída não tenha mais cortes. Se seu circuito funciona corretamente, a saída pico a pico deve ser aproximadamente igual a V_{CC} (cerca de 10V). Esta é a compliance de saída do circuito.

Tabela 1 Sensibilidade da Polarização por Divisor de Tensão

I_{CQ}	V_{CC}
10 μA	
100 μA	
1mA	
10mA	
SENSIBILIDADE	

Tabela 2 Sensibilidade da Polarização por Diodos

I_{CQ}	V_{CC}
10 μ A	
100 μ A	
1mA	
	15V
SENSIBILIDADE	

RELAÇÕES DE POTÊNCIA

15 Na Figura 2, calcule V_{CEQ} dos transistores de cima e de baixo para um V_{CC} de 10V. Anote suas respostas na Tabela 3. Calcule e anote também a compliance de saída e a corrente de dreno para o máximo sinal de saída.

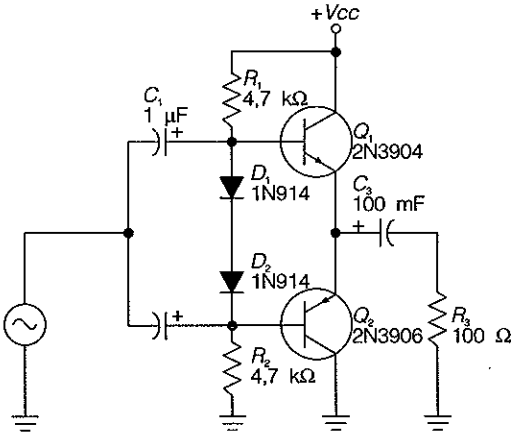


FIGURA 2

- 16 A seguir calcule a potência máxima na carga sem cortes, a potência de entrada CC e a eficiência do estágio. Anote suas respostas na coluna teórica da Tabela 4.
- 17 Monte o circuito com um V_{CC} de 10V. Meça e anote V_{CEQ} de cada transistor (Tabela 3). Meça e anote também a compliance CA de saída e a corrente total do circuito.
- 18 Calcule e anote os valores experimentais listados na Tabela 4, usando os dados medidos da Tabela 3.

Tabela 3 Dados do Circuito

	CALCULADO	MEDIDO
$V_{CEQ(superior)}$		
$V_{CEQ(inferior)}$		
PP		
I_S		

Tabela 4 Potência e Eficiência

	TEÓRICO	EXPERIMENTAL
$P_{L(max.)}$		
P_S		
η		

LABORATÓRIO 08 (VIRTUAL) AMPLIFICADOR DE ÁUDIO

NOME: _____ N° _____ TURMA: _____
 NOME: _____ N° _____ TURMA: _____
 NOME: _____ N° _____ TURMA: _____
 NOME: _____ N° _____ TURMA: _____
 NOME: _____ N° _____ TURMA: _____

Objetivo:

Nesta experiência você montará um amplificador de áudio discreto com um estágio classe A na entrada e um 'PUSH-PULL' classe B seguidor do emissor como mostrado na Figura 1. Está incluído um potenciômetro R_7 para permitir um ajuste da tensão do emissor de Q_3 com +5V, metade da tensão de alimentação. Isto possibilita ao sinal de saída variar igualmente em ambas as direções a fim de obter a máxima compliance CA de saída. Alguns valores de resistores não estão otimizados para dar a oportunidade de você melhorar o projeto (opcional). O circuito contém muitos componentes; logo, faça uma montagem mais criteriosa. Verifique todas as conexões antes de alimentar o circuito.

