

# Transistore bipolare a giunzione (BJT)

## Parte 1

[www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm](http://www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm)  
(versione del 18-4-2016)

### Modello di Ebers e Moll

- In Spice il transistore bipolare viene rappresentato per mezzo del modello di Gummel e Punn (o modello a controllo di carica), che si riduce a quello di Ebers e Moll quando i valori di alcuni parametri non vengono assegnati
- Per assegnare i parametri del dispositivo si usa una direttiva `.model` avente il formato  
`.model nome tipo(lista parametri)`  
dove
  - ◆ *nome* può essere scelto in modo arbitrario e deve essere assegnato come valore al componente
  - ◆ *tipo* può essere NPN o PNP

## Parametri del modello di Ebers e Moll

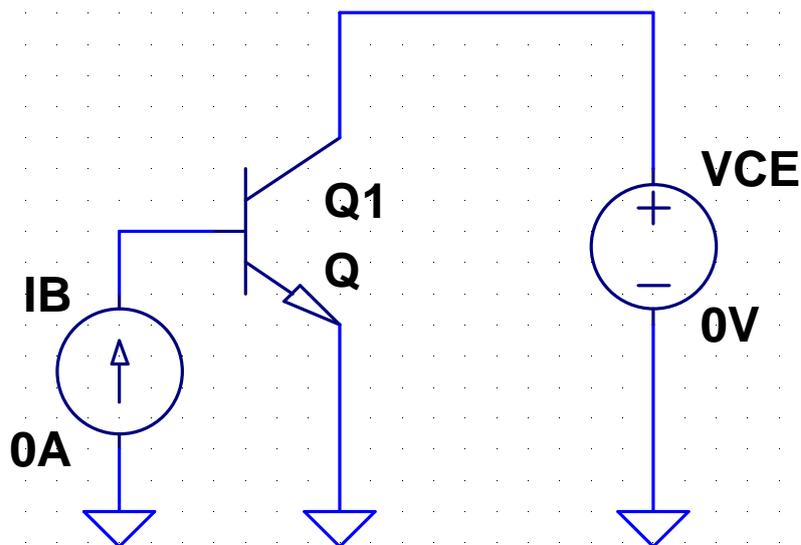
- I parametri che definiscono il modello di Ebers e Moll statico (cioè privo di effetti reattivi) sono

Nome	Parametro	Val. predefinito
IS	corrente di saturazione (A)	0.1 fA
BF	$\beta_F$ , guadagno di corrente diretto	100
BR	$\beta_R$ , guadagno di corrente inverso	1
VAF	tensione di Early (V)	$\infty$

3

### 01-Car-NPN-1.asc

#### Transistor NPN - Caratteristiche di uscita

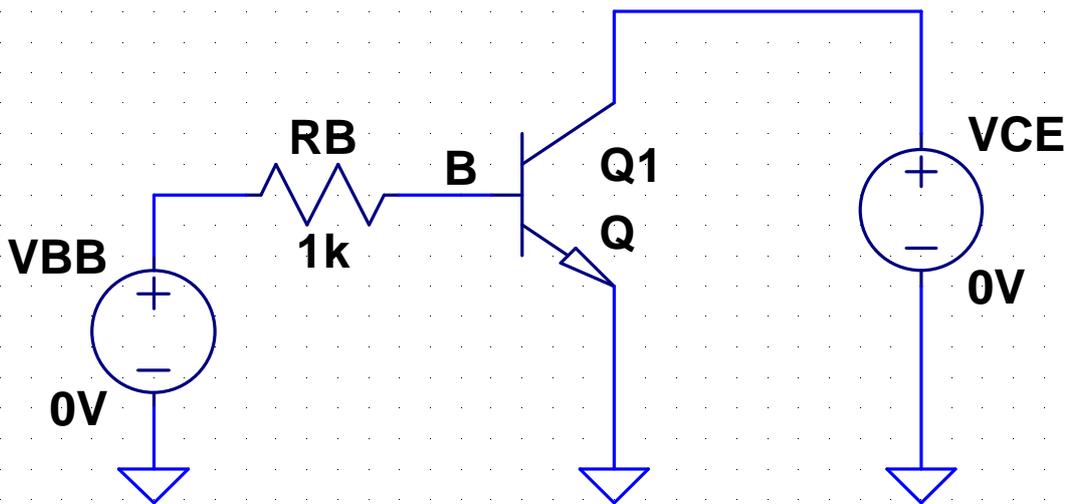


```
.model Q NPN (IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
```

```
.dc VCE -10V 10V IB 0 1mA 0.1mA
```

4

## Transistor NPN - Caratteristiche di ingresso



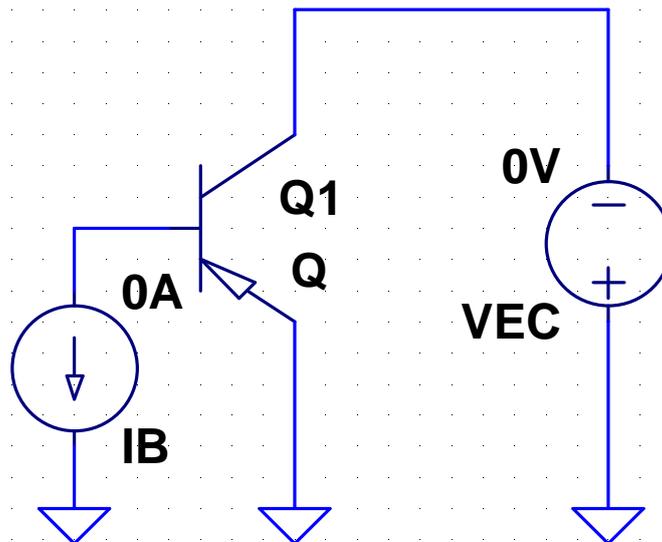
**.model Q NPN (IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)**

