## • Análise para pequenos sinais

Com o objetivo de mostrar que é importante explorar uma característica particular de um certo circuito faremos a análise do amplificador explorando a simetria do circuito e utilizando o **conceito de meio circuito.** 

Antes de realizarmos esta análise vamos mostrar que quaisquer dois sinais podem ser expresso em função de suas componentes diferencial e comum, ou seja, um sinal diferencial e um de modo comum. Se não vejamos.

Como vimos anteriormente o sinal de modo diferencial (ou simplesmente, diferencial) de entrada é expresso por:

$$v_{ed} = v_{e1} - v_{e2}$$

E o sinal de modo comum de entrada é expresso por:

$$v_{ec} = (v_{e1} + v_{e2})/2$$

Estas equações podem ser invertidas para expressarmos  $v_{e1}$  e  $v_{e2}$  em função de  $v_{ed}$  e  $v_{ec}$ 

$$v_{e1} = v_{ed}/2 + v_{ec}/e$$

$$v_{e2} = -v_{ed}/2 + v_{ec}$$

Da mesma forma as voltagens de saídas podem ser expressa por:

$$v_{01} = v_{0d}/2 + v_{0c} e$$

$$v_{02} = -v_{0d}/2 + v_{0c}$$

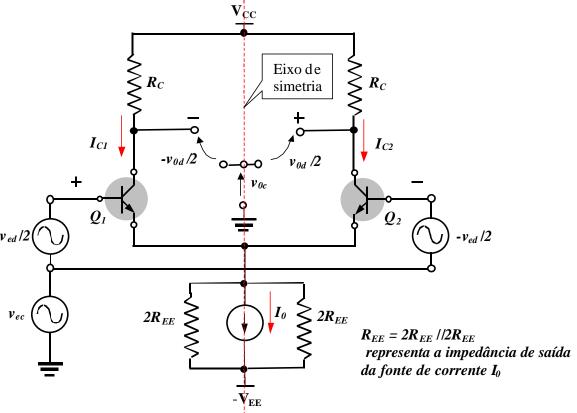
O significado físico destas variáveis pode ser entendido redesenhando o circuito do amplificado diferencial e mostrado abaixo. Note que o  $v_{ed}$  é a diferença entre as duas entradas, enquanto  $v_{0d}$  é média das duas entradas.

Todas estas variáveis estão relacionadas por:

$$v_{0d} = A_d v_{ed} + A_{c-d} v_{ec}$$
  $e$   $v_{0c} = A_{d-c} v_{ed} + A_c v_{ec}$ 

Onde  $A_d$  é o ganho modo diferencial,  $A_{c-d}$  é o ganho modo comum-diferencial,  $A_{d-c}$  é o ganho modo diferencial-comum e  $A_c$  é o ganho modo comum. A simetria do circuito causa  $A_{c-d} = A_{d-c} = 0$ . Assim

$$v_{0d} = A_d v_{ed}$$
  $e$   $v_{0c} = A_c v_{ec}$ 



Amplificador diferencial com os sinais de entrada e saída decompostos em suas componentes diferencial e de modo comum

Dada a simetria deste circuito podemos determinar as respostas (ganhos) do circuito para um sinal puramente diferencial e puramente de modo comum separadas, e superpor os resultados.

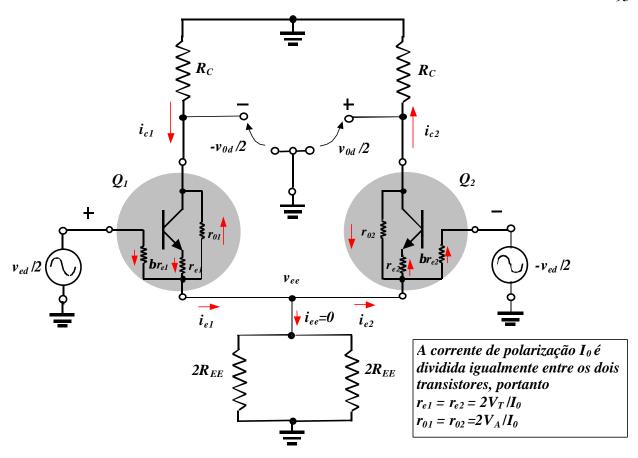
Resumindo, para calcular os ganhos diferencial,  $A_d$  e de modo comum,  $A_c$ , vamos inicialmente aplicar uma entrada puramente diferencial assim,

$$v_{ec} = 0$$
 e portanto  $v_{0c} = 0$ 

Em seguida aplicamos uma entrada puramente de modo comum, ou seja,

$$v_{ed} = 0$$
 e portanto  $v_{0d} = 0$ 

Para calcular o ganho diferencial redesenhamos a figura do amplificador diferencial e substituímos os transistores pelos seus modelos. Assim