Monte o circuito abaixo no MultiSIM:

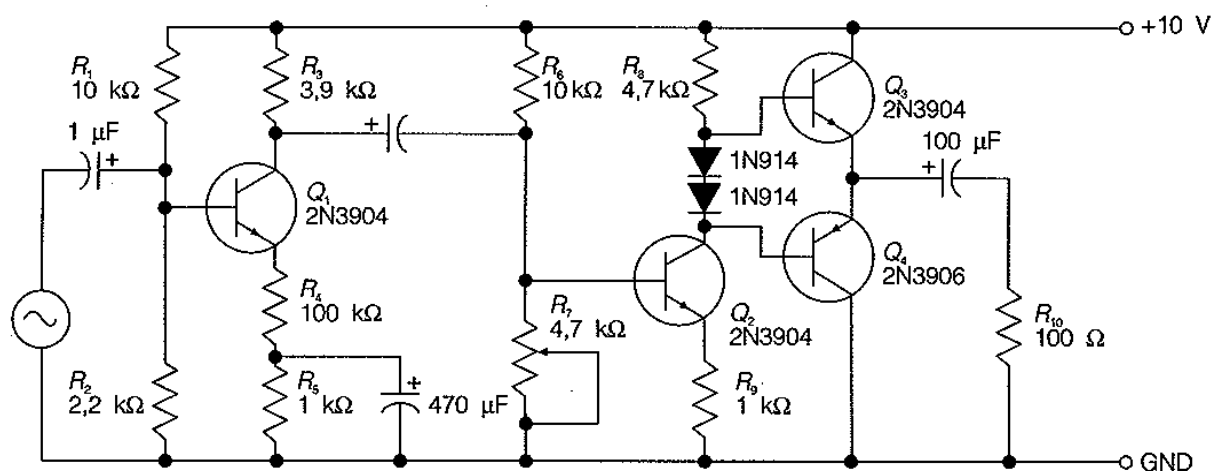


FIGURA 1

AMPLIFICADOR DE ÁUDIO

- 1 Na Figura 1, suponha que o resistor de base de Q_2 está ajustado para produzir uma tensão quiescente de +5V no emissor de Q_3 . Calcule e anote todos os valores de tensão CC listados na Tabela 1.
- 2 Suponha que a tensão CA na carga seja de $4V_{pp}$. Suponha também que todos os valores de h_{FE} sejam de 100. Calcule e anote todos os valores de tensão CA listados na Tabela 2.
- 3 Monte o amplificador de áudio da Figura 1. Ajuste o potenciômetro na base de Q_2 para produzir uma tensão CC de +5V no emissor de Q_3 .

- 4 Ajuste a frequência de entrada para 1kHz e ajuste a tensão CA na carga para $4V_{pp}$.
- 5 Use o multímetro para medir as tensões CC listadas na Tabela 1. Use o osciloscópio para medir todas as tensões CA na Tabela 2. Anote seus dados.

Tabela 1 Tensões CC

VALORES	CALCULADO			MEDIDO		
	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>C</i>
Q_1						
Q_2						
Q_3						
Q_4						

Tabela 2 Tensões CA

VALORES	CALCULADO			MEDIDO		
	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>C</i>
Q_1						
Q_2						
Q_3						
Q_4						

LABORATÓRIO 09 (VIRTUAL)
AMPLIFICADOR CLASSE C

NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____
NOME: _____	Nº _____	TURMA: _____

Objetivo:

Num amplificador classe C, o transistor opera na região ativa menos de 180° do ciclo CA do sinal. Tipicamente, o ângulo de condução é muito menor do que 180° e a corrente do coletor é um trem de pulsos estreitos. Esta corrente não senoidal contém a frequência fundamental mais as harmônicas. Um amplificador classe C sintonizado tem um circuito tanque ressonante que está em sintonia com a frequência fundamental. Isto produz uma tensão de saída senoidal com frequência f_r . Em um circuito multiplicador de frequência, o circuito tanque ressonante é sintonizado com a n ésima harmônica, de tal modo que a saída senoidal tem uma frequência de nf_r .

Nesta experiência você montará um amplificador classe C sintonizado e um multiplicador de frequência.