**.dc VBB 0V 10V VCE 0V 0.25V 25mV**

Si inserisce una resistenza in serie alla base per limitare la corrente

Per visualizzare la caratteristica VBE-IB riportare V(B) sull'asse delle ascisse

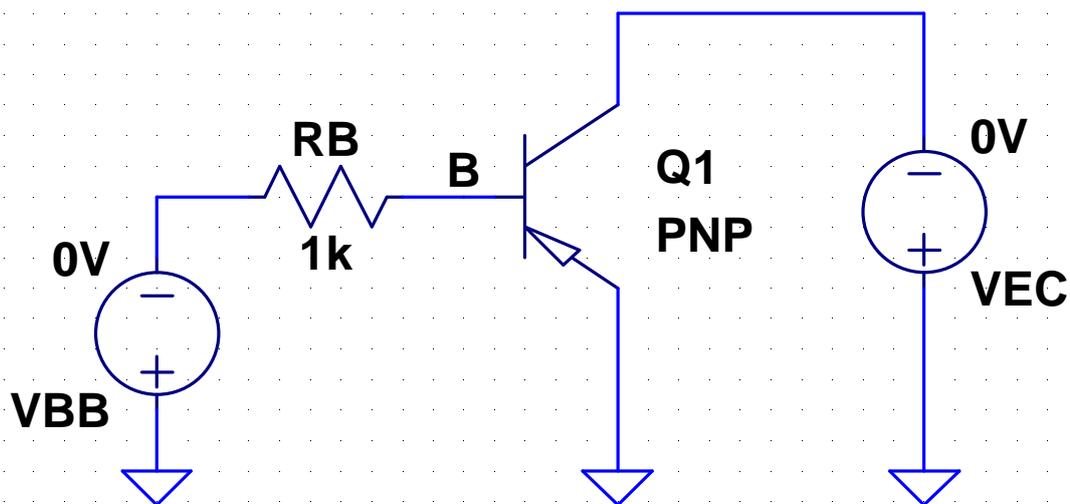
## Transistor PNP - Caratteristiche di uscita



**.model Q PNP (IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)**

**.dc VEC -10V 10V IB 0 1mA 0.1mA**

## Transistor PNP - Caratteristiche di ingresso



```
.model Q PNP(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
```

```
.dc VBB 0V 10V VEC 0V 0.25V 25mV
```

Si inserisce una resistenza in serie alla base per limitare la corrente

Per visualizzare la caratteristica VEB-IB riportare -V(B) sull'asse delle ascisse

7

## Funzioni di trasferimento per piccoli segnali in continua

- Spice dispone di una modalità per il calcolo delle funzioni di rete per piccoli segnali in continua (**DC Transfer**)
- Per attivarla si utilizza la direttiva **.TF** avente il formato  

```
.TF out in
```

dove
  - ◆ *out* è la tensione di un nodo o tra la tensione una coppia di nodi o la corrente di un generatore di tensione (quindi rappresenta la tensione o la corrente alla porta di uscita)
  - ◆ *in* è il nome di un generatore di tensione o di corrente (che costituisce l'ingresso del circuito)
- **Esempi:**

```
.TF V(out) Vin
```

```
.TF V(N001,N002) V1
```

```
.TF I(Vload) Vgen
```

8

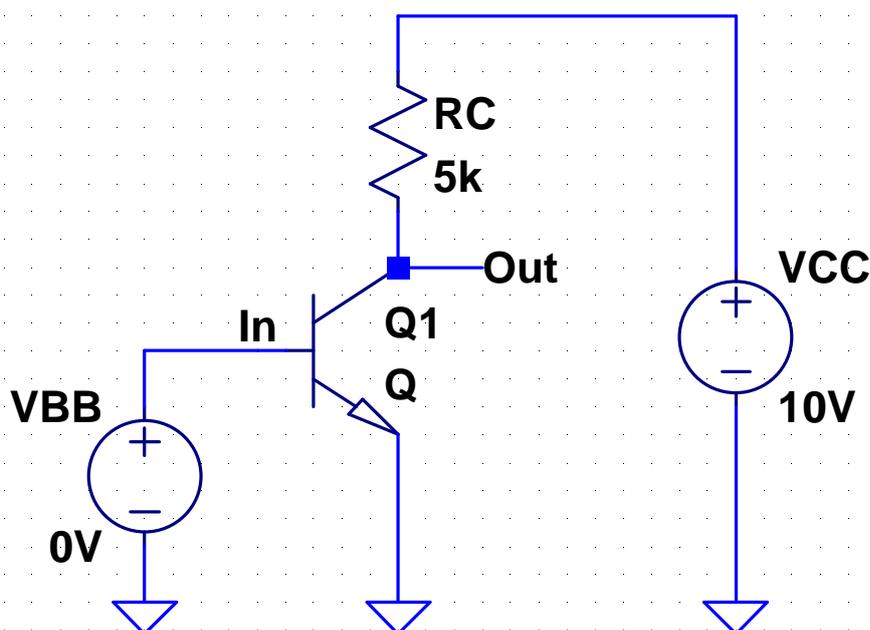
## Funzioni di trasferimento per piccoli segnali in continua

- L'analisi DC transfer è preceduta da un'analisi .OP, eseguita automaticamente dal programma che, calcola il punto di riposo del circuito
- Quindi il circuito viene linearizzato nell'intorno del punto di riposo
- Infine vengono calcolate le resistenze di ingresso e di uscita e la funzione di trasferimento (guadagno di tensione, guadagno di corrente, resistenza di trasferimento o conduttanza di trasferimento, a seconda delle grandezze specificate come ingresso e uscita)
- L'analisi per piccoli segnali è eseguita in continua, quindi i condensatori e gli induttori presenti nel circuito sono trattati, rispettivamente, come circuiti aperti e cortocircuiti
- Se l'analisi riguarda un solo punto di lavoro del circuito, al termine i risultati vengono visualizzati mediante una finestra di dialogo
- Se viene eseguita un'analisi parametrica, per visualizzare i grafici delle resistenze di ingresso e uscita e della funzione di trasferimento occorre selezionare "Add trace" nel menu "Plot Options" (attivo quando viene selezionata la finestra contenente i grafici)

