

## Capítulo 5 – Amplificador de Pequenos Sinais TJB

No capítulo anterior, estudou-se as diferentes formas de polarização de um transistor TJB, bem como as problemáticas sobre a variação do ganho de corrente ( $h_{FE}$  ou Beta), e também foram analisadas sugestões para a eliminação desse problema.

Agora no capítulo 5, será estudado o transistor TJB funcionando como amplificador de pequenos sinais, ou seja, como amplificador apenas de tensão, não se preocupando inicialmente com a corrente, deixando esse estudo para disciplinas mais a frente do curso de engenharia.

### 5.1 – Modelamento AC do Transistor TJB

Um modelo é a combinação de elementos de circuito apropriadamente escolhidos, que aproximam melhor o funcionamento real de um dispositivo semiconductor sob condições de operação específica. Existem basicamente, dois modelos para a análise AC, possíveis para o transistor TJB:

- ✓ *Modelo  $r_E$* : derivado diretamente das condições de operação do transistor
- ✓ *Parâmetros híbridos*: fornecido pelos fabricantes para uma determinada região de operação

Os parâmetros do modelo  $r_E$  podem ser retirados a partir dos parâmetros híbridos, para uma determinada região de operação. Com relação à precisão, os parâmetros híbridos sofrem algumas limitações para um conjunto particular de condições de operação.

Já com o modelo  $r_E$ , é possível que seja determinado esses parâmetros para qualquer região de operação, não ficando limitado ao conjunto de parâmetros fornecidos pela folha de especificação. Entretanto, esse modelo é um tanto falho na justificação da impedância de saída e nos efeitos da realimentação da saída para a entrada.

Para determinar-se o equivalente AC de um circuito, basicamente alguns passos devem ser seguidos para a obtenção do equivalente AC:

- ✓ Fazer com que todas as fontes de tensão DC sejam substituídas por um curto circuito equivalente para o terra, eliminando-as;
- ✓ Substituir todos os capacitores também por um curto circuito equivalente;
- ✓ Remover todos os componentes em paralelo, redesenhando o circuito.

Quando se deseja iniciar um estudo AC de um circuito, é desejável que se tenha em mente os parâmetros que são realmente importantes para a análise como um todo (Impedância de Entrada e de Saída, Ganho de Tensão AV). Lembrando de alguns teoremas já estudados, talvez o que será mais utilizado nas aulas de DCE para a análise AC de circuitos, será o Teorema da Máxima Transferência de Energia, que basicamente tem como objetivo, estudar a transferência de energia de um circuito a outro, com a mínima perda.

Em Eletrônica Analógica I, o estudo do modelamento do transistor TJB será realizado sempre usando a configuração de polarização emissor comum, porém os estudos são análogos para as demais configurações, e deixa-se como estudo para o aluno da disciplina, as demais configurações possíveis.

### 5.1.1 – Modelo $r_E$ do Transistor TJB:

Esse modelo utiliza como elementos de circuito para a representação do transistor, um diodo e uma fonte de corrente, controlada por corrente, lembrando que os transistores TJB são dispositivos de corrente controlados por corrente. A Figura 5.1 a seguir ilustra o modelamento e a substituição, do ponto de vista de terminal, do transistor pelos elementos de circuito propostos pelo modelo (diodo e fonte de corrente).

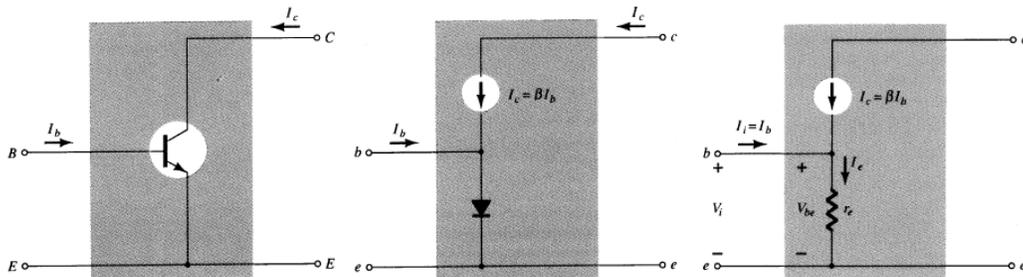


Figura 5.1 – Transistor TJB Emissor comum e o seu respectivo modelo  $r_E$

#### ✓ Equacionamento do Modelo e Determinação de $Z_{IN}$ e $Z_{OUT}$ :

A corrente no diodo pode ser escrita como sendo igual a:

$$I_{DIODO} = I_{EMISSOR} = I_{COLETOR} + I_{BASE}$$

Para a determinação da Impedância de Entrada  $Z_{IN}$ , será usado o conceito de quadripolos ou sistema de duas portas (Figura 5.2), estudo esse que será desenvolvido na disciplina de Circuitos Elétricos I com mais detalhes. Através da determinação da Impedância de Entrada  $Z_{IN}$ , ficará claro o porquê esse modelo é sensível ao DC de operação do amplificador.

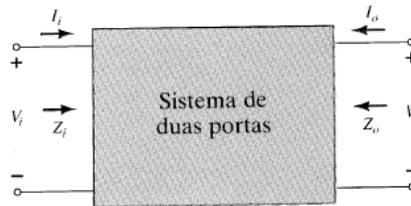


Figura 5.2 – Conceito de Quadripolo

$$Z_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} \rightarrow Z_{IN} = \frac{V_{BE}}{I_B}, \text{ mas } V_{BE} \cong \beta * I_B * r_E \rightarrow \boxed{Z_{IN} \cong \beta * V_{BE}}$$

Uma vez definida a Impedância de Entrada, resta à determinação da Impedância de Saída. Porém ao observar-se a Figura 5.1, percebe-se a ausência de um valor de resistência para que possa ser determinado o valor da Impedância de Saída, uma vez que, o estudo de quadripolos sugere que a Impedância de Saída seja determinada colocando-se os terminais de entrada em curto circuito. Realizando esse procedimento, toda a corrente de coletor irá ser desviada para o curto circuito, fazendo com que a resistência  $r_E$  torne-se nula para a Impedância de Saída, tendo efeito somente para a Impedância de Entrada.

Dessa forma, para o modelo  $r_E$  será adotado que o valor de Impedância de Saída será um valor extremamente elevado, tendendo a infinito.

$$\therefore \boxed{Z_{OUT} \cong \infty}$$

### 5.1.1 – Modelo Híbrido Equivalente do Transistor TJB:

Como foi estudado e provado no item anterior, o modelo  $r_E$  é um modelo que é sensível ao nível DC de operação do transistor TJB. Dessa forma, pode-se admitir que a sua Impedância de Entrada seja um valor que pode variar em função do ponto DC de operação do transistor.

Já no modelo híbrido, os parâmetros são definidos em um ponto de operações fixo, definido pelo fabricante, porém que pode ou não refletir as condições reais de operação do amplificador. Isso é devido ao fato de que as tabelas não fornecem os parâmetros para um circuito equivalente, qualquer que seja o ponto de operações, pois os fabricantes dos dispositivos escolhem condições de operação que acreditam refletir as características gerais e que serão mais utilizadas nas maiorias das aplicações com o dispositivo em questão. Os parâmetros híbridos são definidos como:

- ✓  $h_{IE}$ : Impedância de Entrada
- ✓  $h_{RE}$ : Realimentação de Tensão
- ✓  $h_{FE}$ : Ganho de Corrente
- ✓  $h_{OE}$ : Admitância de Saída

Para o entendimento e determinação dos parâmetros e a posterior obtenção do modelo híbrido, será utilizado o mesmo conceito de quadripolo apresentado pela Figura 5.2 para auxiliar o desenvolvimento. Segundo o estudo de quadripolo, o conjunto de equações que determinam os parâmetros híbridos, a partir da Figura 5.2 é:

$$V_{IN} = h_{11} * I_{IN} + h_{12} * V_{OUT}$$
$$I_{OUT} = h_{21} * I_{IN} + h_{22} * V_{OUT}$$

Substituindo os índices *IN* dos valores de tensão e corrente de entrada, pelos valores de tensão  $V_{BE}$  e corrente de base  $I_B$  e, da mesma forma, os índices *OUT* dos valores de tensão e corrente de saída, pelos respectivos valores de tensão  $V_{CE}$  e corrente de coletor  $I_C$ , temos:

$$V_{BE} = h_{11} * I_B + h_{12} * V_{CE}$$
$$I_C = h_{21} * I_B + h_{22} * V_{CE}$$

