

Estudo do Amplificador Diferencial

Introdução

Um dos melhores estágios de acoplamento direto é o amplificador diferencial. Este amplificador é amplamente usado como estágio de entrada de um amplificador operacional.

Representações do amplificador diferencial

Existem dois circuitos básicos para representar o amplificador diferencial. O primeiro tem duas entradas v_1 e v_2 e a tensão de saída é obtida entre dois coletores de transistores. Idealmente, o circuito é simétrico com resistores idênticos em cada coletor de transistor. A figura 1 mostra tal configuração.

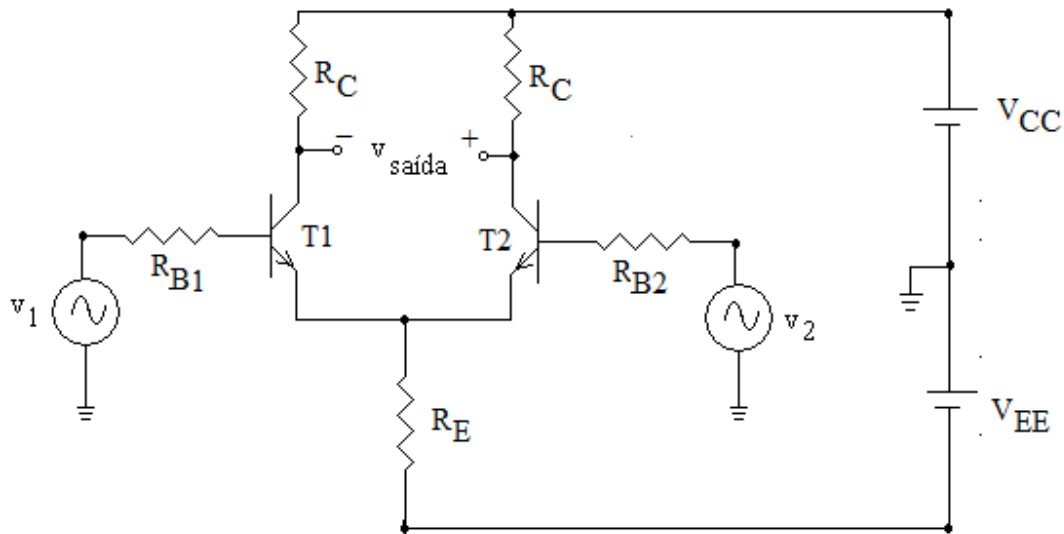


figura 1

O amplificador diferencial mostrado na figura 1 tem uma saída com terminal duplo. A entrada v_1 é chamada entrada não-inversora porque a tensão de saída está em fase com v_1 . Por outro lado v_2 é a entrada inversora porque a saída está defasada de 180° da entrada v_2 . Um amplificador diferencial amplifica a diferença entre as duas tensões de entrada, produzindo uma saída que é dada por:

$$v_{\text{saída}} = A (v_1 - v_2)$$

onde:

$v_{\text{saída}}$: tensão entre os coletores dos transistores.

A: ganho de tensão diferencial.

v_1 : tensão de entrada não inversora.

v_2 : tensão de entrada inversora.

É possível se obter uma expressão para o ganho de tensão diferencial do circuito.

O amplificador diferencial é um amplificador CC, ou seja, tem acoplamento direto. Isto significa que os sinais de entrada podem ser desde tensão contínua até sinais de frequência elevadas. O que se deve ter em mente é que em hipótese alguma a tensão amplificada na saída do circuito pode ultrapassar a tensão de polarização do circuito. No caso dos amplificadores diferenciais a alimentação CC é feita por duas fontes V_{CC} e V_{EE} .

O amplificador diferencial de dupla entrada e saída entre coletores não é muito usual em razão de se precisar ligar os dois terminais da carga aos coletores. Isto não é conveniente na maioria das aplicações porque as cargas geralmente tem terminal simples, o que significa que um lado da carga é ligado ao terra do circuito.

A figura 2 mostra a forma mais prática e mais amplamente usada de um amplificador diferencial. Ele tem várias aplicações porque pode alimentar cargas com um único terminal como amplificadores na configuração emissor comum como também amplificadores na configuração coletor comum. É conhecido com amplificador diferencial de dupla entrada e saída simples. Ele é usado no estágio de entrada da maioria dos amplificadores operacionais. Por este motivo ele será discutido em detalhes a seguir.

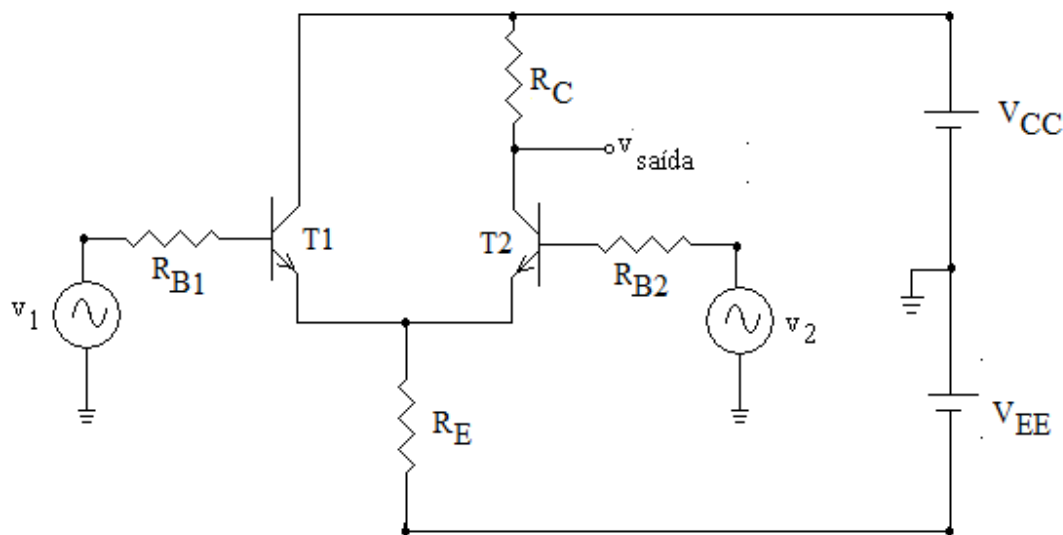


figura 2

Um amplificador diferencial amplifica a diferença entre as duas tensões de entrada, produzindo uma saída que é dada por:

$$v_{saída} = A (v_1 - v_2)$$

onde:

$v_{saída}$: tensão do coletor do transistor T_2 ao terra.