9

### 05-EC-1.asc

#### Amplificatore ad emettitore comune Caratteristica ingresso-uscita

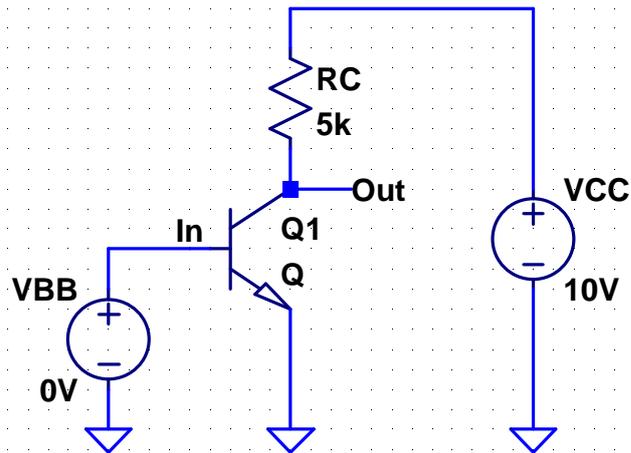


```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)  
.dc VBB 0V 0.8V
```

10

## 06-EC-2.asc

### Amplificatore ad emettitore comune Analisi per piccoli segnali al variare di VBB



```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
```

```
.step VBB 0.6V 0.7V 1mV
```

```
.tf V(out) VBB Funzione di trasferimento in continua per piccoli segnali  
ingresso = VBB  
uscita = V(out)
```

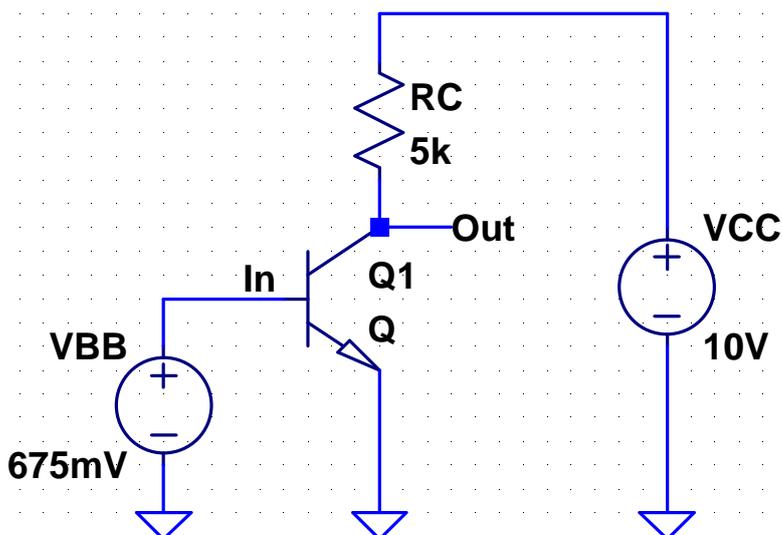
Per visualizzare l'andamento del guadagno e delle resistenze di ingresso e uscita selezionare "Add trace" dal menu "Plot Settings" e quindi selezionare, rispettivamente, "transfer function" "VBB#input\_impedance" , "output\_impedance\_at\_V(out)"

(La resistenza di uscita comprende anche il contributo di RC (in parallelo a Rout) )

11

## 07-EC-3.asc

### Amplificatore ad emettitore comune Analisi per piccoli segnali nel punto di riposo (VBB = 675 mV)



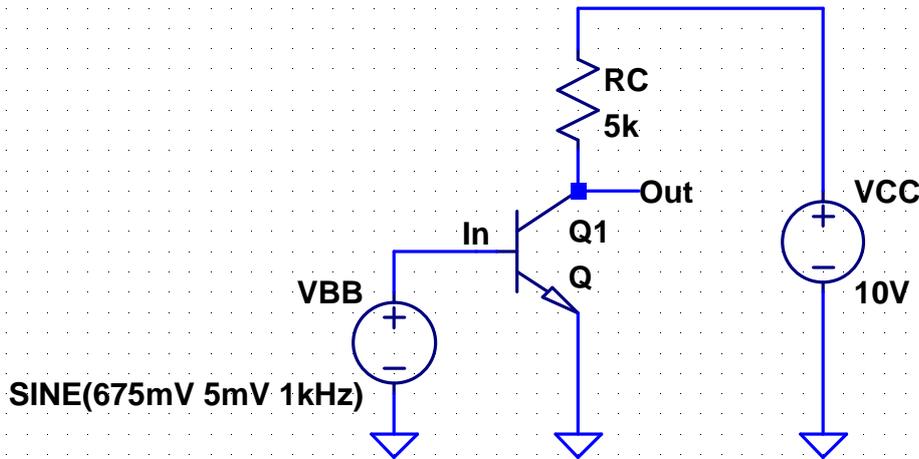
```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
```

```
.tf V(out) VBB Funzione di trasferimento in continua per piccoli segnali  
ingresso = VBB  
uscita = V(out)
```

Posizionando il cursore sullo schema è possibile vedere nella barra di stato i valori delle tensioni e delle correnti nel punto di riposo

12

## Amplificatore ad emettitore comune

Analisi nel dominio del tempo con ingresso sinusoidale ( $V_{BB} = 675 \text{ mV}$ )

Componente continua: 675 mV  
 Componente sinusoidale: ampiezza 5mV, frequenza 1kHz)

.tran 10ms

.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)

Posizionando il cursore sullo schema è possibile vedere nella barra di stato i valori delle tensioni e delle correnti nel punto di riposo