✓ **Determinação dos Parâmetros  $h_{11}$  e  $h_{21}$  Fazendo  $V_{CE} = 0$**

Das equações apresentadas anteriormente, fazendo  $V_{CE}$  igual a zero, temos que:

$$V_{BE} = h_{11} * I_B \rightarrow \boxed{h_{11} = h_{IE} = \frac{V_{BE}}{I_B} [\Omega]}$$

$$I_C = h_{21} * I_B \rightarrow h_{21} = h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} [Adimensional]$$

Dessa forma, ficam determinados as grandezas de Impedância de Entrada e Ganho de Corrente. O índice 21 indica que a grandeza em questão está relacionando uma grandeza de saída com uma grandeza de entrada, portanto, uma relação direta de transferência.

✓ **Determinação dos Parâmetros  $h_{12}$  e  $h_{22}$  Fazendo  $I_B = 0$**

Das equações apresentadas anteriormente, fazendo  $I_B$  igual a zero, temos que:

$$V_{BE} = h_{12} * V_{CE} \rightarrow h_{12} = h_{RE} = \frac{V_{BE}}{V_{CE}} [Adimensional]$$

$$I_C = h_{22} * V_{CE} \rightarrow h_{22} = h_{OE} = \frac{I_C}{V_{CE}} [Siemens]$$

Dessa forma, ficam determinados as grandezas de Admitância de Saída e Ganho de Tensão. O índice 12 indica que a grandeza em questão está relacionando uma grandeza de entrada com uma grandeza de saída, portanto, uma relação reversa de transferência.

Uma vez determinado todos os parâmetros, o modelo equivalente híbrido fica representado conforme podemos observar na Figura 5.3 a seguir. Observe o circuito com os seus elementos, e tente realizar a montagem das equações apresentadas inicialmente, através da análise de malhas.

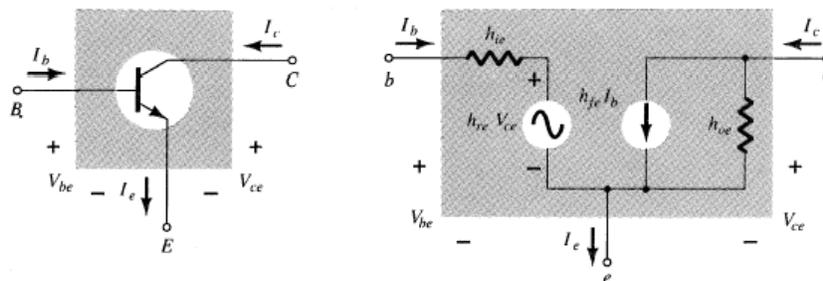


Figura 5.3 – Modelo AC Equivalente Híbrido

## 5.2 – Amplificadores de Pequenos Sinais com Transistor TJB

Uma vez estudado como é realizada a polarização do transistor TJB, e também os modelos para análise AC (estudo do amplificador), os próximos passos da nossa disciplina irão ser focados no estudo do amplificador de pequenos sinais, usando como modelo AC, o modelo  $r_E$ , porém o aluno do curso poderá desenvolver os mesmos passos propostos nos itens seguintes, usando o modelo híbrido do transistor TJB.

Basicamente, o amplificador é “criado” colocando-se dois capacitores ao circuito original de polarização, seja ele qual for. Esses capacitores têm como função, na entrada do circuito, de eliminar os níveis DC que possam estar presentes no sinal de entrada, que poderiam atrapalhar e mudar a polarização do circuito. Já na saída do circuito, a função se resume basicamente a eliminação do nível DC de polarização, que poderia ser transmitido à carga ou ao estágio seguinte do amplificador. Mais a diante, esses capacitores irão também influenciar na resposta em frequência do amplificador, porém essa abordagem será estudada em capítulos mais a diante do curso de DCE.

Para o equacionamento do circuito, e determinação dos parâmetros de Impedância de Entrada, Impedância de Saída e Ganho de Tensão  $AV$ , alguns passos devem ser seguidos para que o circuito possa ser preparado para a análise AC:

- ✓ Remover todas as fontes de tensão DC, impondo um curto circuito para o terra;
- ✓ Substituir todos os capacitores por um curto circuito equivalente;
- ✓ Substituir o transistor pelo modelo AC equivalente;
- ✓ Eliminar os elementos em paralelo, se caso surgirem, e finalizar redesenhando o circuito.