A: ganho de tensão diferencial.

v_1 : tensão de entrada não inversora.

v_2 : tensão de entrada inversora.

Análise CC de um amplificador diferencial de dupla entrada e saída simples

Para que o circuito possa amplificar a diferença entre as tensões v_1 e v_2 é preciso que se polarize os dois transistores T_1 e T_2 na região ativa. Para tanto algumas considerações são feitas: Supõe-se que os transistores são iguais, que as correntes nos coletores são praticamente iguais as correntes dos emissores, as correntes nas bases são tão pequenas que podem ser desprezadas e que as quedas de tensões nos resistores de base de cada entrada são tão pequenas que podem ser desprezadas.

Como o circuito trabalha na região ativa é possível se aplicar o teorema da superposição na análise do mesmo, ou seja, separar o efeito da análise CC do efeito da análise ca e fazer cada análise separadamente e, em seguida, apresentar na saída do circuito o resultado da análise CC e ca do circuito.

A aplicação do teorema da superposição diz que é preciso relacionar a saída com cada uma das entradas existentes no circuito. No caso se separará o efeito das fontes V_{CC} e V_{EE} das fontes v_1 e v_2 .

Para a análise CC se provoca um curto circuito nas fontes v_1 e v_2 . Tal situação é apresentada nas figuras 3.1 e 3.2. A corrente que passa no resistor R_E é conhecida como corrente de cauda (I_T). Ela é o dobro da corrente de cada emissor (I_E). A figura 3.1 mostra o circuito para calcular I_T e a figura 3.2 mostra o circuito para calcular I_E observando que cada emissor é polarizado através de uma resistência equivalente de $2R_E$. Este circuito produz as mesmas correntes do emissor que o circuito original.

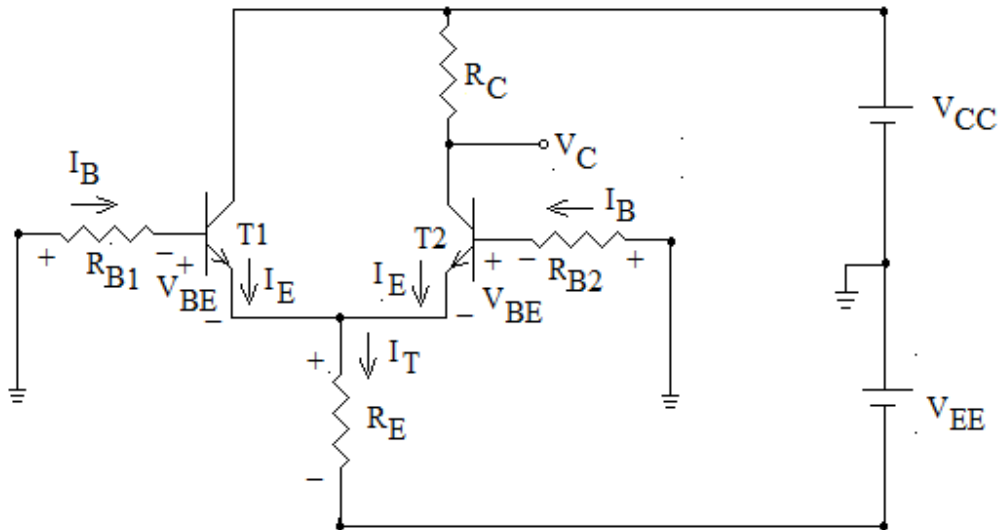


figura 3.1

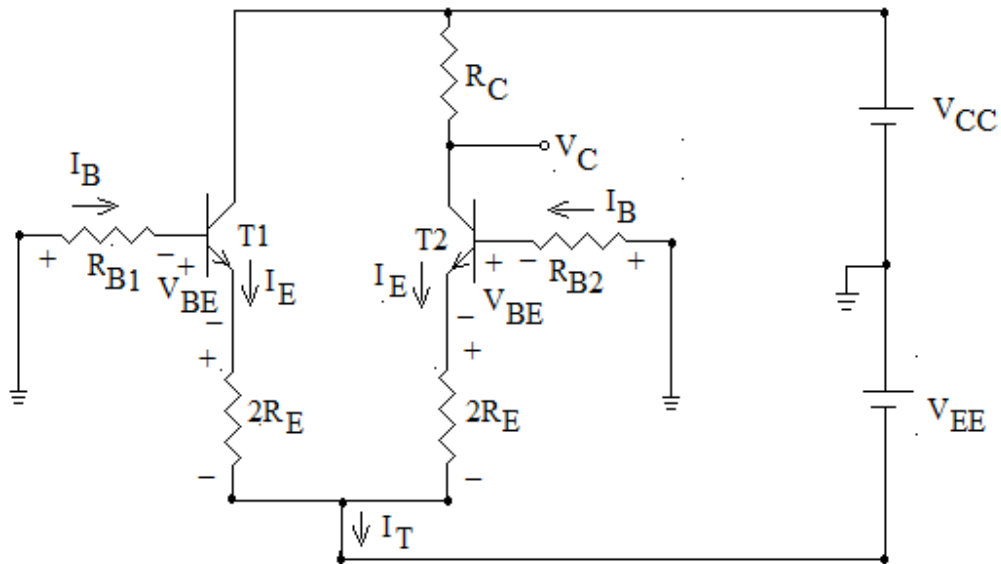


figura 3.2

Ao se aplicar as leis de Kirchhoff ao circuito mostrado nas figuras 3.1 e 3.2, tem-se que:

$$R_B I_B + V_{BE} + R_E I_T - V_{EE} = 0$$

$$R_B I_B \approx 0$$

$$+ V_{BE} + R_E I_T - V_{EE} \approx 0$$

$$I_T \approx (V_{EE} - V_{BE}) / R_E$$

$$I_T = 2I_E$$

$$I_E = (V_{EE} - V_{BE}) / 2R_E$$

$$- V_{CC} + R_C I_C + V_C = 0$$

$$I_C \approx I_E$$

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C$$

$$V_{BE} = 0,7 \text{ V}$$

$$V_B \approx 0$$

$$V_{BE} = V_B - V_E = 0,7 \text{ V} \rightarrow V_E = -0,7 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

$$V_{CE} = (V_{CC} - R_C I_C) - (-0,7)$$

$$V_{CE} = (V_{CC} - R_C I_C) + 0,7$$

O ponto de operação do transistor T_2 é identificado pela tensão V_{CE} e corrente I_C .

Corrente de compensação da entrada (corrente de offset)

A análise do circuito feito anteriormente partiu do pressuposto que os transistores T_1 e T_2 são iguais. Isto não acontece na realidade. Os dois transistores tem características semelhantes mas nunca iguais. Por este motivo é que se define a corrente de compensação de entrada.

A corrente de compensação de entrada indica o quanto os transistores estão casados (são iguais). Se os transistores fossem iguais a corrente de compensação de entrada seria zero.

$$I_{\text{entrada (comp)}} = I_{B1} - I_{B2} \text{ ou } I_{\text{entrada (comp)}} = I_{B2} - I_{B1}$$

Corrente de polarização de entrada

Como não existem dois transistores com correntes de entradas iguais se define a corrente de polarização de entrada como sendo a média das duas correntes da base.

$$I_{\text{entrada (pol)}} = (I_{B1} + I_{B2}) / 2$$

A partir das expressões obtidas para a corrente de compensação de entrada e para a corrente de polarização de entrada é possível se obter expressão para I_{B1} e I_{B2} em função destas duas.

Tensão de compensação de entrada (tensão de offset)

Se os transistores fossem iguais não haveria alteração no valor da tensão quiescente na saída do circuito, ou seja, $V_C = V_{CC} - R_C I_C$, onde I_C é aproximadamente igual a I_E . Acontece que os transistores não são idênticos e por isso a tensão V_C sofre alteração no seu valor por causa das correntes de entrada em cada transistor que não são iguais.

A tensão de compensação de saída é definida como sendo o desvio que ocorre no valor quiescente na saída do circuito [$V_{\text{saída(comp)}}$].

A tensão de compensação de entrada [$V_{\text{entrada(comp)}}$] é definida como sendo a tensão de entrada necessária para zerar ou anular a tensão de compensação de saída.

Ela é uma tensão contínua, e como o amplificador diferencial é capaz de amplificar tensão contínua a tensão de compensação de entrada pode comprometer o desempenho do circuito. Por isto que é importante tentar reduzir a tensão de compensação da saída a zero.

Por exemplo, se a folha de dados fornecer uma tensão de compensação de entrada de $\pm 5\text{mV}$, então será preciso aplicar uma tensão de $\pm 5\text{mV}$ a uma das entradas para reduzir a tensão de compensação da saída a zero. Em geral, quanto menor a tensão de compensação da entrada, melhor o amplificador diferencial porque os seus transistores estão mais bem casados.

Análise ca de um amplificador diferencial de dupla entrada e saída simples

Depois de se ter verificado que os transistores do circuito estão posicionados na região ativa é possível se analisar o circuito com relação a amplificação dos sinais de entrada v_1 e v_2 .

Para se fazer a análise ca do amplificador diferencial é preciso, mais uma vez, se aplicar o teorema da superposição, ou seja, se obter a relação entre tensão da saída e cada uma das tensões das entradas separadamente. A figura 4 mostra o circuito usado para fazer a análise ca do amplificador diferencial. No circuito são apresentadas as duas fontes v_1 e v_2 e as fontes V_{CC} e V_{EE} já estão aterradas. Em seguida, a análise do circuito terá que ser feita a partir de cada fonte separadamente.

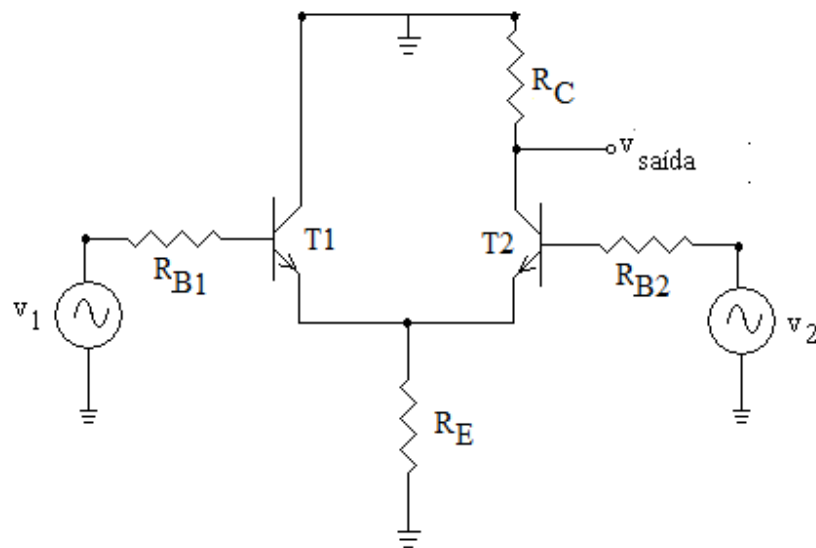


figura 4

Uma forma de se obter a expressão do ganho de tensão é aplicando o teorema da superposição ao circuito. Isto significa que é preciso calcular o ganho de tensão para cada entrada separadamente, e então combinar os dois resultados para se obter o ganho total do circuito.