Monte o circuito abaixo no MultiSIM:

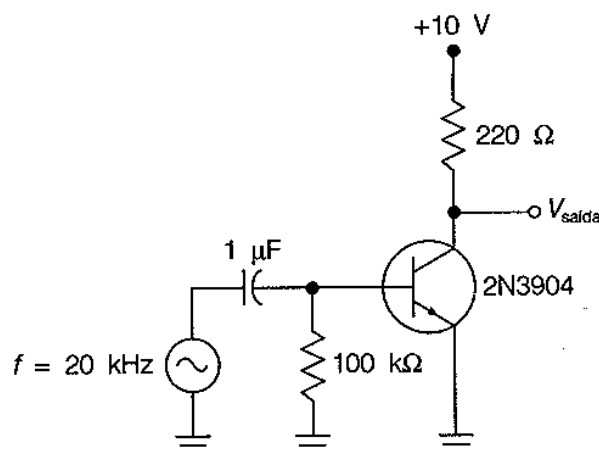


FIGURA 1

AMPLIFICADOR CLASSE C NÃO SINTONIZADO

- 1 Monte o circuito da Figura 1.
- 2 Ajuste o gerador de áudio para 20kHz. Ajuste o nível do sinal de modo a obter pulsos estreitos na saída com valor de $6V_{pp}$.
- 3 Meça a largura do pulso W e o período T. Anote estes valores na Tabela 1. Calcule e anote o fator de trabalho D.
- 4 Observe o sinal na base. Você deverá ver uma forma de onda cortada no semiciclo negativo. Com o osciloscópio acoplado para DC, meça e anote as tensões de pico positiva e negativa do sinal cortado.

Tabela 1 Formas de Onda

W	
T	
D	
PICO (+)	
PICO (-)	

- 5 Na Figura 2, calcule a frequência de ressonância do amplificador sintonizado. Anote sua resposta na tabela 2.

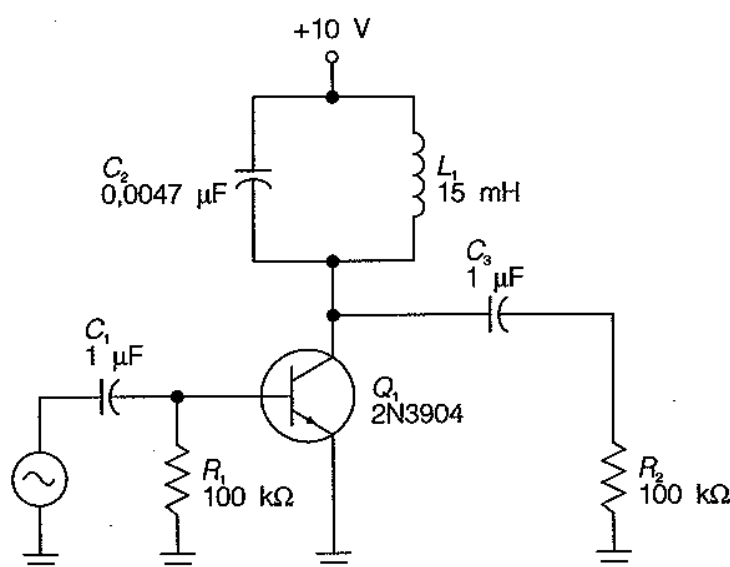


FIGURA 2

- 6 Suponha que o Q_L da bobina seja de 15. Calcule e anote os outros valores listados na Tabela 2.
- 7 Monte o circuito. Use o osciloscópio para observar o sinal na base. Ajuste a frequência para 20kHz e o nível do sinal para $2V_{pp}$.
- 8 Use o osciloscópio para observar o sinal do coletor. Varie a frequência de entrada até que o sinal alcance seu valor máximo (ressonância).
- 9 Ajuste o nível do sinal até obter $15V_{pp}$ no coletor.
- 10 Repita os passos 8 e 9 até que o circuito entre em ressonância com uma saída de $15V_{pp}$. (Esta repetição de procedimento para ajuste da frequência e do nível do sinal é denominada balanço.)