O nosso estudo será direcionado para as três configurações de polarização apresentadas, porém o grande esforço e dedicação ficarão concentrados no circuito de polarização por divisor de tensão, por razões já previamente comentadas sobre a eliminação da necessidade do beta para o seu ponto de operação.

### 5.2.1 – Configuração Emissor Comum com Polarização Fixa

A Figura 5.4 a seguir, mostra o circuito amplificador, usando como polarização do TJB a polarização fixa. Perceba o acréscimo dos capacitores na entrada e na saída do circuito, ligado a base do transistor ( $C_1$ ) e no coletor do transistor ( $C_2$ ) respectivamente.

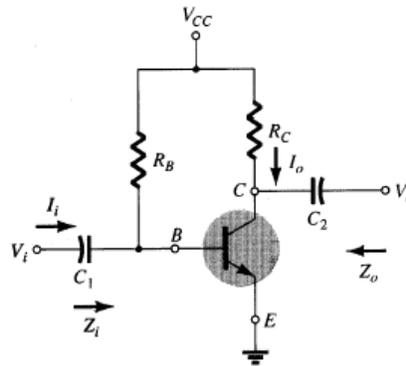


Figura 5.4 – Amplificador de Pequenos Sinais com Polarização Fixa

Realizando os passos propostos inicialmente para a obtenção do modelo AC, e substituindo o transistor pelo modelo  $r_E$  equivalente, as Figuras 5.5 e 5.6 mostram os circuitos finais obtidos, sendo o circuito da Figura 5.6 o que será usado para realizar e desenvolver todo o equacionamento para a obtenção da Impedância de Entrada, de Saída e do Ganho de Tensão AV.

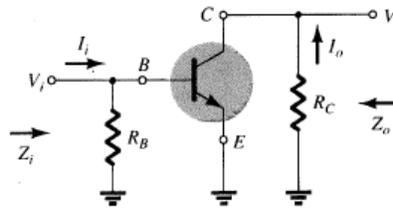


Figura 5.5 – Circuito com os Capacitores Eliminados, bem como a fonte de Tensão DC

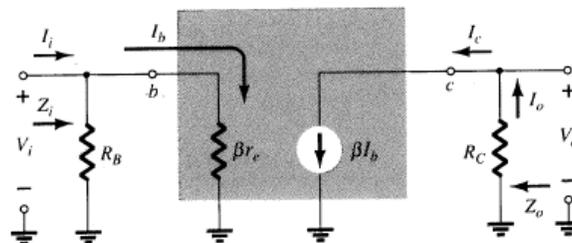


Figura 5.6 – Circuito para Análise AC

✓ **Equacionamento do Circuito:**

$$Z_{IN} = R_B // (\beta * r_E)$$

$$Z_{OUT} \cong R_C$$

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \rightarrow \frac{Z_O * I_O}{Z_{IN} * I_{IN}} \rightarrow \frac{-R_C * I_C}{(R_B // (\beta * r_E)) * I_B} \rightarrow I_C = \beta * I_B \therefore A_V = - \frac{R_C * \beta}{R_B // (\beta * r_E)}$$

Analisando a equação que representa o ganho AV, percebe-se que aparece um índice negativo antes da equação. Esse índice negativo surge apenas para representar que o sentido real da corrente no modelo está sendo considerado no sentido errado. Na prática, isso significa dizer apenas que existirá uma inversão de fase do sinal aplicado ao amplificador, fato esse que pode ser observado na Figura 5.7 a seguir. Essa inversão de fase é uma característica dos amplificadores montados na configuração emissor comum, e também existirá nas demais configurações com as outras polarizações.