13

## Amplificatore ad emettitore comune Analisi del circuito equivalente per piccoli segnali

- Parametri del circuito:

$$R_C = 5 \text{ k}\Omega$$

$$V_T = 26 \text{ mV}$$

$$\beta_F = 200$$

$$V_A = 100 \text{ V}$$

- Punto di riposo:

$$I_{C0} = 1.119 \text{ mA}$$

$$V_{CE0} = 4.407 \text{ V}$$

- Parametri del circuito equivalente per piccoli segnali del transistor:

$$\beta_o = \beta_F \left( 1 + \frac{V_{CE0}}{V_A} \right) = 208.814$$

$$r_{be} = \frac{\beta_F V_T}{I_{C0}} \left( 1 + \frac{V_{CE0}}{V_A} \right) = 4.852 \text{ k}\Omega$$

$$r_{ce} = \frac{V_A + V_{CE0}}{I_{C0}} = 93.3 \text{ k}\Omega$$

14

# Amplificatore ad emettitore comune

## Analisi del circuito equivalente per piccoli segnali

- Guadagno di tensione

$$A_v = -\frac{\beta_o}{r_{be}}(R_C // r_{ce}) = -204.247$$

- Guadagno di corrente

$$A_i = \beta_o \frac{r_{ce}}{r_{ce} + R_C} = 198.193$$

- Resistenza di ingresso

$$R_{in} = r_{be} = 4.852 \text{ k}\Omega$$

- Resistenza di uscita (senza il contributo di  $R_C$ )

$$R_{out} = r_{ce} = 93.3 \text{ k}\Omega$$

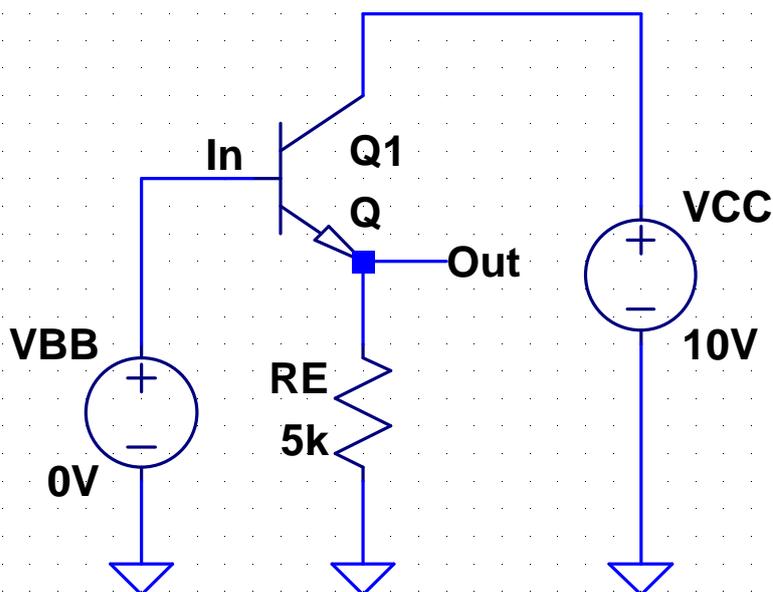
- Resistenza di uscita (incluso il contributo di  $R_C$ )

$$R'_{out} = R_{out} // R_C = 4.746 \text{ k}\Omega$$

15

### 09-CC-1.asc

#### Amplificatore a collettore comune Caratteristica ingresso-uscita



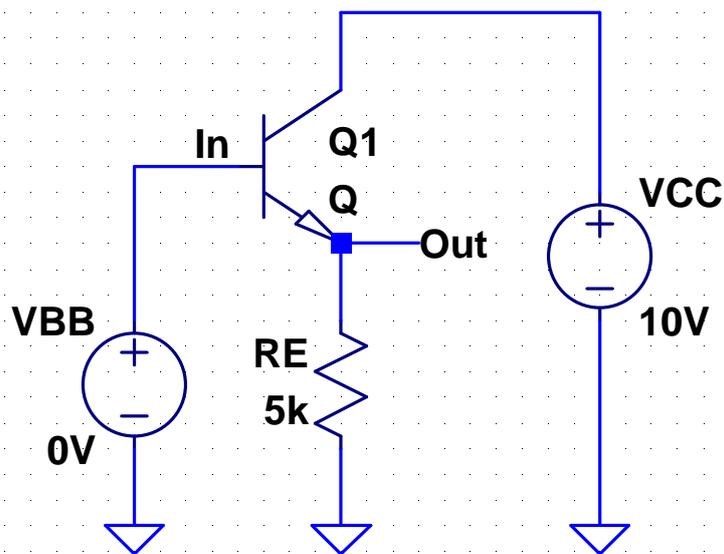
```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
```

```
.dc VBB 0V 11V 0.1V
```

16

## 10-CC-2.asc

### Amplificatore a collettore comune Analisi per piccoli segnali al variare di VBB

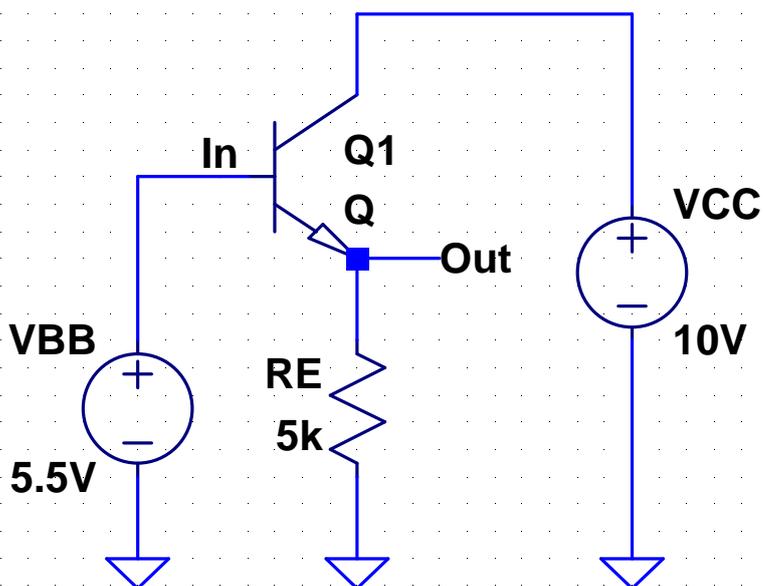


```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)  
.step VBB 0.5 11 0.05  
.tf V(out) VBB
```

