

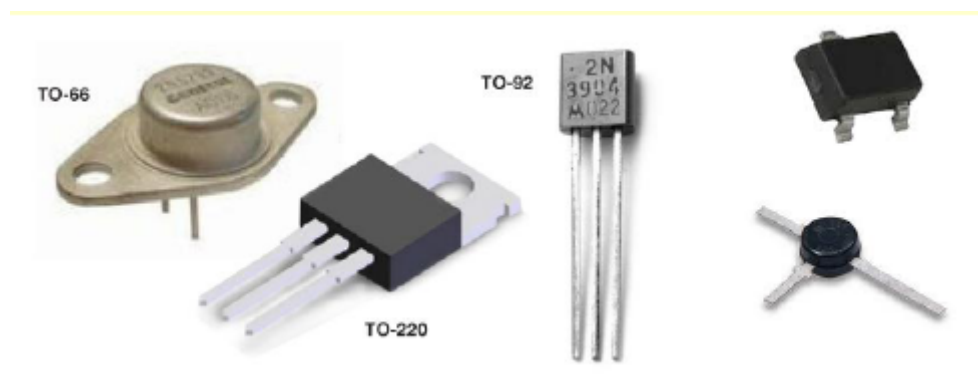


Universidade Eduardo Mondlane

Departamento de Física

Electrônica Básica

Aula # 4 - Transistores Bipolares de Junção (TBJ)



Bartolomeu J.Ubisse

(*email: bartolomeujoaquim.ubisse@gmail.com*)

&

Hélder Marrenjo

(*email: marrenjohelder@yahoo.com.br*)

Objectivos

No final desta sessão os estudantes devem:

- i) -Explicar os mecanismos de funcionamento de um transistor bipolar de junção;
- ii) -Identificar as regiões de operação de um TBJ e as correspondentes possíveis aplicações;
- iii) -Identificar as principais características de saídas e a suas relações;
- iv) -Analisar graficamente a operacionalidade de um TBJ;
- v) -Identificar as configurações e os principais arranjos de polarização dos TBJs.
- vi) -Analisar a operacionalidade de TBJ como amplificador usando o modelo π -híbrido.

Métodos

O sucesso desta sessão só se pode lograr com o envolvimento de todos, pelo que, recomenda-se aos colegas estudantes a serem muito interventivos. Para tal, é necessário que tirem cópia do material enviado ao correio da turma e preparem antes de virem à sala de aulas. Esta sessão será complementada pela aula laboratorial e, para o melhor desempenho, apela-se que tenham os guiões deixados na repografia e tentem perceber os objectivos a alcançar com o experimento.

1 Transistor Bipolar de Junção

A electrônica é uma área de saber que lida com sinais de fraca intensidade que, para a sua aplicação, são submetidos a um processo de amplificação. No passado, este processo era feito por intermédio de válvulas electrónicas que para além de elevadas temperaturas, ocupavam grandes espaços razão pela qual os primeiros computadores eram de dimensões elevadas.

Havendo uma necessidade enorme de se inventar um dispositivo compacto que pudesse substituir as válvulas electrónicas, em 1947, **John Bardeen**, **Walter Houser Brattain** e **William Bradford Shockley** na tentativa de criar um transistor de efeito de campo, ora idealizado por **Julius Edgar Lilienfeld**, inventaram um transistor bipolar de junção nos laboratórios da *Bell Telephone*. Esta descoberta marcou uma nova era na indústria electrónica, pois, foi com base nela que se desenvolveu amplificadores com maior ganho e tamanhos relativamente menores que pudessem ser integrados num único encapsulamento formando aquilo que é conhecido por circuito integrado (IC).

1.1 Estrutura Física e Modelo de Operação

Transistor Bipolar de Junção é um dispositivo semiconductor que consiste em duas junções *pn* com três regiões denominadas **emissor**, **base** e **colector**. As duas regiões, i.é, a região do emissor e a do colector possuem o mesmo tipo de material extrínseco.

O termo **bipolar** surge pelo facto de a corrente nestes transistores ser transportada tanto pelos electrões assim como pelas lacunas.

Dependendo da maneira como é feita a união das duas junções *pn*, os TBJs podem ser de dois tipos, i.é, NPN e PNP conforme a figura 1.