# Circuito equivalente para pequenos sinais do Amplificador diferencial para sinais puramente diferenciais

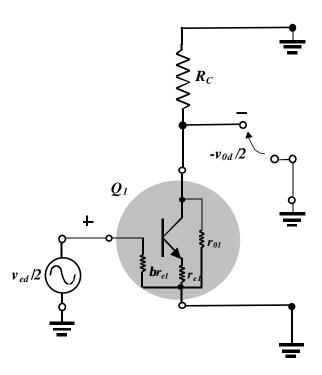
Note que dado a simetria a corrente  $i_{el}$  é igual e no mesmo sentido da corrente  $i_{e2}$ , portanto

$$i_{ee}=0$$

Como consequência a tensão sobre os resistores  $R_{EE}$  não varia, isto é,

$$v_{ee} = 0V$$

Desta forma podemos conectar os emissores dos transistores no ponto comum e redesenhar apenas a metade do amplificador diferencial como mostra a figura abaixo.



Circuito equivalente para pequenos sinais da metade esquerda do Amplificador diferencial para sinais puramente diferenciais

Ora, este circuito já conhecido, um amplificador emissor comum, cujo o ganho de tensão, A, é dado por

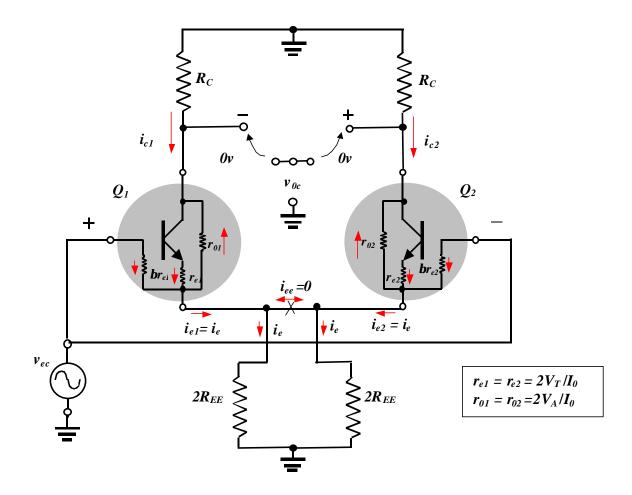
$$A_v = -v_{0d}/2/v_{ed}/2 = -v_{0d}/v_{ed} = -A_d = -Z_0/r_{e1}$$
 Portanto,

$$A_d = Z_0/r_{e1} \tag{172}$$

onde 
$$Z_0 = R_C / / r_{01}$$

Ou seja o ganho diferencial do amplificador diferencial é igual ao ganho (em módulo) de um amplificador emissor comum.

Para calcular o ganho de modo comum, agora vamos aplicar um sinal puramente de modo comum na entrada do amplificador como mostrado na figura abaixo.



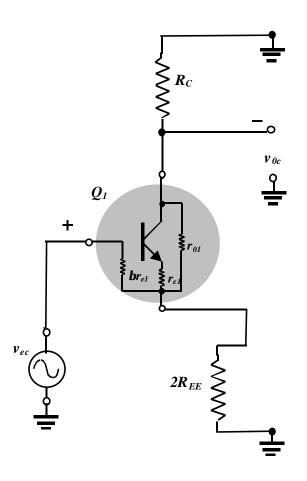
# Circuito equivalente para pequenos sinais do Amplificador diferencial para sinais puramente de modo comum

Note que dado a simetria a corrente  $i_{el}$  é igual e em sentido contrário a corrente  $i_{e2}$ , portanto

$$i_{ee}=0$$

Como consequência as duas metades do amplificador diferencial podem ser separadas do eixo de simetria.