Relação entre $v_{saída}$ e v_1

A figura 5 mostra o circuito que relaciona a tensão de saída com a entrada v_1 . A entrada v_2 está aterrada. As resistências R_{B1} e R_{B2} não aparecem pois não são relevantes para a análise do circuito. O sinal de entrada alimenta o transistor T_1 , que se comporta como um coletor comum também conhecido como um seguidor do emissor. Neste circuito não há defasagem entre o sinal de entrada e de saída. A saída do seguidor do emissor alimenta então o transistor T_2 , que se comporta como um amplificador base comum. O amplificador base comum também não provoca defasagem entre o sinal de entrada e de saída. Como não há defasagem entre entrada e saída pode-se dizer que a entrada v_1 é a entrada não inversora.

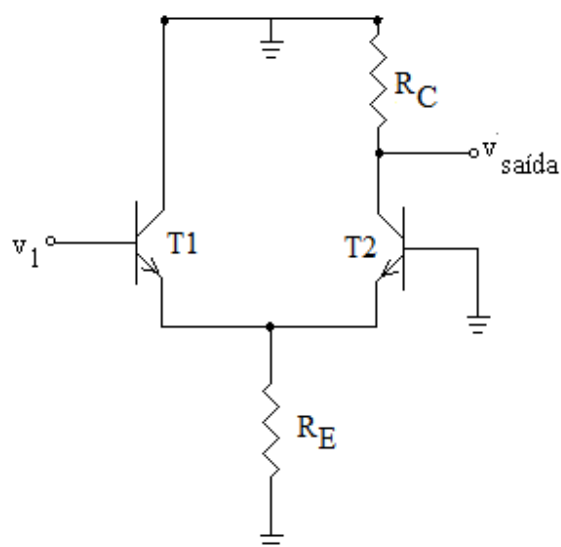


figura 5

Para que a análise do circuito possa ser efetuada é preciso se criar um modelo matemático para representar os transistores. Tal modelo existe e é conhecido como o modelo Ebers-Moll para transistores em baixas frequências. O modelo de Ebers-Moll é usado tanto para representar o transistor na análise CC quanto na análise CA. Tais modelos são mostrados na figura 6.

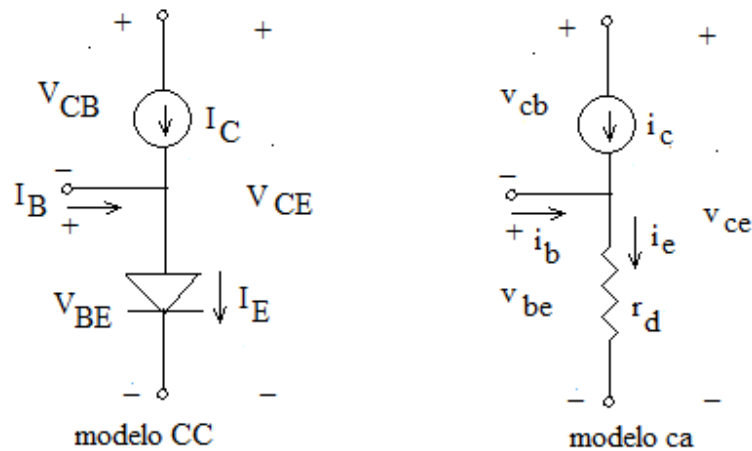


figura 6

O modelo usado para representar o transistor quando na presença de um sinal variante no tempo apresenta entre a base e emissor uma resistência dinâmica r_d (figura 6). Tal resistência é o resultado da representação do diodo apresentado no modelo CC da base para o emissor já que a junção está diretamente polarizada (figura 6).

À temperatura ambiente (em torno de 25°C), a resistência dinâmica r_d é aproximadamente igual a:

$$r_d = 25 \text{ mV} / I_E$$

Como já sabemos como calcular I_E através da análise do circuito de polarização do amplificador diferencial, a resistência r_d torna-se o elo de ligação entre a polarização e a amplificação do circuito.

A partir da possibilidade de representar cada transistor por seu modelo matemático é possível apresentar o circuito mostrado na figura 5 pelos circuitos representados nas figuras 7.1 e 7.2.