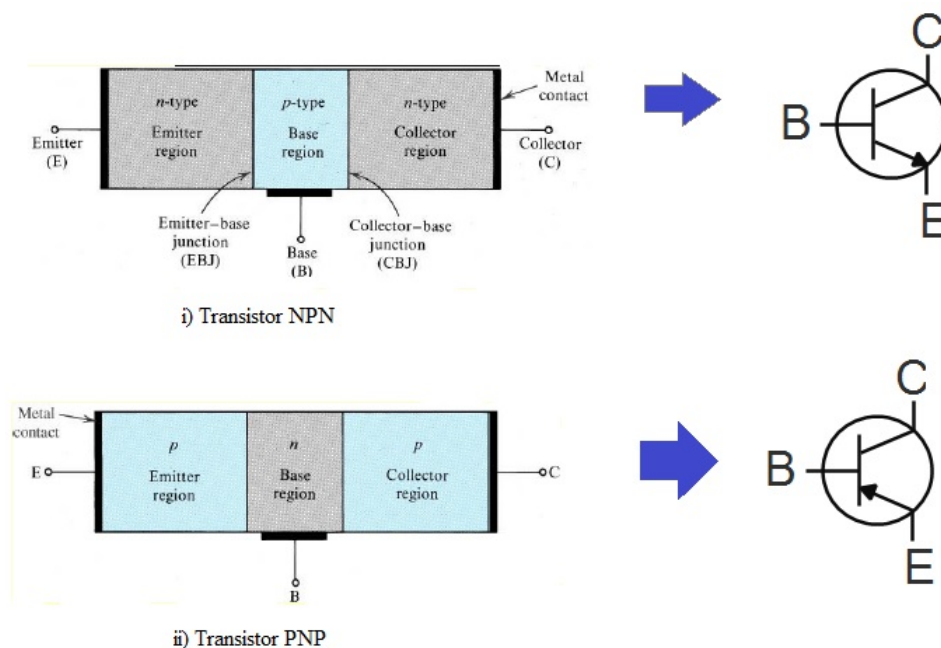


Figura 1: Estruturas dos TBJs

No que concerne à operação, os transistores bipolares de junção podem estar em três modos consoante a polarização das suas junções, conforme se ilustra na tabela 1.

Tabela 1: Modos de Operação de um TBJ

Modo	JEB	JCB	Aplicações
Corte	Inversa	Inversa	Interruptores, portas lógicas, circuitos TTL etc.
Activo	Directa	Inversa	Amplificadores
Saturação	Directa	Directa	Interruptores, portas lógicas, circuitos TTL etc.

De referir que nas nossas análises, consideraremos mais o modo activo. Porém, o estudante é recomendado a desenvolver de uma forma independente a operação dos TBJs no corte e na saturação de modo a se preparar para a electrónica digital. Ainda mais, porque o funcionamento dos TBJs PNP e NPN é similar, vamos destacar somente os NPN.

Analizando então o que ocorre quando o TBJ está a operar no modo activo sucede:

→ Dado que o emissor é fortemente dopado quer em relação ao colector quer à base, i.é, $N_E > N_C > N_B$, quando a tensão V_{BE} é superior que a barreira de potencial correspondente a junção base-emissor, os electrões difundem-se até à base. Dado o facto de a base ser muito estreita e estar fracamente dopada, pequena quantidade deles recombina-se com as lacunas aí existentes e também uma pequena quantidade sai pela base e retorna à fonte pela resistência da base. Porém, maior parte difunde-se até ao colector.

Relativamente à corrente e visto o facto de maior quantidade de electrões que saem do emissor chegar ao colector, então a corrente do colector é uma fracção da corrente do emissor;

$$I_C = \alpha I_E \quad (1)$$

Onde I_C é corrente do colector, I_E é corrente do emissor e α é a percentagem dos electrões do emissor que chegam ao colector e, pode variar de 95 a 99%.

Uma outra consideração é que tanto a corrente do colector assim como a de base, são todas parcelas da corrente do emissor. Assim, considerando-se a lei de conservação de carga temos:

$$I_E = I_B + I_C \quad (2)$$

Uma outra relação diz respeito ao ganho de corrente de um TBJ. Este defini-se pela razão entre as correntes de colector e de base, conforme a eq.3.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (3)$$

Conjugando-se as eqs.1,2 e 3 temos:

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (4)$$

1.2 Configuração de um TBJ (NPN)

Os TBJs apresentam três configurações básicas, i.é, emissor comum, base comum e colector comum, conforme a fig.2

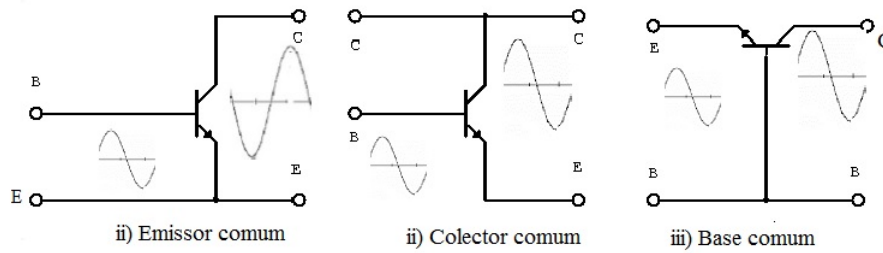


Figura 2: Configuração dos TBJs

De referir que nas nossas sessões só consideraremos a configuração emissor comum visto que é a mais usada para fins de amplificação de sinais. Porém, o estudante é também recomendado a desenvolver conhecimentos em outras configurações .