17

## 11-CC-3.asc

### Amplificatore a collettore comune Analisi per piccoli segnali nel punto di riposo (VBB = 5.5V)

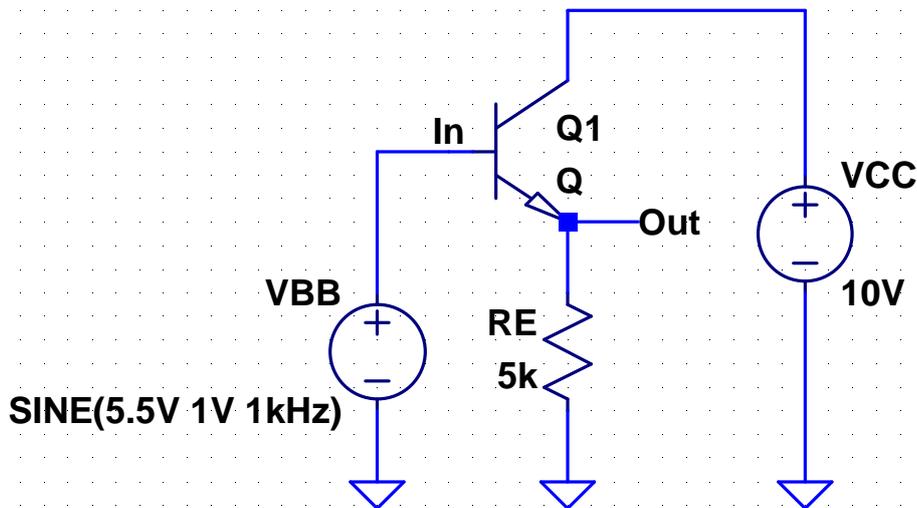


```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)  
.tf V(out) VBB
```

18

### Amplificatore a collettore comune

Analisi nel dominio del tempo con ingresso sinusoidale ( $V_{BB} = 5.5 \text{ V}$ )



```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
```

```
.tran 10ms
```

19

## Amplificatore a collettore comune Analisi del circuito equivalente per piccoli segnali

- Parametri del circuito:

$$R_E = 5 \text{ k}\Omega \quad V_{CC} = 10 \text{ V}$$

$$V_T = 26 \text{ mV} \quad \beta_F = 200 \quad V_A = 100 \text{ V}$$

- Punto di riposo:

$$I_{C0} = 0.961 \text{ mA} \quad V_{CE0} = V_{CC} - V_{out0} = 10 - 4.829 = 5.171 \text{ V}$$

- Parametri del circuito equivalente per piccoli segnali del transistor:

$$\beta_o = \beta_F \left( 1 + \frac{V_{CE0}}{V_A} \right) = 210.324$$

$$r_{be} = \frac{\beta_F V_T}{I_{C0}} \left( 1 + \frac{V_{CE0}}{V_A} \right) = 5.691 \text{ k}\Omega$$

$$r_{ce} = \frac{V_A + V_{CE0}}{I_{C0}} = 109.4 \text{ k}\Omega$$

20

## Amplificatore a collettore comune Analisi del circuito equivalente per piccoli segnali

- Guadagno di tensione

$$A_v = \frac{(\beta_o + 1)(R_E // r_{ce})}{r_{be} + (\beta_o + 1)(R_E // r_{ce})} = 0.994$$

- Guadagno di corrente

$$A_i = -(\beta_o + 1) \frac{r_{ce}}{r_{ce} + R_E} = -202.108$$

- Resistenza di ingresso

$$R_{in} = r_{be} + (\beta_o + 1)(R_E // r_{ce}) = 1.016 \text{ M}\Omega$$

- Resistenza di uscita (senza il contributo di RC)

$$R_{out} = \frac{r_{be}}{\beta_o + 1} // r_{ce} = 26.921 \Omega$$

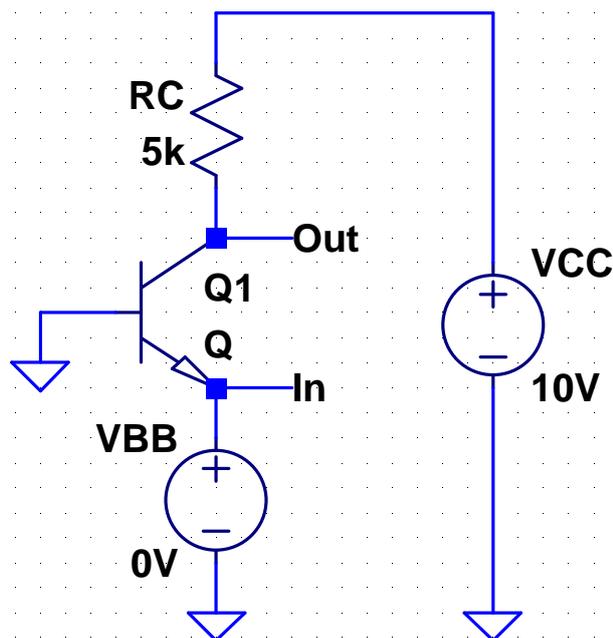
- Resistenza di uscita (incluso il contributo di RC)

$$R'_{out} = R_{out} // R_C = 26.776 \Omega$$

21

### 13-BC-1.asc

#### Amplificatore a base comune Caratteristica ingresso-uscita



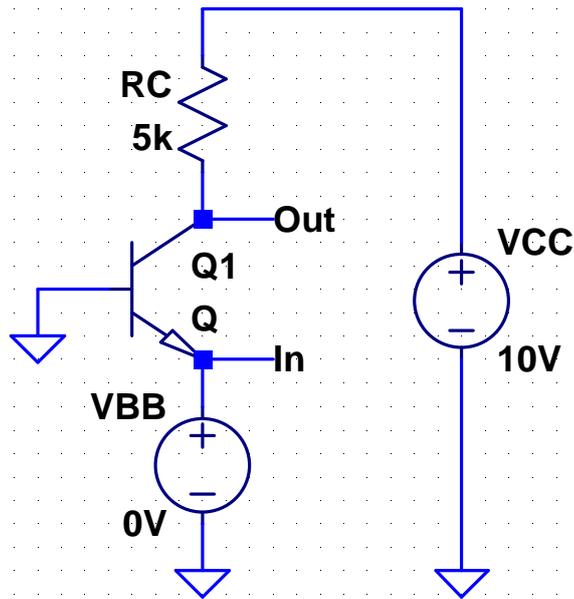
```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
```

```
.dc VBB -0.8V 0V
```