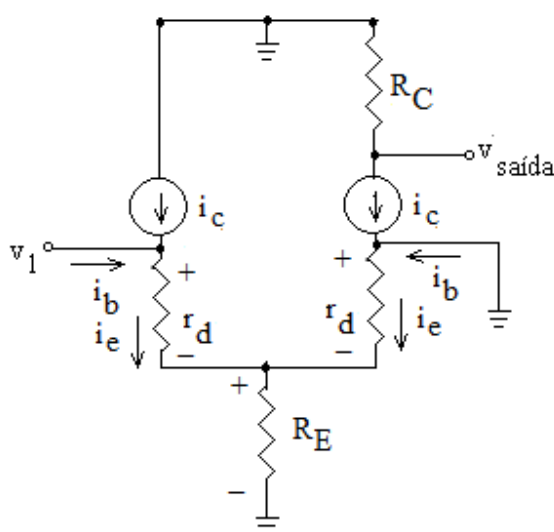


figura 7.1

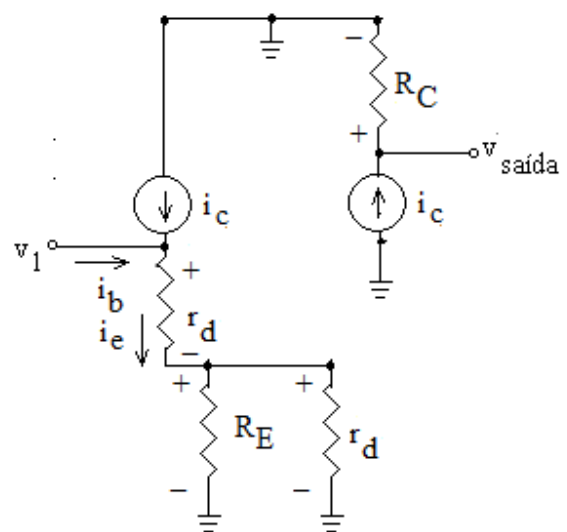


figura 7.2

A figura 7.1 mostra apenas a transformação de cada transistor em seu modelo. Já a figura 7.2 mostra a adaptação que precisa ser feita no circuito já que os resistores r_d e R_E estão em paralelo mas no circuito da figura 7.1 estão com polaridades diferentes. Para que os dois resistores mantenham a mesma polaridade foi necessário inverter o sentido da fonte de corrente i_c que alimenta o resistor R_C . A ordem de grandeza do resistor R_E é muito maior do que a ordem de grandeza do resistor r_d com isso é possível se transformar esse paralelo na própria resistência r_d . Tal modificação pode ser vista no circuito mostrado na figura 8.

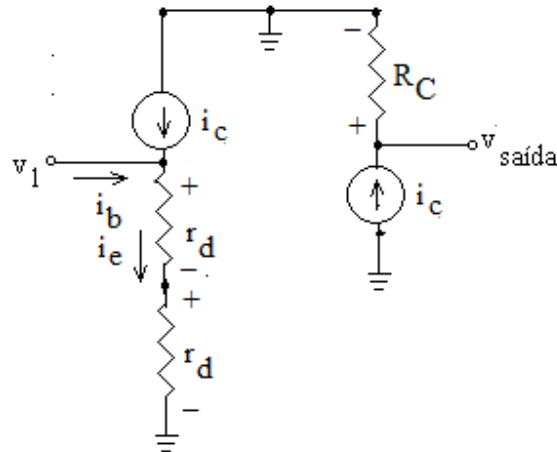


figura 8

Ao se aplicar as leis de Kirchhoff ao circuito mostrado na figura 8, tem-se que:

$$v_1 = 2 r_d i_e$$

$$v_{saída} = R_C i_c$$

$$A = v_{saída} / v_{entrada} = v_{saída} / v_1$$

$$A = (R_C i_c) / (2 r_d i_e)$$

$$i_c \approx i_e$$

$$A = R_C / 2 r_d$$

O ganho de tensão é dado pela expressão: $A = R_C / 2 r_d$

Relação entre $v_{saída}$ e v_2

O que será feito a seguir é mostrar o desenvolvimento do ganho de tensão agora levando em consideração a entrada v_2 e a tensão de saída. No final do desenvolvimento se perceberá que há uma defasagem de 180° entre o sinal de entrada e o sinal de saída caracterizando que a entrada v_2 é a entrada inversora.

A figura 9 mostra o circuito que relaciona a tensão de saída com a entrada v_2 . A entrada v_1 está aterrada. As resistências R_{B1} e R_{B2} não aparecem pois não são relevantes para a análise do circuito.

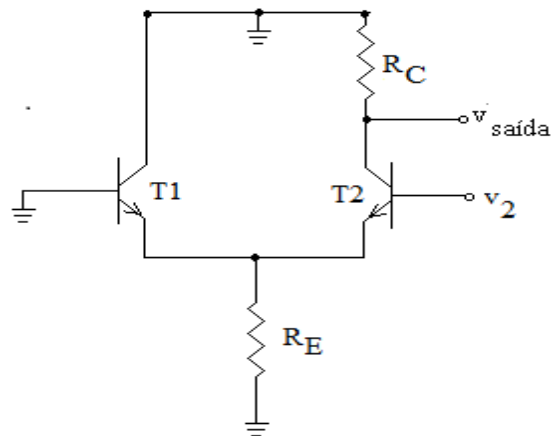


figura 9

A partir da possibilidade de representar cada transistor por seu modelo matemático é possível apresentar o circuito mostrado na figura 9 pelos circuitos representados nas figuras 10.1 e 10.2.

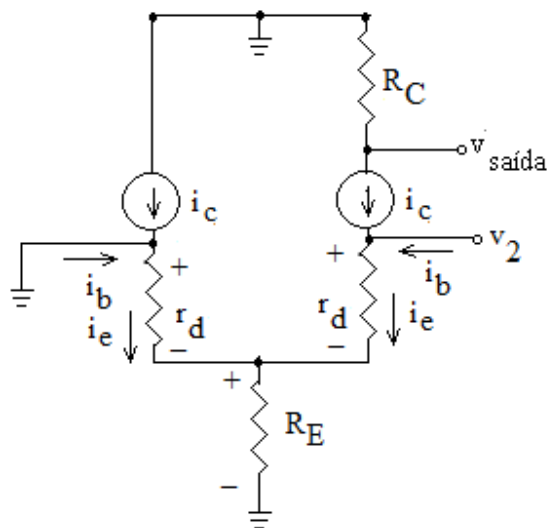


figura 10.1

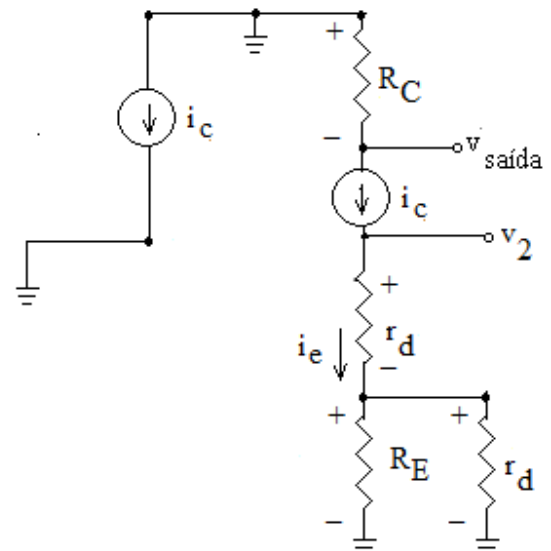


figura 10.2

A figura 10.1 mostra apenas a transformação de cada transistor em seu modelo. Já a figura 10.2 mostra a adaptação que precisa ser feita no circuito já que os resistores r_d e R_E estão em paralelo.