1.2.1 Emissor Comum ou emissor a terra

Considera-se emissor comum àquela configuração em que o emissor é o terminal comum ao circuito de entrada e ao circuito de saída (fig.3). Nesta configuração, a fonte V_{BB} polariza directamente a junção emissora-base, pelo que, variando-se esta fonte ou a resistência da base, a corrente da base varia e tendo em consideração a eq.3, a corrente do colector também varia. Assim, esta configuração é utilizada quando se pretende [amplificar a corrente e a tensão](#).

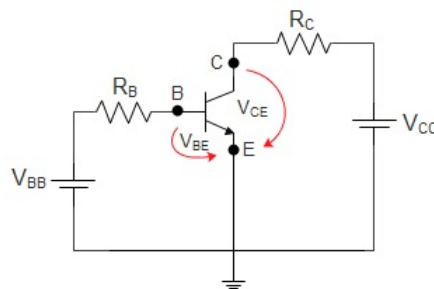


Figura 3: Emissor Comum

Na fig.3, a V_{BB} é a fonte de tensão da base , V_{CC} é a fonte de tensão do colector. As duas ultimas relacionam-se com os terminais do transistor, i.é, V_{CE} é a tensão entre os pontos C e E e, V_{BE} é a tensão entre os pontos B e E e as suas expressões são dadas pelas eqs.7 e 6.

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad (5)$$

$$V_{BE} = V_B - V_E \quad (6)$$

1.3 Curvas características e recta de carga

As curvas características estabelecem relações entre variáveis de entrada e de saída. Estas curvas permitem estudar o comportamento do transistor bipolar de junção e também identificar-se as zonas de operação (saturação, activa e corte).

A entrada é caracterizada pela corrente de base I_B e pela tensão V_{BE} , e a saída é caracterizada pela corrente de coletor I_C e pela tensão V_{CE} .

Na região activa, o transistor bipolar de junção apresenta uma dependência de corrente do colector com a tensão V_{CE} . Essa dependência não é uma linha horizontal, sendo que, prolongamento-se as suas curvas características encontra-se um ponto de intercessão denominado de tensão de **Early** (V_A), conforme a fig.4.

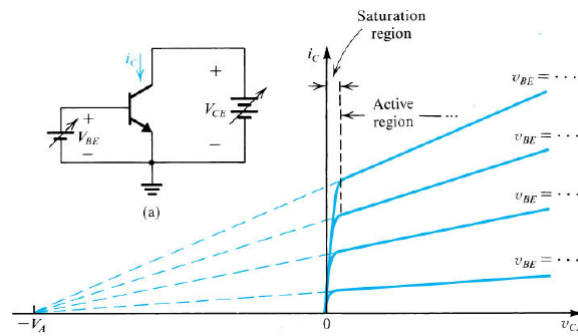


Figura 4: Curva característica de TBJ

A dependência de I_C com V_{CE} pode ser apurada considerando-se que a corrente de saturação permanece constante e para um dado valor de V_{BE} faz-se variando o V_{CE} na eq.7

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) \quad (7)$$

Quando os valores de V_{CE} são menores que a tensão de polarização da base, o díodo do coletor fica directamente polarizado e o transistor fica **saturado** (vide a tabela 1). Quando a tensão V_{CE} é relativamente maior, o transistor entra na zona **activa** e, a valores de tensão muito maior, ele entra na **ruptura**. No caso em que a corrente de base I_B é nula, o transistor fica na zona de **corte** conforme se ilustra na fig.5.

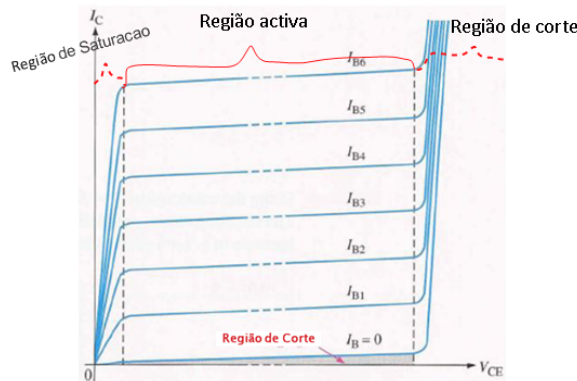


Figura 5: Curvas características e regiões de operação do TBJ.