A metade do lado esquerdo é mostrada na figura abaixo.



Circuito equivalente para pequenos sinais da metade esquerda do Amplificador diferencial para sinais puramente de modo comum

Ora, este circuito também já conhecido, um amplificador com resistor no emissor, cujo o ganho de tensão,  $A_v$  é dado por (desprezando-se  $r_{02}$ )

$$A_v = v_{0c} / v_{ec} \gg - R_C / (2R_{EE} + r_{el})$$
 portanto,

$$A_c \gg -R_C/(2R_{EE} + r_{el})$$
 (173)

Ou seja o ganho de modo comum do amplificador diferencial é igual ao ganho (em módulo) de um amplificador com resistor de emissor.

A razão de rejeição de modo comum, CMRR é dada por:

$$CMRR = \left| A_d / A_c \right| = \left[ R_C / / r_{0I} \right] / R_C / (2R_{EE} + r_{eI}) \quad \text{se } R_C >> r_{0I}$$

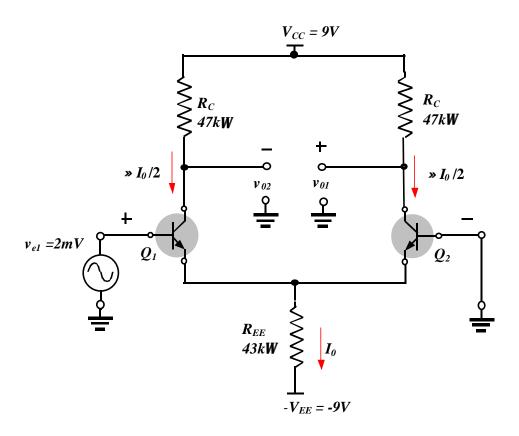
$$CMRR \gg 1 + 2R_{EE} / r_{eI}$$
(174)

A equação (174) diz que quanto maior a impedância de saída da fonte de corrente  $I_0$  maior a rejeição de modo comum do amplçificador.

## • Exercício:

- 1) Calcule a amplitude da tensão de saída  $v_{02}$  para o circuito da figura abaixo.
- 2) Calcule o ganho de modo comum para este mesmo circuito.
- 3) Calcule a razão de rejeição de modo comum.

Obs: despreze a impedância de saída dos transistores.



## a) Análise DC

A corrente  $I_0$  é dada por

$$OV - V_{BE} + R_{EE}I_0 = -V_{EE}$$

$$I_0 = (V_{EE} - V_{BE})/R_{EE} = (9,0V-0,7V)/43kW = 193mA$$

**Portanto** 

$$I_{C1} = I_{C2} = I_{C2} \gg I_0/2 = 96,5\text{mA}$$
 e

$$r_{el} = r_{e2} = r_e = V_T / I_C \approx 269W$$

#### b) Análise AC

Determinaremos  $v_{02}$  de duas formas: a primeira usando o conceito de meio circuito e a segunda com uma análise convencional.

#### ✓ Conceito de meio circuito

### Temos que

$$v_{ed} = v_{e1} - v_{e2} = v_{e1}$$
  $e$   $v_{ec} = (v_{e1} + v_{e2})/2 = v_{e1}/2$   
 $v_{01} = v_{0d}/2 + v_{0c}$   $e$   $v_{02} = -v_{0d}/2 + v_{0c}$ 

O ganho diferencial é dado por

$$A_d = v_{0d} / v_{ed} = R_C / r_e = 47kW / 269W \gg 174,7$$

O ganho de modo comum é dado por

$$A_c = v_{0c}/v_{ec} \gg -R_C/(2R_{EE} + r_e) = -47kW/(2*43kW + 269W) \gg -0.54$$