A ordem de grandeza do resistor R_E é muito maior do que a ordem de grandeza do resistor r_d com isso é possível se transformar esse paralelo na própria resistência r_d . Tal modificação pode ser vista no circuito mostrado na figura 11.

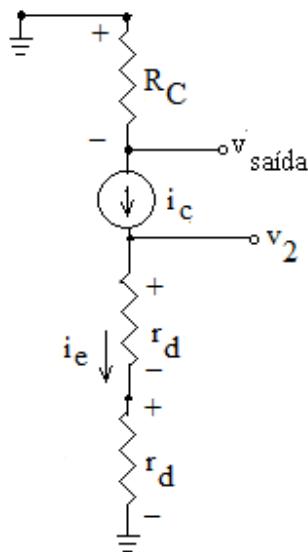


figura 11

Ao se aplicar as leis de Kirchhoff ao circuito mostrado na figura 11, tem-se que:

$$v_2 = 2 r_d i_e$$

$$v_{saída} = - R_C i_c$$

$$A = v_{saída} / v_{entrada} = v_{saída} / v_2$$

$$A = - (R_C i_c) / (2 r_d i_e)$$

$$i_c \approx i_e$$

$$A = - R_C / 2 r_d$$

O ganho de tensão é dado pela expressão: $A = - R_C / 2 r_d$. o sinal menos indica a inversão de fase entre o sinal de saída e o sinal de entrada.

Ganho de tensão diferencial

O cálculo do ganho diferencial é feito a partir da soma das duas expressões obtidas anteriormente.

$$v_{saída} = v_{saída1} + v_{saída2}$$

$$v_{saída} = (R_C / 2 r_d) v_1 - (R_C / 2 r_d) v_2$$

$$v_{saída} = (R_C / 2 r_d) (v_1 - v_2)$$

$$v_{saída} = A (v_1 - v_2)$$

onde $A = R_C / 2 r_d$

Impedância de entrada

A impedância que é vista em cada entrada é dada por:

$$Z_{entrada} = 2 \beta_{ca} r_d$$

Uma forma de se obter uma impedância de entrada mais alta num amplificador diferencial é usando circuito com transistores Darlington; uma outra forma é usando transistores JFET em vez de transistores bipolares.

Ganho de tensão do modo comum

O amplificador diferencial por ser um amplificador CC está sujeito a ruídos os mais variados possíveis. As entradas estão sujeitas a amplificar qualquer sinal que aparecer. Por causa disto é preciso que o amplificador diferencial consiga diferenciar os sinais que devem ser amplificados daqueles que são apenas ruídos. A estrutura do amplificador diferencial permite que ele seja um bom discriminador de ruídos de qualquer natureza.

O sinal de modo comum é o que alimenta as duas entradas de um amplificador diferencial igualmente, ou seja, ambas as entradas são sensibilizadas com a mesma intensidade do sinal. Este tipo de sinal o amplificador diferencial reconhece como ruído.

A maior parte da interferência, estática e outros tipos de sinal indesejável estão no modo comum. Isto acontece porque os fios condutores na saída de cada base comportam-se como pequenas antenas. Se o amplificador diferencial estiver funcionando numa vizinhança com muita interferência eletromagnética, cada base capta uma tensão de interferência indesejável.

O circuito mostrado na figura 12 mostra um amplificador diferencial sujeito a um sinal de modo comum. Como pode ser visto, uma tensão igual a $v_{\text{entrada(MC)}}$ alimenta as duas entradas simultaneamente. Supondo que os transistores sejam idênticos pode-se considerar que as correntes nos emissores dos transistores são iguais.

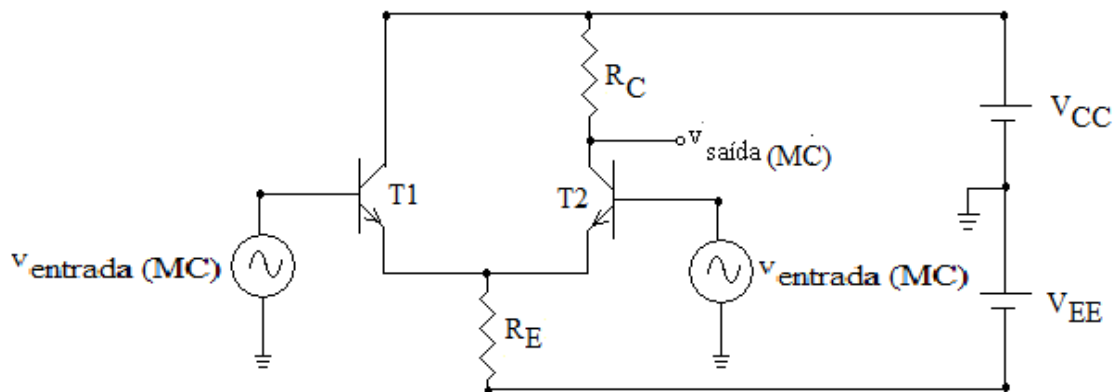


figura 12

A partir da possibilidade de representar cada transistor por seu modelo matemático é possível apresentar o circuito mostrado na figura 12 pelos circuitos representados nas figuras 13.1 e 13.2.