1.3.1 Recta de carga e ponto quiescente

Para traçarmos a recta de carga e determinarmos o ponto quiescente podemos considerar o circuito da fig.6

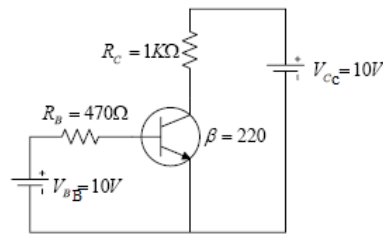


Figura 6:

i) Recta de carga

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} \quad (8)$$

$$I_C|_{V_{CE}=0V} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{10V}{1000\Omega} = 10^{-2}A \quad (9)$$

$$V_{CE}|_{I_C=0A} = V_{CC} = 10V \quad (10)$$

ii) Ponto quiescente

$$V_{BB} = R_B I_B + V_{BE} \Rightarrow I_B \simeq 20\mu A \quad (11)$$

$$I_C = \beta I_B = 4.2mA \quad (12)$$

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} \Rightarrow V_{CE} = 5.8V \quad (13)$$

Assim, o ponto quiescente é no $V_{CE} = 5.8V$ e $I_C = 4.2mA$ conforme a fig.7.

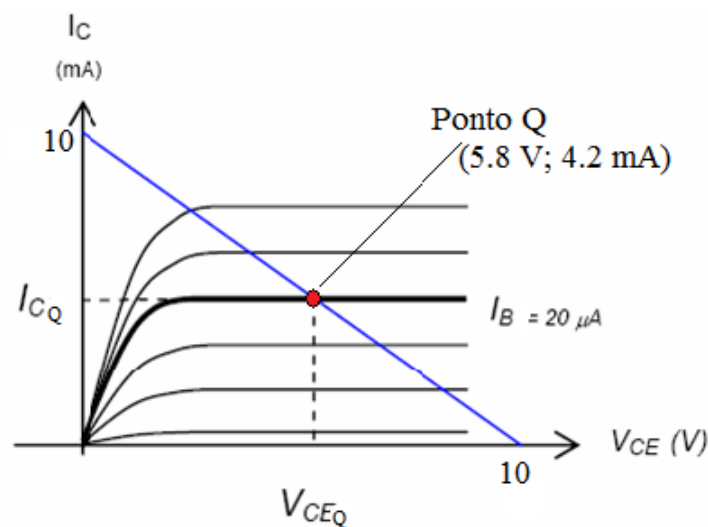


Figura 7: Recta de carga e ponto quiescente de um TBJ.

1.4 Polarização

Um facto a considerar nos transistores bipolares de junção está relacionado com a não estabilização do ponto de funcionamento. Este facto tem grandes implicações, pois, o transistor rapidamente pode sair da região activa e entrar ou na saturação ou no corte e, em vez de efectuar uma operação linear passar a efectuar operações não - lineares (por exemplo, servir como um grameador ou limitador de sinal), conforme a fig.8.

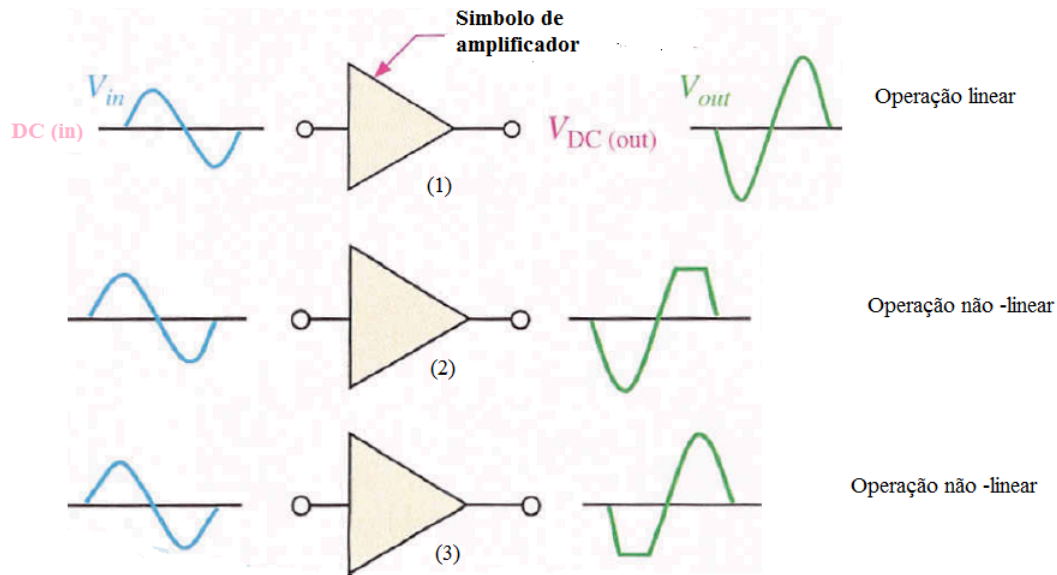


Figura 8: Operação linear e não -linear

A falta de estabilidade no posicionamento do ponto de funcionamento deve-se a não uniformidade do ganho de corrente em emissor comum (β) mesmo para transístores do mesmo tipo e também à variação da temperatura durante o funcionamento dos TBJs.