22

## 14-BC-2.asc

### Amplificatore a base comune Analisi per piccoli segnali al variare di VBB

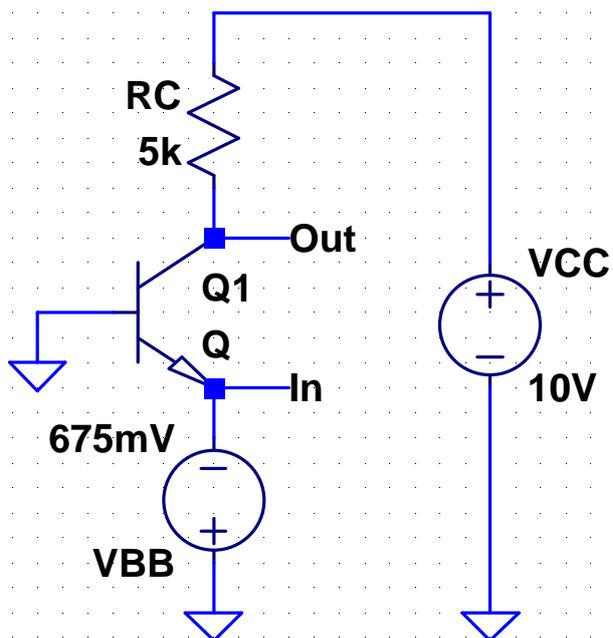


```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)  
.step VBB -0.70 -0.55 1m  
.tf V(out) VBB
```

23

## 15-BC-3.asc

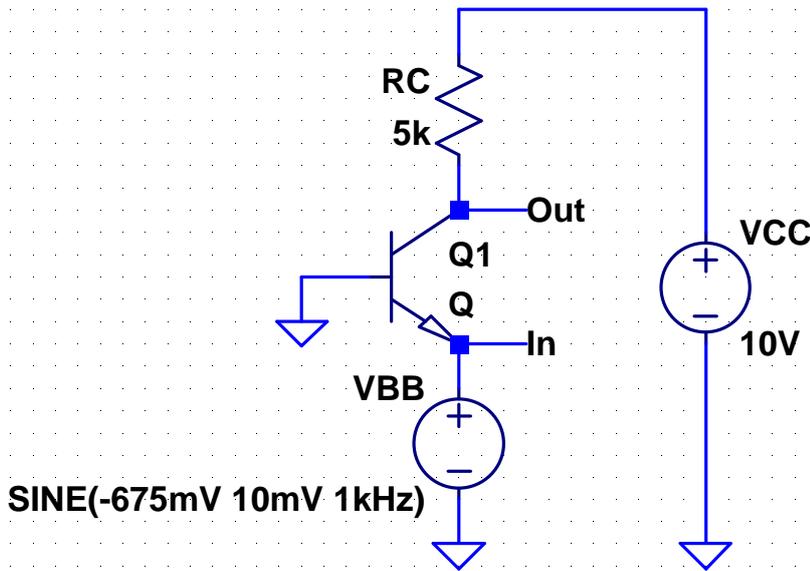
### Amplificatore a base comune Analisi per piccoli segnali nel punto di riposo (VBB = -675 mV)



```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)  
.tf V(out) VBB
```

24

## Amplificatore a base comune

Analisi nel dominio del tempo con ingresso sinusoidale ( $V_{BB} = -675 \text{ mV}$ )

```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
.tran 10ms
```

25

## Amplificatore a base comune Analisi del circuito equivalente per piccoli segnali

- Parametri del circuito:

$$R_C = 5 \text{ k}\Omega \quad V_{BB} = 0.675 \text{ V}$$

$$V_T = 26 \text{ mV} \quad \beta_F = 200 \quad V_A = 100 \text{ V}$$

- Punto di riposo:

$$I_{C0} = 1.126 \text{ mA} \quad V_{CE0} = V_{out0} - V_{BB} = 4.371 - 0.675 = 3.697 \text{ V}$$

- Parametri del circuito equivalente per piccoli segnali del transistor:

$$\beta_o = \beta_F \left( 1 + \frac{V_{CE0}}{V_A} \right) = 207.394$$

$$r_{be} = \frac{\beta_F V_T}{I_{C0}} \left( 1 + \frac{V_{CE0}}{V_A} \right) = 4.789 \text{ k}\Omega$$

$$r_{ce} = \frac{V_A + V_{CE0}}{I_{C0}} = 92.09 \text{ k}\Omega$$

26

## Amplificatore a base comune

### Analisi del circuito equivalente per piccoli segnali

- Guadagno di tensione

$$A_v = \frac{\beta_o}{r_{be}} (R_C // r_{ce}) = 205.387$$

- Guadagno di corrente

$$A_i = -\frac{\beta_o r_{ce}}{R_C + (\beta_o + 1)r_{ce}} = 0.995$$

- Resistenza di ingresso

$$R_{in} = \frac{r_{be} (R_C + r_{ce})}{R_C + (\beta_o + 1)r_{ce}} = 24.221 \Omega$$