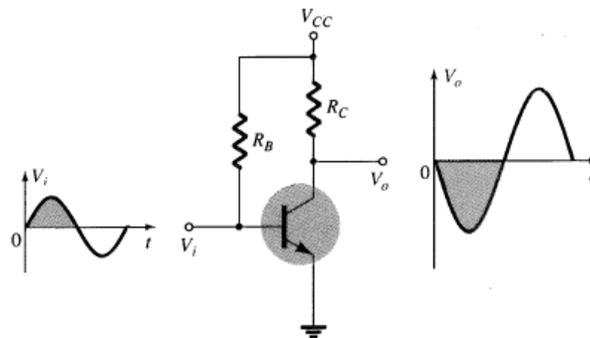


Figura 5.7 – Inversão de Fase da Tensão

**5.2.2 – Configuração Emissor Comum com Polarização por Polarização Estável de Emissor**

A Figura 5.8 a seguir, mostra o circuito amplificador, usando como polarização do TJB a polarização por polarização estável. Perceba o acréscimo dos capacitores na entrada e na saída do circuito, ligado a base do transistor ( $C_1$ ) e no coletor do transistor ( $C_2$ ) respectivamente.

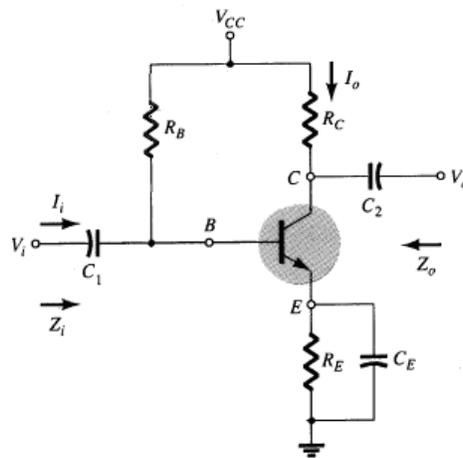


Figura 5.8 – Amplificador Pequenos Sinais – Polarização Estável, com Capacitor  $C_E$

Mais um capacitor, o capacitor  $C_E$  é acrescentado ao circuito com o objetivo de elevar o ganho de tensão, eliminando a resistência de realimentação  $R_E$  (resistor de emissor) que surge no estudo AC do amplificador. Dessa forma, o circuito para a análise AC, usando o modelo do transistor  $r_E$  fica idêntico ao circuito de análise AC do circuito de Polarização Fixa. Dessa forma, todo o equacionamento dessa configuração passa a ser o mesmo apresentado pela configuração anterior, com os mesmos valores de  $Z_{IN}$ ,  $Z_{OUT}$  e Ganho AV.

Caso o capacitor  $C_E$  não fosse empregado no circuito, a Figura 5.9 apresenta o equivalente AC do amplificador. Perceba o efeito descrito da resistência  $R_E$  de emissor, como um elemento comum ao circuito de entrada e de saída. Os efeitos sobre os valores de  $Z_{IN}$ ,  $Z_{OUT}$  e do Ganho AV, devido à eliminação do capacitor  $C_E$  fica como sugestão de estudo ao aluno da disciplina de Eletrônica Analógica I.

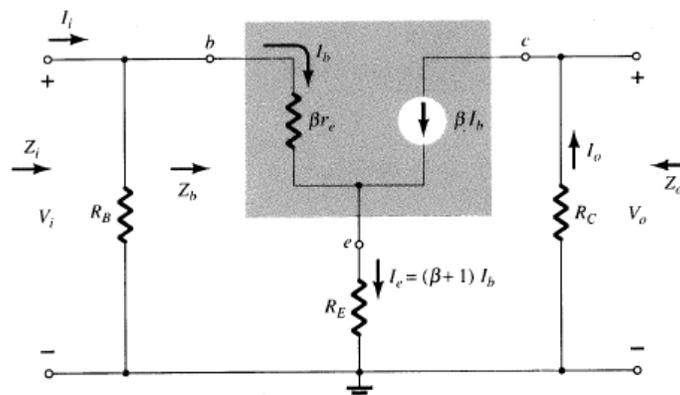


Figura 5.9 – Amplificador Pequenos Sinais, Polarização Estável de Emissor – Análise AC, sem o Capacitor  $C_E$

### 5.2.3 – Configuração Emissor Comum com Polarização por Divisor de Tensão de Base

A Figura 5.10 a seguir, mostra o circuito amplificador, usando como polarização do TJB a polarização por divisor de tensão de base. Perceba o acréscimo dos capacitores na entrada e na saída do circuito, ligado a base do transistor ( $C_1$ ) e no coletor do transistor ( $C_2$ ) respectivamente, e novamente, o capacitor  $C_E$  de desacoplamento de emissor, que, como já comentado anteriormente, fará com que o ganho do amplificador aumente.