Assim, a polarização visa estabelecer um ponto de operação no qual o TBJ deve ter uma operação linear, isto é, não cause distorção do sinal na saída. Para tal, é necessário que se forneça ao transistor um sinal (corrente e voltagem) CC insensível às variações de temperatura e do ganho de corrente (β).

Existem vários arranjos de polarização dos TBJs mas, o mais usado para fins de amplificação é o de divisor de tensão¹, conforme a fig.9.

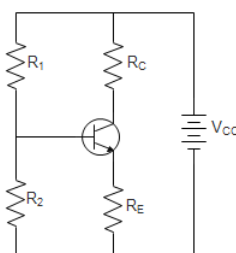


Figura 9: Divisor de tensão

¹O estudante poderá consultar manuais para se familiarizar com as outras formas de polarização dos TBJs, por exemplo, Sedra A. S & Smith K.C (2000) Microelectrônica; pags. 262 -268

Para análise podemos transformar este circuito para o da fig.10.

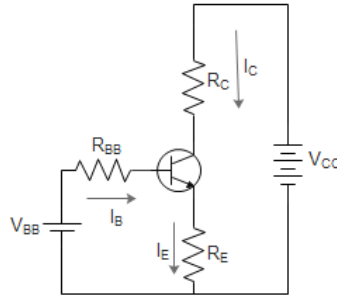


Figura 10: Divisor de tensão

Sendo:

$$R_{BB} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (14)$$

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC} \quad (15)$$

Assim, a corrente no emissor é:

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{BB}}{1+\beta}} \quad (16)$$

Para que tenhamos uma corrente pouco dependente de β é necessário que se obedecem as seguintes condições:

$$R_E \gg \frac{R_{BB}}{\beta + 1} \quad (17)$$

$$V_{BB} \gg V_{BE} \quad (18)$$

De notar que até então só fizemos menção ao ganho de corrente (β), porém, a instabilidade do ponto de funcionamento do transistor bipolar de junção também tem a ver com a variação da temperatura. Assim, são usadas outras técnicas de compensação que se baseiam em empregar dispositivos que actuam no sentido de compensar as variações devidas á elevação da temperatura durante o funcionamento do transistor.

No caso da polarização por divisor de tensão representado pela fig.9, R_1 substitui-se pela resistência de coeficiente de temperatura positiva PTC². Este dispositivo faz com que quando a temperatura do TBJ aumenta, a queda de tensão no resistor R_1 baixe.

A compensação também pode ser conseguida considerando-se o resistor R_2 . Para tal, é necessário que o mesmo seja um coeficiente de temperatura negativa (NTC), permitindo que quando a temperatura aumentar no TBJ, ele baixe a queda de tensão no R_1 .

Para um correcto funcionamento, todos os termistores (NTC e PTC) devem estar conectados com os transistores.

²PTC-Positive Temperature Coefficient

1.5 Aplicação dos TBJs como Amplificadores

Para termos uma ideia do que é o processo de amplificação vamos considerar o seguinte exemplo:

Você quando fala ao celular, a sua voz³ é convertida em sinal eléctrico pelo microfone que, depois de um certo **processamento**, é transmitido pela antena do seu celular. O sinal transmitido pela antena do seu celular é depois recebido pela antena do celular de quem esteja a falar que, por sua vez, depois de um certo **processamento** é convertido em voz no altifalante do seu celular conforme a fig.11.

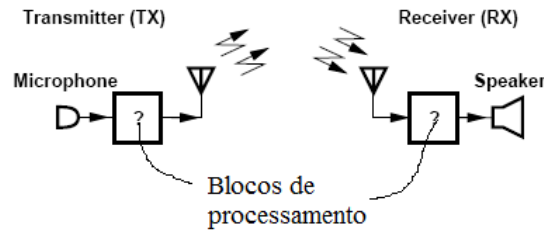


Figura 11: Processo de comunicação

Reparem que para se transmitir a nossa voz cujo comprimento (λ) é de $1.5 \times 10^7 m$ a $1.5 \times 10^4 m$, os nossos celulares deveriam ter antenas gigantes, alias, para uma antena converter de uma formas eficaz um sinal eléctrico em radiação electromagnética, seu comprimento deve estar na ordem de $1/4$ do comprimento de onda. Assim, estaríamos a dizer que para lidarmos com 20kHz precisaríamos de uma antena de 3750 m o que é quase insuportável, porém, reparem que se a frequência por exemplo for de 1.5 GHz a antena passa a ser de 5 cm.

Visto isso, podemos afirmar de uma maneira mais simplificada que a nossa voz deve ser multiplicada por um sinal senoidal de modo que se eleve a frequência e, por via disso reduzir-se as dimensões da antena. Ainda mais, é necessário que a antena (Tx) irradie uma onda de maior potência de modo que tenha maior alcance. Assim, é necessário que o circuito interno do celular gere uma voltante alterna relativamente maior (por exemplo, com um valor pico a pico de 20V).

