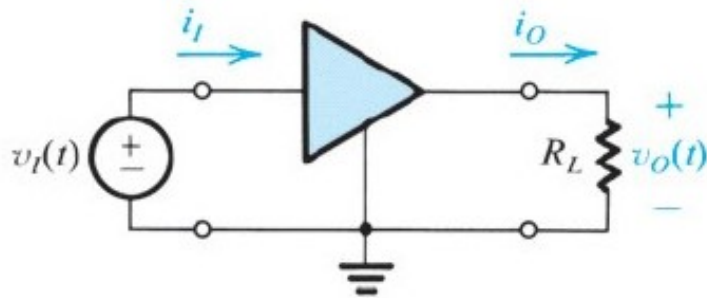


---

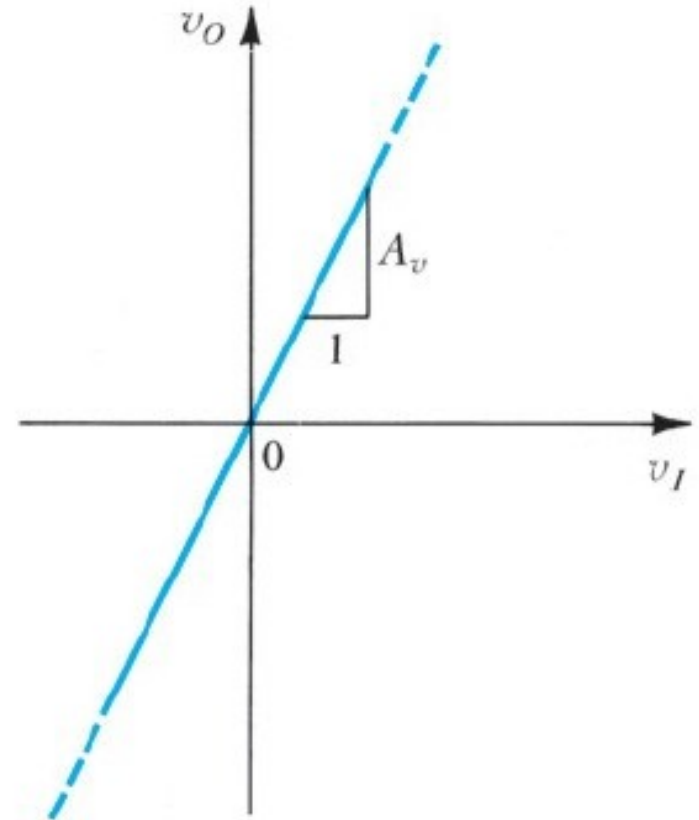
# Il MOS ed il BJT come Amplificatori

# Amplificatore

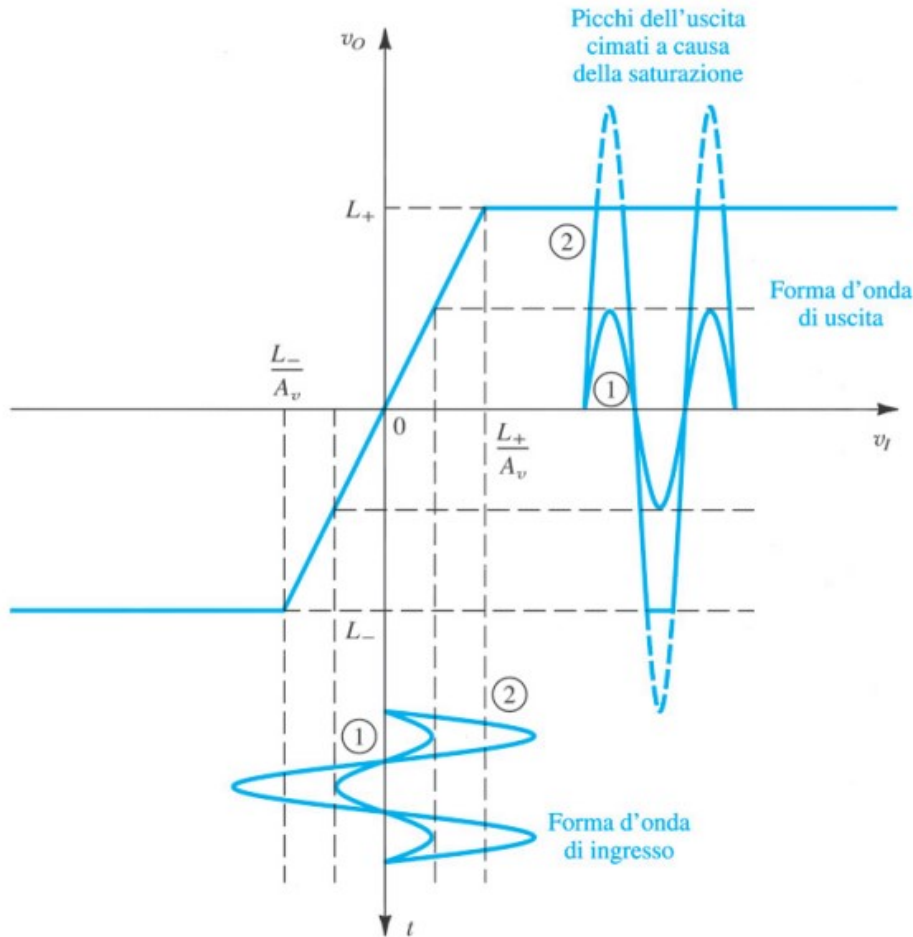
Amplificare significa **stabilire una relazione lineare fra ingresso e uscita.**



$$v_o(t) = A v_i(t), \text{ con: } |A| > 1$$