- Resistenza di uscita (senza il contributo di RC)

$$R_{out} = r_{ce} = 98.50 \text{ k}\Omega$$

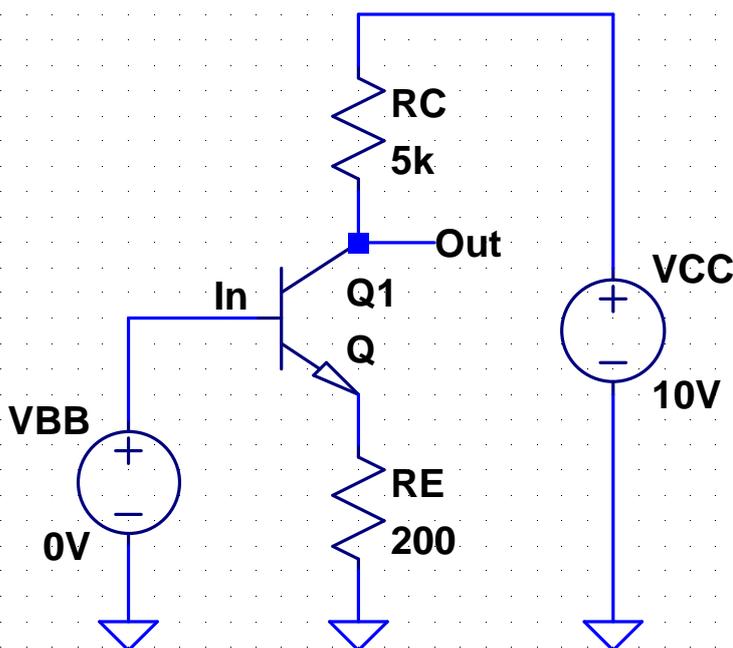
- Resistenza di uscita (incluso il contributo di RC)

$$R'_{out} = R_{out} // R_C = 4.743 \text{ k}\Omega$$

27

### 17-ECR-1.asc

#### Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore Caratteristica ingresso-uscita



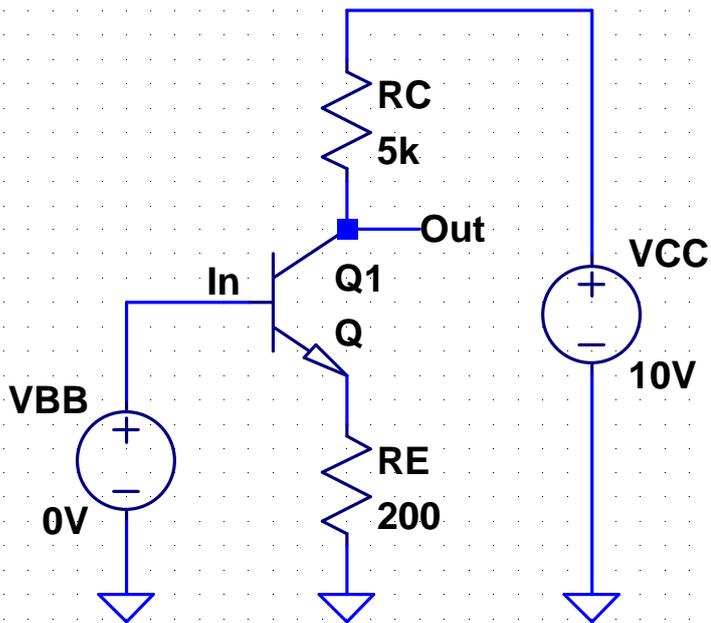
```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
```

```
.dc VBB 0V 1.5V
```

28

## 18-ECR-2.asc

### Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore Analisi per piccoli segnali al variare di VBB

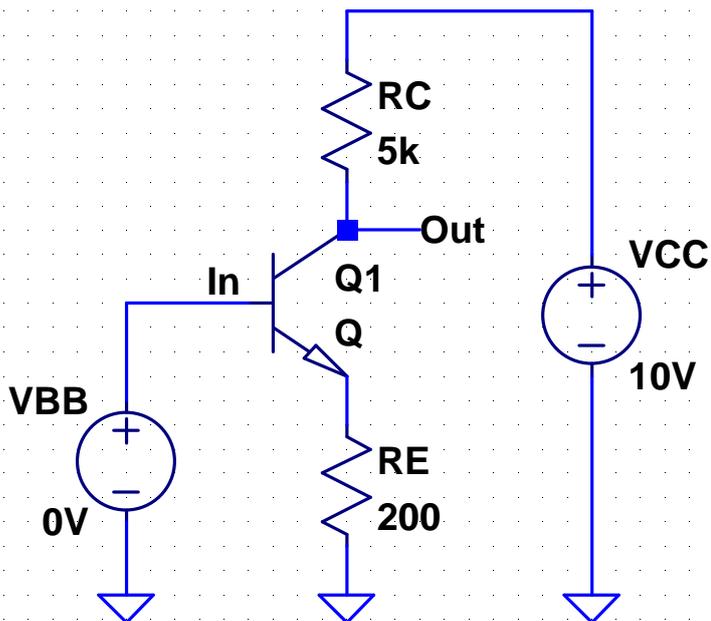


```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)  
.step VBB 0.5V 1.1V 1m  
.tf V(out) VBB
```

29

## 19-ECR-3.asc

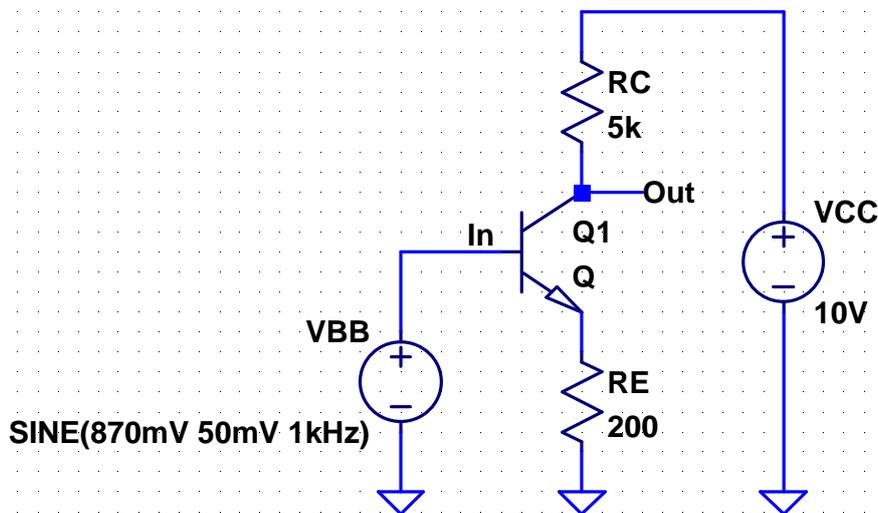
### Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore Analisi per piccoli segnali al variare di VBB



```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)  
.step VBB 0.5V 1.1V 1m  
.tf V(out) VBB
```