Em suma, podemos afirmar que só para o estágio de transmissão da nossa voz devemos ter um **oscilador** - que gera o sinal senoidal e um **amplificador de potência** - que permite que antena emita uma radiação de maior potência, conforme se ilustra na fig.12.

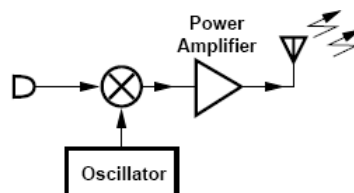


Figura 12: Diagrama de transmissão do sinal num sistema de comunicação

Certamente que no estágio de recepção também existe amplificadores, como por exemplo, o am-

³A banda de frequência da voz é de 20Hz a 20kHz

plificador de baixo ruído (*Low Noise Amplifier*)⁴. Porém, com este exemplo pretendíamos evidenciar o porquê da necessidade de se estudar amplificadores.

Voltando agora à nossa consideração de a aplicação dos TBJs como amplificadores vamos, como já fizemos menção no início, considerar a configuração emissor comum e nela determinarmos as resistências de entrada e de saída, os ganhos de tensão e de corrente. As resistências de entrada e de saída são muito fundamentais pois são elas que permitem determinar as frequências de corte (superior e inferior) do amplificador. Também referir que é importante que antes de mais se estabeleça o ponto de operação (quiescente)dc do TBJ visto que este é que controla muitas das características de amplificação, como é o caso de parâmetros do pequeno sinal (sinal alterno de excitação tal como a senóide no oscilador da fig.12 do nosso exemplo), os ganhos de tensão e de corrente, a mínima amplitude do sinal de entrada e de saída, o consumo de potência e mais outros.

Geralmente encontramos dois tipos de capacitores, isto é, os de acoplamento e os de desacoplamento, conforme a fig.13.

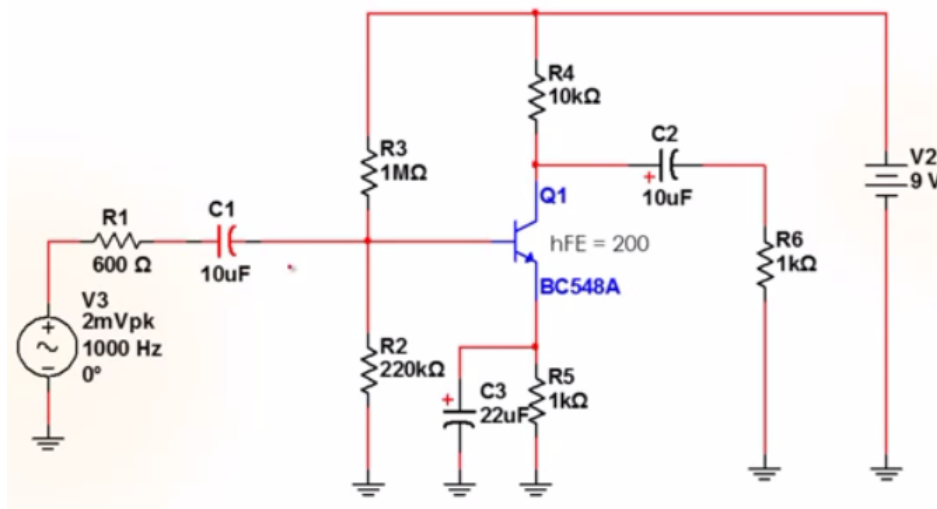


Figura 13: Amplificador EC

Os **capacitores de acoplamento** permitem a passagem do sinal alterno (ca) para dentro do estágio amplificador assim como permitem a conexão do resistor de carga (vide c_1 e c_2 da fig.13).

Os **capacitores de desacoplamento** são aqueles que acoplam pontos desaterrados à terra (vide c_3 da fig.13).

Considerando-se a a reatância de um capacitor dada pela eq.19.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (19)$$

verifica-se que para sinais de baixa frequência, como é o caso do sinal contínuo, a reatância é grande ($f \rightarrow 0 : X_C \rightarrow \infty$) e, por essa razão, todos os capacitores ficam em aberto. No caso de sinais alternos que tem uma frequência relativamente alta ($f \rightarrow \infty : X_C \rightarrow 0$), os capacitores ficam em curto.

⁴O estudante é recomendado a procurar a informação detalhada nos manuais de leitura.

Na realidade, as reatâncias tem valores finitos, pelo que, é recomendável que tenham seguintes valores:

i - Capacitor de acoplamento:

$$X_C = \frac{1}{10} R \quad (20)$$

$$R = R_{Th} + R_L \quad (21)$$

ii - Capacitor de desacoplamento:

$$X_C = \frac{1}{10} R_{Th} \quad (22)$$

- Quando estivermos a procura do ponto de operação do TBJ, consideraremos a fonte contínua e o sinal alterno não terá nenhuma influência visto que, os capacitores que permitem a ligação estão em aberto.