Tabela 2 Cálculos para Amplificadores Sintonizados

f_r	
X_L	
R_S	
R_P	
r_C	
Q	
B	
PP	
$P_{L(max.)}$	

**FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA,
LARGURA DE BANDA E FATOR (Q) DO CIRCUITO**

- 11 Use o contador de frequência para medir a frequência de ressonância. Anote na Tabela 3.
- 12 Meça e anote a largura de banda. Após medir f_1 e f_2 , calcule e anote a largura de banda experimental na Tabela 3.
- 13 Reajuste a frequência de entrada até obter a ressonância. Calcule o Q do circuito usando a f_r e B da Tabela 3. Anote o Q do circuito.

**COMPLIANCE CA DE SAÍDA,
CORRENTE DE DRENO E GRAMPEAMENTO CC**

- 14 Aumente o nível do sinal de entrada até que o sinal de saída apresente indícios de corte na forma de onda. Volte o ajuste do sinal de entrada suavemente até que os cortes cessem. Anote a compliance CA de saída na Tabela 3.
- 15 Use o multímetro como amperímetro para medir a corrente de dreno do circuito. Anote I_S .

Tabela 3 Medições para Amplificadores Sintonizados

f_r	
B	
Q	
PP	
I_S	

MULTIPLICADOR DE FREQUÊNCIA

- 16 Reduza a frequência na entrada e note que o sinal de saída diminui (fora de ressonância). Continue diminuindo a frequência de entrada até que o sinal de saída volte a aumentar e alcance o valor máximo (ressonância com uma harmônica). Use o contador para medir as frequências de entrada e de saída. Anote na Tabela 4. Divida $f_{saída}$ pela $f_{ent.}$, arredonde a resposta a um valor inteiro; note que ela é igual a 2. O circuito agora opera com um multiplicador (x2) de frequência.
- 17 Novamente diminua a frequência de entrada até encontrar outra ressonância. Meça e anote as frequências de entrada e de saída. Desta vez, a razão $f_{saída}/f_{ent.}$ deve ser próxima de 3. O circuito agora funciona como um multiplicador (x3) de frequência.

Tabela 4 Multiplicador de Frequência

$f_{ent.}$	$f_{saída}$	η
		2
		3

BIBLIOGRAFIA

- ANZENHOFER, Karl ... et al. **Eletrotécnica para escolas profissionais**. 3ª Edição – São Paulo, Mestre Jou, 1980.
- CASSIGNOL, Etienne. **Semicondutores: física e eletrônica**. Rio de Janeiro, Edgar Blucher, 1980
- . **Semicondutores: circuitos**. Rio de Janeiro, Edgar Blucher, 1980
- CAPUANO, Francisco G. & MARINO, Maria A. M. **Laboratório de eletricidade e eletrônica**. São Paulo, Érica, 1989.
- CAPUANO, Francisco Gabriel. **Elementos da eletrônica digital**. São Paulo. Érica, 1996.
- COMO funciona. **Enciclopédia de ciência e técnica**. São Paulo, Abril Cultural, c. 1974 6V.
- CATHEY, Jimmie J. **Dispositivos e circuitos eletrônicos**. São Paulo, Makron Books, 1994. Coleção Schaum.
- DEGEM SYSTEM. **Eb111: Fundamentos de Semicondutores I**. Israel, Inter Training Systems LTDA, 1991.
- HONDA, Renato. **850 exercícios de eletrônica**, 3ª ed. São Paulo, Érica, 1991.
- MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica**. São Paulo, McGraw-Hill, 1987. Vol. 1
- . **Eletrônica no laboratório**. São Paulo, Makron books, 1991.
- MARQUES, Angelo... et al. **Dispositivos semicondutores: diodos e transistores**. São Paulo, Érica, 1997. Coleção Estude e Use
- MELLO, Hilton Andrade de & INTRATOR, Edmond. **Dispositivos semicondutores**, 3ª ed. Rio de Janeiro, Livros técnicos e Científicos, 1978.
- MILLMAN, Jacob. **Microeletrônica**. Lisboa, McGraw-Hill, 1986. Vol. 1