30

**Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore**  
**Analisi nel dominio del tempo con ingresso sinusoidale (VBB = 870 mV)**



```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
.tran 10ms
```

31

## Analisi del circuito equivalente per piccoli segnali

- Parametri del circuito:

$$R_C = 5 \text{ k}\Omega \quad R_E = 200 \text{ }\Omega$$

$$V_T = 26 \text{ mV} \quad \beta_F = 200 \quad V_A = 100 \text{ V}$$

- Punto di riposo:

$$I_{C0} = 0.987 \text{ mA} \quad V_{CE0} = V_{out0} - V_{E0} = 5.065 - 0.198 = 4.867 \text{ V}$$

- Parametri del circuito equivalente per piccoli segnali del transistor:

$$\beta_o = \beta_F \left( 1 + \frac{V_{CE0}}{V_A} \right) = 209.734$$

$$r_{be} = \frac{\beta_F V_T}{I_{C0}} \left( 1 + \frac{V_{CE0}}{V_A} \right) = 5.525 \text{ k}\Omega$$

$$r_{ce} = \frac{V_A + V_{CE0}}{I_{C0}} = 106.2 \text{ k}\Omega$$

32

## Analisi del circuito equivalente per piccoli segnali

- Guadagno di tensione

$$A_v = - \frac{\beta_o r_{ce} R_C}{r_{be} (R_E + R_C + r_{ce}) + \beta_o r_{ce} R_E} = 21.965$$

- Guadagno di corrente

$$A_i = \frac{r_{ce} \beta_o}{R_E + R_C + r_{ce}} = 199.948$$

- Resistenza di ingresso

$$R_{in} = r_{be} + \frac{R_E r_{ce} \beta_o}{R_E + R_C + r_{ce}} = 45.515 \text{ k}\Omega$$

- Resistenza di uscita (senza il contributo di RC)

$$R_{out} = R_E + r_{ce} + \frac{\beta_o r_{ce} R_E}{R_E + R_S + r_{be}} = 88.51 \text{ k}\Omega$$

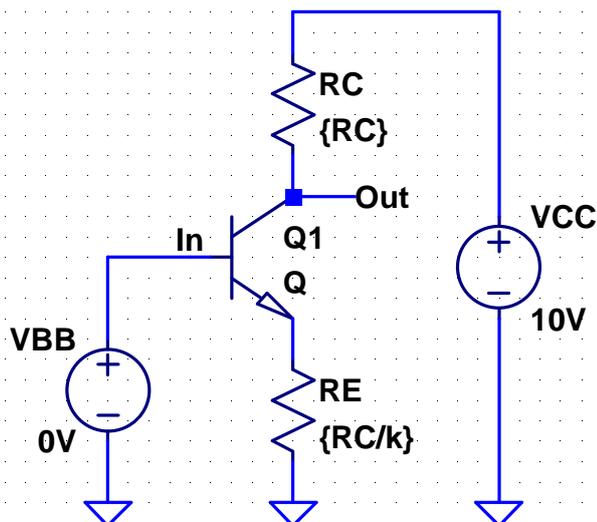
- Resistenza di uscita (incluso il contributo di RC)

$$R'_{out} = R_{out} // R_C = 4.972 \text{ k}\Omega$$

33

### 21-ECR-5.asc

**Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore**  
**Caratteristica ingresso-uscita al variare del rapporto RC/RE**



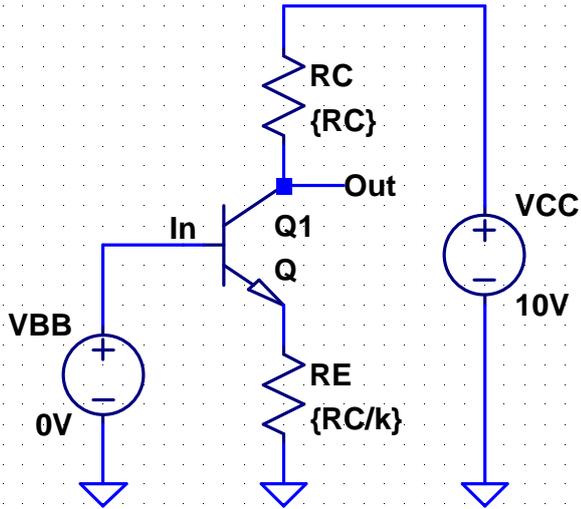
```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
.param RC=5k
.step param k list 20 15 12 10 8 6 5 4 3 2
.dc VBB 0 4
```

Si può notare che al diminuire del rapporto RC/RE la caratteristica diviene più lineare e la sua pendenza (e quindi il guadagno di tensione) si riduce

34

## 22-ECR-6.asc

Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore  
Analisi per piccoli segnali al variare di  $V_{BB}$  e del rapporto  $R_C/R_E$



```
.model Q NPN(IS=5fA BF=200 BR=5 VAF=100V)
.param RC=5k
.step VBB 0.5V 2.5V 5m param k list 20 15 12 10 8 6 5 4 3 2
.tf V(out) VBB
```

Si può notare che al diminuire del rapporto  $R_C/R_E$  si ha un intervallo di valori di  $V_{BB}$  di ampiezza crescente in cui il guadagno è costante e che il valore del guadagno tende al rapporto  $R_C/R_E$ .