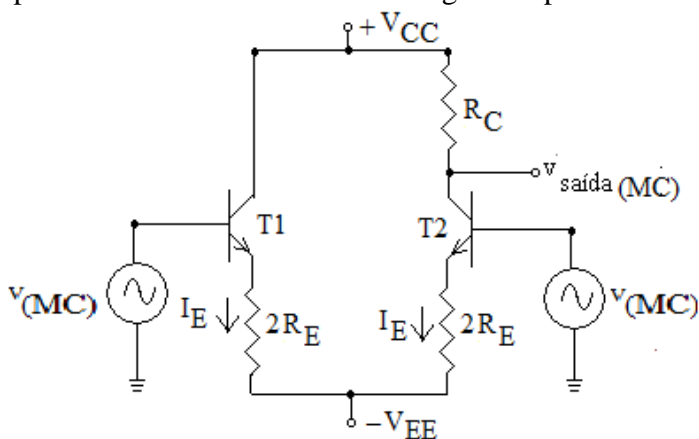


figura 13.1

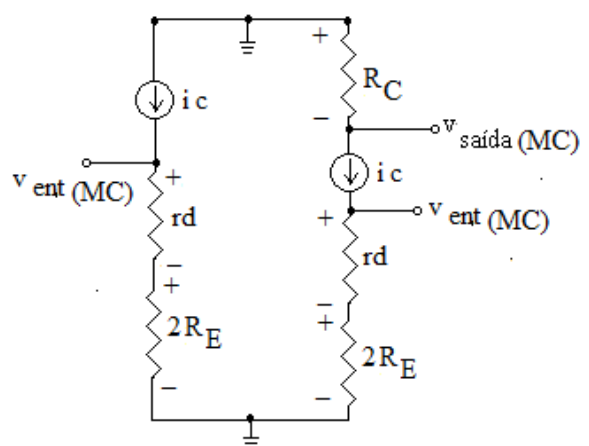


figura 13.2

Ao se aplicar as leis de Kirchhoff ao circuito mostrado na figura 13.2, tem-se que:

$$\begin{aligned}V_{\text{ent(MC)}} &= (r_d + 2R_E) i_e \\V_{\text{saída(MC)}} &= -R_C i_c \\A_{\text{(MC)}} &= v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}} = v_{\text{saída}} / v_{\text{ent(MC)}} \\A_{\text{(MC)}} &= -(R_C i_c) / (r_d + 2R_E) i_e \\i_c &\approx i_e \\A_{\text{(MC)}} &= -(R_C) / (r_d + 2R_E)\end{aligned}$$

Como R_E é sempre muito maior do que r_d , pode-se aproximar o ganho de tensão do modo comum como sendo:

$$A_{\text{(MC)}} = -(R_C) / (2R_E)$$

onde: $A_{\text{(MC)}}$ = ganho de tensão do modo comum

R_C = resistência do coletor

R_E = resistência do emissor

Por exemplo, se $R_C = 10\text{k}\Omega$ e $R_E = 10\text{k}\Omega$, logo $A_{\text{(MC)}} = -0,5$. Isto significa que o amplificador atenua o sinal do modo comum, porque o ganho de tensão é menor que 1. Em geral, os resistores R_C e R_E tem a mesma ordem de grandeza. Isto implica que o sinal de ruído injetado nas entradas aparecerá na saída sempre atenuado.

Razão de rejeição do modo comum.

A razão de rejeição do modo comum é definida como sendo a razão entre o ganho de tensão diferencial e o ganho do modo comum.

$$\begin{aligned}\text{CMRR} &= A / |A_{\text{(MC)}}| \\ \text{CMRR} &= (R_C / 2 r_d) / (R_C) / (2R_E) \\ \text{CMRR} &= R_E / r_d\end{aligned}$$

As folhas de dados quase sempre especificam a razão de rejeição do modo comum (CMRR) em decibéis, usando a seguinte fórmula para a conversão: $\text{CMRR}' = 20 \log \text{CMRR}$.

Quanto mais alto for o valor de R_E , melhor a razão de rejeição do modo comum do circuito. Uma forma de se obter um R_E equivalente bem elevado é usando a polarização por espelho de corrente.

Espelho de corrente

A técnica de polarização por espelho de corrente é amplamente usada em circuitos integrados. Ela se baseia no fato que é possível estabelecer a corrente do coletor de um transistor controlando a corrente através de um resistor que estiver convenientemente acoplado ao circuito no qual o transistor se encontra. As figuras 14.1 e 14.2 mostram a técnica usando diodo e transistor além do resistor que controla a corrente no coletor do transistor. A primeira com um transistor NPN e a segunda com um transistor PNP.

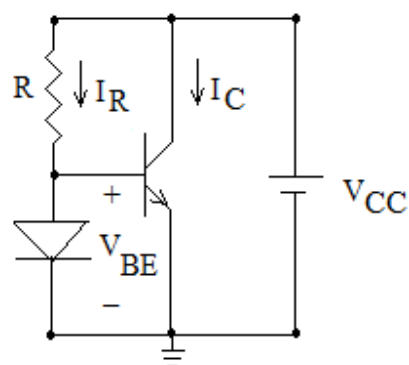


figura 14.1

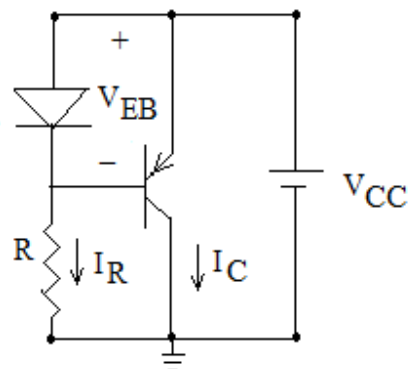


figura 14.2

O transistor polarizado na região ativa a corrente na base é muito pequena possibilitando que se possa fazer a corrente do coletor ser aproximadamente igual a corrente do emissor, ou seja, $I_B \ll I_C$ e $I_C \approx I_E$.