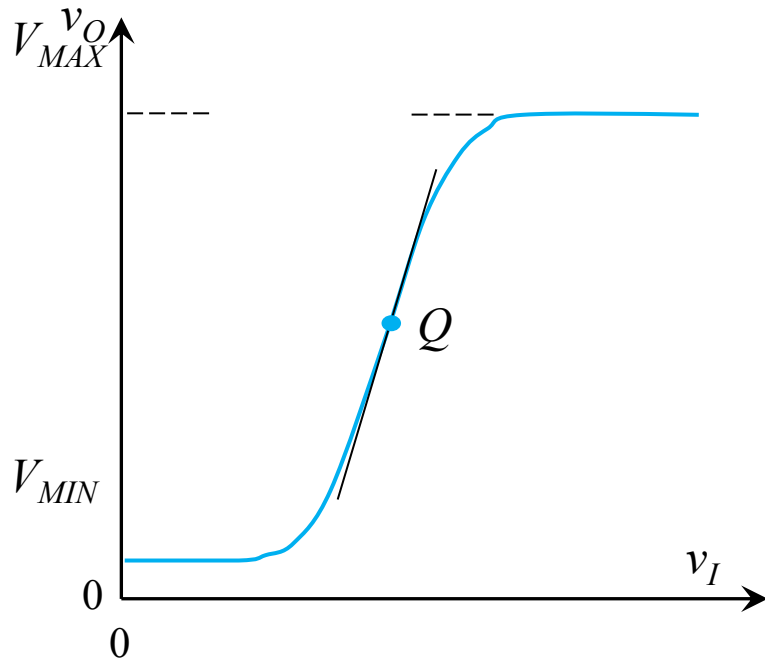
# Amplificatore Non Ideale



In pratica, la caratteristica di trasferimento **è lineare solo in un intervallo limitato delle tensioni di ingresso**. Ad esempio, quando il segnale è particolarmente ampio, i picchi dell'uscita vengono "cimati" a causa della **saturazione** dell'amplificatore.