**Portanto** 

A razão de rejeição de modo comum

$$CMRR = 174,7/0,54 \gg 323$$
 ou  $50,2dB$ 

e a amplitude da senóide na saída  $v_{01}$  será agora determinada

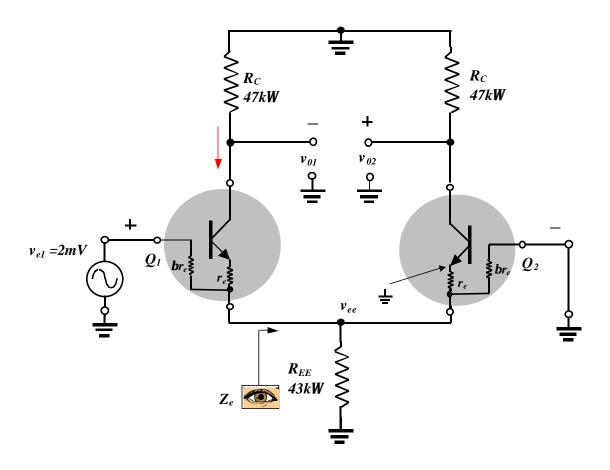
$$v_{0d}=A_d\ v_{ed}=A_d\ v_{el}=174,7*2mV=$$
 **349,4mV** (Componente diferencial na saída)  $v_{0c}=A_c\ v_{ec}=A_c\ v_{el}/2=-0,54*1mV=$  **-0,54mV** (Comp. de modo comum na saída)  $Logo$ 

$$v_{02} = -v_{0d}/2 + v_{0c} = -349,4mV/2 - 0,54mV \gg -175,2mV$$

O sinal – no valor da amplitude de  $v_{01}$  indica que a senóide na saída está invertida com relação ao sinal de entrada.

### ✓ Análises AC convencional

Para esta análise vamos redesenhar o circuito do o seu equivalente (note  $r_0$  é não deve ser considerado)



Note que a impedância é igual à  $R_{EE}$  //  $ar_e$  »  $R_{EE}$  // $r_e$  = 43kW//269W » 267W

Observando a figura notamos que

- 1) A saída  $v_{01}$  é igual a saída de um amplificador com resistor de emissor  $Z_{e}$  cujo o ganho de tensão é igual à  $-\mathbf{R}_{C}/(\mathbf{r}_{e}+\mathbf{Z}_{e})$
- 2) A tensão  $v_{ee}$  é igual a saída de seguidor de emissor com carga  $Z_e$ , cujo ganho de tensão é igual à  $Z_e/(r_e + Z_e)$
- 3) A saída  $v_{02}$  é igual a saída de um amplificador base comum com alimentado com uma tensão de entrada  $v_{ee}$ , cujo ganho de tensão é igual à  $\mathbf{R}_C / \mathbf{r}_e$ .

**Portanto** 

$$v_{0I} = -R_C/(r_e + Z_e)v_{eI} = -47kW/(269 + 267).2mV = -175,3mV$$

Praticamente o mesmo resultado anterior.

A voltagem  $v_{02}$  é dada por

ganho do seguidor \* ganho do base comum 
$$v_{02} = Z_e / (r_e + Z_e) R_C / r_e. v_{e1}$$

A tensão diferencial de saída  $v_{0d}$  é dada por:

$$v_{0d} = v_{02} - v_{01} = \{Z_e / (r_e + Z_e) R_C / r_e + R_C / (r_e + Z_e) \} v_{e1}$$

ganho differencial 
$$v_{0d} = R_C \{(Z_e/r_e + 1)/(r_e + Z_e)\} \ v_{el} = R_C/r_e \ v_{el} = R_C/r_e \ v_{ed}$$

Como era de se esperar.

A tensão de modo comum de saída  $v_{0c}$  é dada por:

$$v_{0c} = (v_{02} + v_{01})/2 = \{Z_e / (r_e + Z_e) R_C / r_e - R_C / (r_e + Z_e)\} v_{e1}/2$$
 $v_{0c} = R_C \{(Z_e / r_e - 1)/(r_e + Z_e)\} v_{e1}/2$ 
 $mas Z_e / r_e - 1 = -r_e / (R_{EE} + r_e) e$ 
 $r_e + Z_e = r_e (1 + Z_e / r_e) = r_e (2R_{EE} + r_e)/(R_{EE} + r_e) \quad portanto$ 

$$ganho de modo comum$$

$$v_{0d} = -R_C / (2R_{EE} + r_e) \cdot v_{e1}/2 = -R_C / (2R_{EE} + r_e) \cdot v_{ec}$$

Portanto o ganho de modo comum e a razão de rejeição de modo comum serão iguais aos resultados anteriores, como era de se esperar.