Se a curva característica do diodo (V versus I) for idêntica à curva V_{BE} versus I_E do transistor, a corrente que passa no diodo pode ser aproximadamente igual a corrente que passa no emissor do transistor. Como a corrente do coletor é aproximadamente igual à corrente do emissor, chega-se a conclusão que a corrente do coletor do transistor é aproximadamente igual à corrente que passa através do resistor R.

Ao se aplicar as leis de Kirchhoff ao circuito mostrado na figura 14.1, tem-se que:

$$- V_{CC} + R I_R + V_{BE} = 0$$

$$I_R = (V_{CC} - V_{BE}) / R$$

$$I_C \approx I_R$$

Este resultado é muito importante: Quer dizer que se pode estabelecer a corrente do coletor do transistor através do controle da corrente do resistor R.

É possível se pensar no circuito como um espelho: a corrente através do resistor R é refletida pelo circuito do coletor do transistor. É por isso que o circuito é chamado espelho de corrente.

Como foi dito anteriormente, o espelho de corrente é muito usado na fabricação de circuitos integrados, nestes casos o diodo que aparece no circuito é na verdade um transistor ligado como um diodo (a base e o coletor são ligados num mesmo ponto). Como o transistor se comporta como uma fonte de corrente, ele possui uma resistência de saída muito alta, muito maior do que se pode obter com a polarização do emissor convencional. Isto significa que o R_E equivalente do amplificador diferencial é centenas de quilohms e a razão de rejeição do modo comum melhora consideravelmente.

A figura 15 mostra a utilização do espelho de corrente para simular a resistência R_E do circuito que representa o amplificador diferencial. Com isso se pretende melhorar a performance do circuito com relação ao aumento no valor da razão de rejeição do modo comum do circuito.

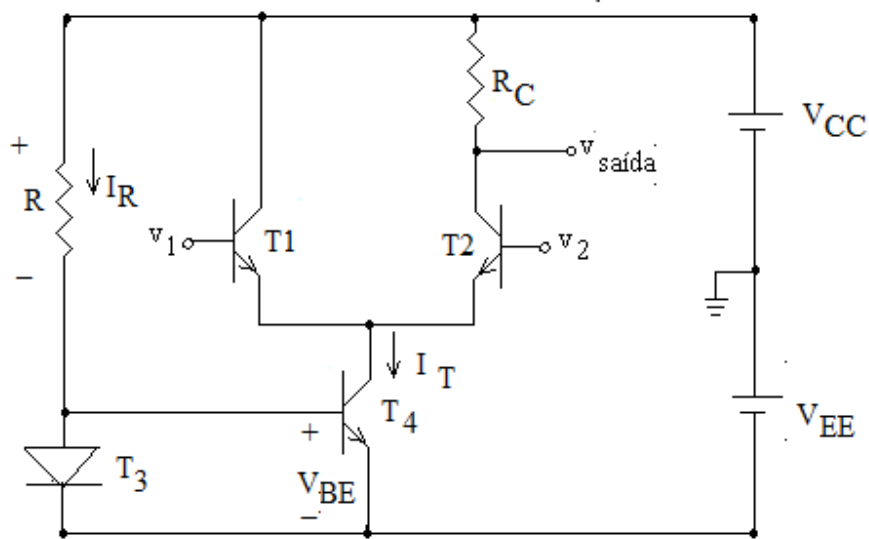


figura 15

Ao se aplicar as leis de Kirchhoff ao circuito mostrado na figura 15, tem-se que:

$$-V_{EE} - V_{CC} + R I_R + V_{BE} = 0$$

$$I_R = (V_{EE} + V_{CC} - V_{BE}) / R$$

$$I_T \approx I_R$$

Voltando a expressão que fornece o ganho de tensão do amplificador diferencial, $A = R_C / 2 r_d$, é possível aumentar o seu valor se através da colocação de um espelho de corrente para simular a resistência R_C no circuito. Tal situação é apresentada no circuito da figura 16.

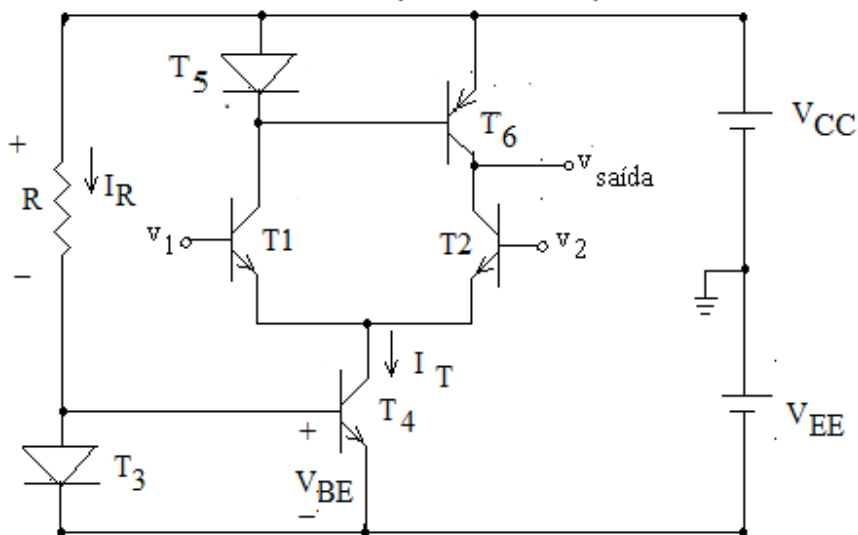


figura 16

O transistor T_5 se comporta como um diodo, ele tem uma impedância muito baixa e a carga sobre o transistor T_1 ainda aparece quase como um curto circuito. Por outro lado, T_6 se comporta como uma fonte de corrente PNP. Portanto T_2 vê um resistor R_C equivalente de centenas de quilohms. Com isto se aumenta o ganho de tensão diferencial do circuito.