- Quando já estivermos a analisar amplificação, a alimentação contínua está em curto e os capacitores também estão em curto permitindo a condução.

Fazendo-se uma análise dc do circuito da fig.13 conseguimos reduzi-lo para o da fig.14.

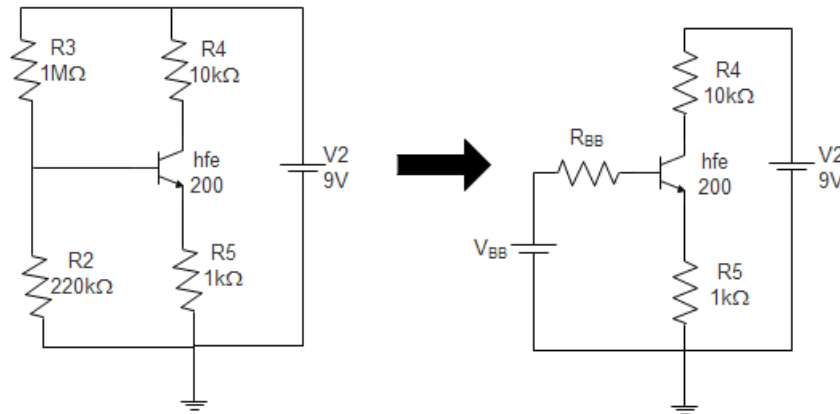


Figura 14: Amplificador EC- Análise dc

A determinação de R_{BB} e V_{BB} consegue-se tal como se fez para a fig.10. Assim, $R_{BB} = 180327.8689\Omega$ e $V_{BB} = 1.62295082V$ e as correntes são:

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_5 + \frac{R_{BB}}{h_{fe}+1}} = 486.4\mu A \quad (23)$$

$$I_B = \frac{I_E}{h_{fe} + 1} = 2.4\mu A \quad (24)$$

$$I_C = 484.0\mu A \quad (25)$$

A tensão colector-emissor é:

$$V_{CE} = V_2 - I_E(\alpha R_4 + R_5) = 3.67V \quad (26)$$

Assim, o ponto quiescente é $(3.67V; 484.0\mu A)$.

Deste modo, conseguimos determinar o ponto de operação do transistor do circuito da fig.13. Em seguida, vamos iniciar a análise ac do nosso amplificador.

Reparando-se para o circuito da fig.13, verifica-se que o sinal ac é pequeno (\sim milivolts) pelo que, a análise que faremos é conhecido por *análise em pequenos sinais*.

A análise em pequenos sinais pode ser feita usando-se dois modelos, a saber:

- i - Modelo π -híbrido e
- ii - Modelo em T .

De realçar que na nossa consideração, usaremos o modelo π -híbrido visto que é o mais usado. Porém, há situações em que o modelo em T é uma alternativa que permite fazer a análise do amplificador com muita rapidez, pelo que, recomenda-se aos queridos estudantes a fazer um estudo independente sobre o mesmo.

1.5.1 Modelo π -híbrido

A análise dos TBJs para a operação com pequenos sinais procede-se tendo em consideração aos seguintes passos:

- 1º - Determinar o ponto de operação dc;
- 2º - Calcular os valores dos parâmetros do modelo para pequenos sinais tais como, a transcondutância ($g_m = \frac{I_C}{V_T}$), a resistência para pequenos sinais entre a base e o emissor ($r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$) e a resistência do emissor ($r_e = \frac{V_T}{I_E} \simeq \frac{1}{g_m}$);
- 3º - Eliminar todas as fontes dc (curto-circuito para a fonte de tensão e, circuito-aberto para as fontes de corrente);
- 4º - Substituir o TBJ pelo seu modelo (Modelo π -híbrido para o nosso caso);
- 5º - Analisar o circuito resultante e determinar os parâmetros de interesse.

Baseando-se nestes passos, podemos já analisar o circuito da fig.13. Quando a fonte de tensão dc e os capacitores são curto - circuitados, passamos a ter o circuito representado pela fig.15.

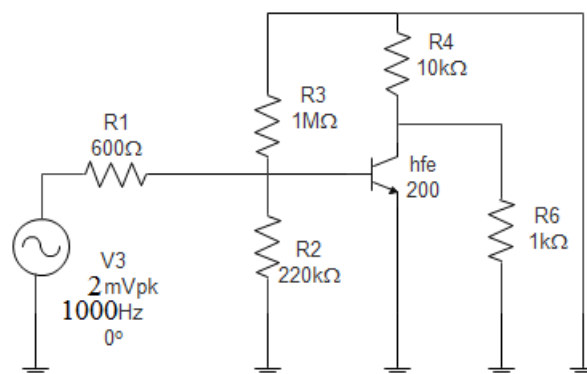


Figura 15:

Substituindo-se este circuito pelo seu equivalente modelo π -híbrido fica:

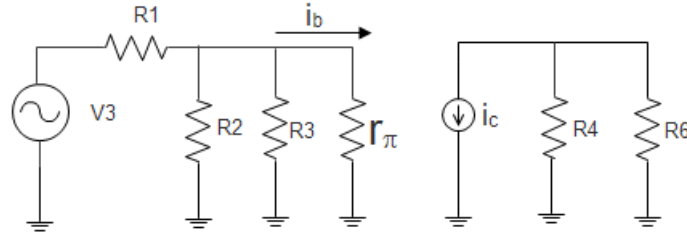


Figura 16:

onde,

$$r_{\pi} = \frac{V_T}{I_B} \quad (27)$$

visto que a resistência interna do emissor é:

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} \quad (28)$$

Conjugando-se eqs.27 e 28 e a relação entre I_B e I_E , a resistência para pequenos sinais fica:

$$r_{\pi} = r_e(\beta + 1) \quad (29)$$

A razão entre a corrente do colector e a tensão térmica denomina-se transcondutância (g_m).

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad (30)$$

Ainda mais, reparando-se para a expressão da transcondutância, a resistência para pequenos sinais pode ainda ser expressa por:

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} \quad (31)$$

Assim, considerando a temperatura de $300k$ para o circuito da fig.13 temos:

$r_{\pi}(\Omega)$	$r_e(\Omega)$	$g_m(S)$
10416.66667	51.39802632	0.01936

Reparem que R_2 , R_3 e r_{π} estão em paralelo, daí que podemos achar impedância de entrada (Z_{in}) tendo em consideração que R_1 é resistência interna do gerador⁵.

Do circuito do colector também temos R_4 e R_6 em paralelo. Assim, podemos reduzir o circuito da fig.16 para o da fig.17.

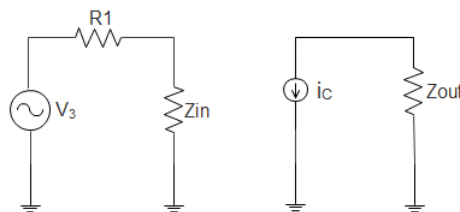


Figura 17:

⁵Aqui foi considerada mas há casos em que pode não aparecer.

Fazendo-se os cálculos chegamos aos seguintes resultados:

$Z_{in}(k\Omega)$	$V_{r_\pi}(mV)$	$i_b(nA)$	$i_c(\mu A)$	$Z_{out}(\Omega)$	$V_{out}(mV)$
9.85	1.88	181.00	36.19	909.00	32.90

onde,

$$V_{r_\pi} = \frac{Z_{in}}{R_1 + Z_{in}} \times V_3 \quad (32)$$

$$i_b = \frac{V_{r_\pi}}{r_\pi} \quad (33)$$

$$i_c = h_{fe} \times i_b \quad (34)$$

$$V_{ou} = i_c \times Z_{out} \quad (35)$$

Comparando-se a tensão de entrada ($V_{in} = 2mV_P$) e a tensão de saída no amplificador ($V_{out} = 32.9mV_P$), verifica-se que de facto o sinal de entrada foi ampliado. Deste modo, conseguimos verificar que o transistor bipolar de junção funciona como amplificador.

O ganho de tensão é:

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} \quad (36)$$

ou

$$A_v = -\frac{\beta(R_{BB}/r_\pi)(R_C//R_L)}{[(R_{BB}/r_\pi) + R_S]r_\pi} \quad (37)$$

onde R_S é a resistência da fonte geradora do sinal que, para o nosso exemplo, corresponde a R_1 da fig.13. O sinal negativo ilustra a inversão de fase do sinal de saída se comparada com o de entrada (vide a operação linear da fig.8).

Auto avaliação.

Cada estudante deve-se fazer as seguintes questões:

1. O que é um TBJ?
2. Como é que funciona?
3. Como é que se classifica? E na prática, como é que faço a distinção?
4. Como é que posso saber se um TBJ está ou não danificado tendo em conta que não sofreu nenhuma perfuração térmica que se possa visualizar logo a primeira vista?
5. Porque se polariza um TBJ?
6. Quais são as aplicações de um TBJ? E quais são os requisitos para que satisfaça cada uma dessas aplicações?
7. Sei usar o modelo π -híbrido para analisar amplificadores?

Bons Estudos!!!!

2 Bibliografia

1. Jaeger Richard C. & Blalock T.(2010). *Microelectronic - Circuit Design*. Fouth Edition
2. Millman, J. & Halkias, C. *Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems*. International Student Edition
3. Robert Boylestad & Louis Nashelsky. *Electronic Devices and Circuit Theory*. Seventh Edition.
4. Sedra A. S & Smith K.C (2000) Microeletrônica. 4^a Edição. São Paulo, Brasil.
5. Simon M. Sze (2001). *Semiconductor Devices, Physics and Technology*. John Wiley & Sons, 2nd Edition.