Novamente, com o acréscimo do capacitor de desacoplamento  $C_E$  o circuito de análise AC fica idêntico ao apresentado no item 5.2.1 pela Figura 5.6, pois na montagem do circuito para a análise AC, os capacitores são eliminados por um curto circuito equivalente, fazendo com que o valor da resistência  $R_E$  seja eliminado, onde apenas será acrescentada a resistência  $R_{B2}$  ao circuito de entrada. O circuito final de análise AC é apresentado pela Figura 5.11 a seguir.

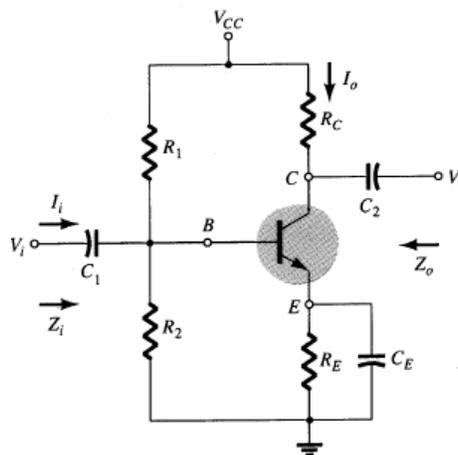


Figura 5.10 – Amplificador Pequenos Sinais, Polarização por Divisor de Tensão, com o Capacitor  $C_E$

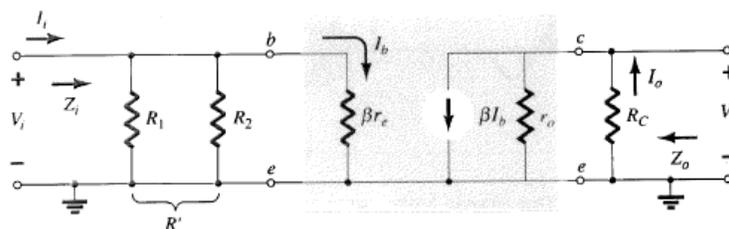


Figura 5.11 – Amplificador Pequenos Sinais, Polarização por Divisor de Tensão – Análise AC, com o Capacitor  $C_E$

Existe também uma configuração alternativa a apresentada pela Figura 5.12, que utiliza duas resistências no emissor ( $R_{E1}$  e  $R_{E2}$ ), sendo que uma delas é desacoplada por um capacitor  $C_E$  e a outra, realiza a função de realimentação, e dessa forma, consegue-se obter uma melhoria na estabilidade do circuito, sem grandes alterações no valor do ganho do circuito. Porém, o nosso estudo será focado nos amplificadores usando total desacoplamento da resistência  $R_E$  de emissor, deixando as demais configurações como uma sugestão de leitura e estudo complementar por parte do aluno.

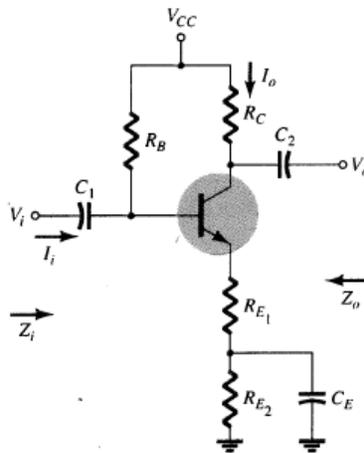


Figura 5.12 – Amplificador Pequenos Sinais, Polarização por Divisor de Tensão – Configuração Alternativa

✓ **Equacionamento do Circuito:**

$$Z_{IN} = R_{B1} // R_{B2} // (\beta * r_E)$$

$$Z_{OUT} \cong R_C$$

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \rightarrow \frac{Z_O * I_O}{Z_{IN} * I_{IN}} \rightarrow \frac{-R_C * I_C}{(R_{B1} // R_{B2} // (\beta * r_E)) * I_B} \rightarrow I_C = \beta * I_B$$

$$\therefore A_V = - \frac{R_C * \beta}{R_{B1} // R_{B2} // (\beta * r_E)}$$