# Caratteristica di trasferimento di un amplificatore reale

---



Una caratteristica di trasferimento **reale** non passa per l'origine e presenta solo una regione approssimativamente lineare, nell'intorno del punto  $Q$  in figura. Per poter utilizzare un circuito con la caratteristica in figura come amplificatore sono necessarie **due condizioni**.

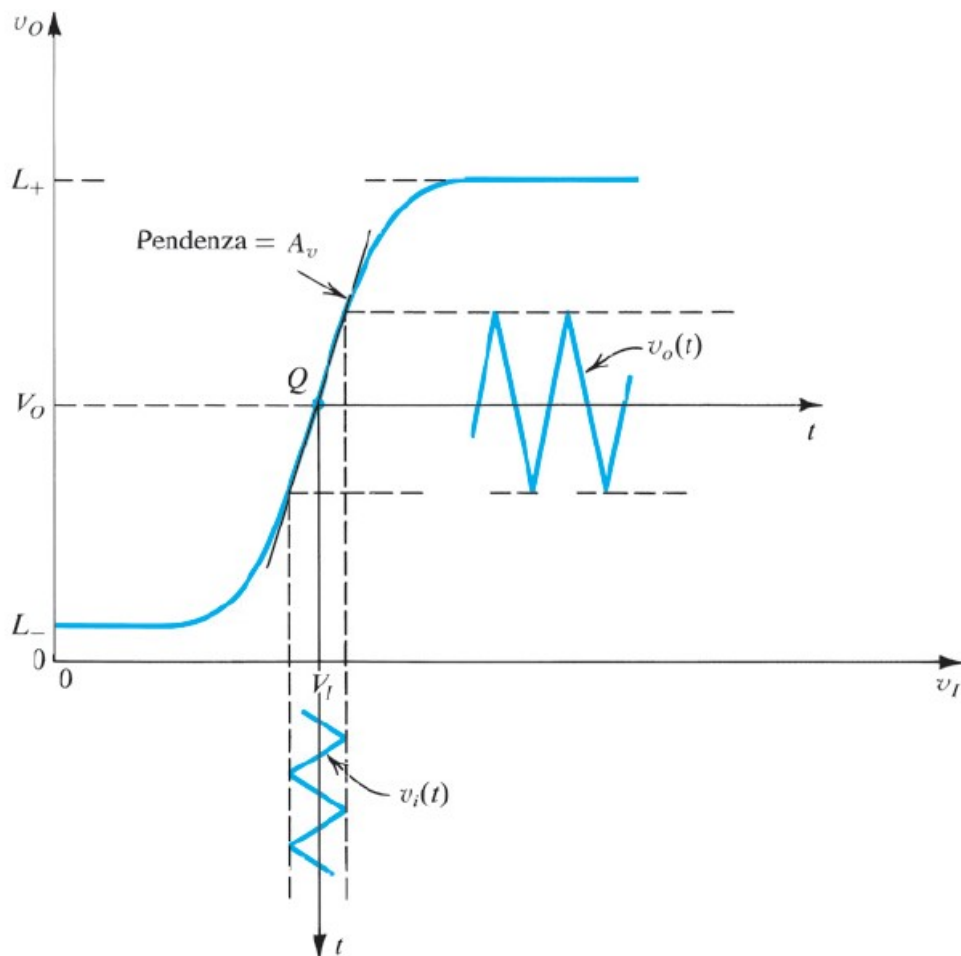
# Condizioni per realizzare un amplificatore

---

- 1. Il segnale di ingresso deve essere sufficientemente piccolo, affinché l'amplificatore si comporti linearmente.**
- 2. Al segnale di ingresso, che supponiamo a media nulla, deve essere sovrapposta una componente continua, in modo che l'amplificatore operi nell'intorno del punto Q prescelto**

La condizione 2 comporta la necessità di introdurre una opportuna **polarizzazione** per l'amplificatore.

# Caratteristica di trasferimento di un Amplificatore reale

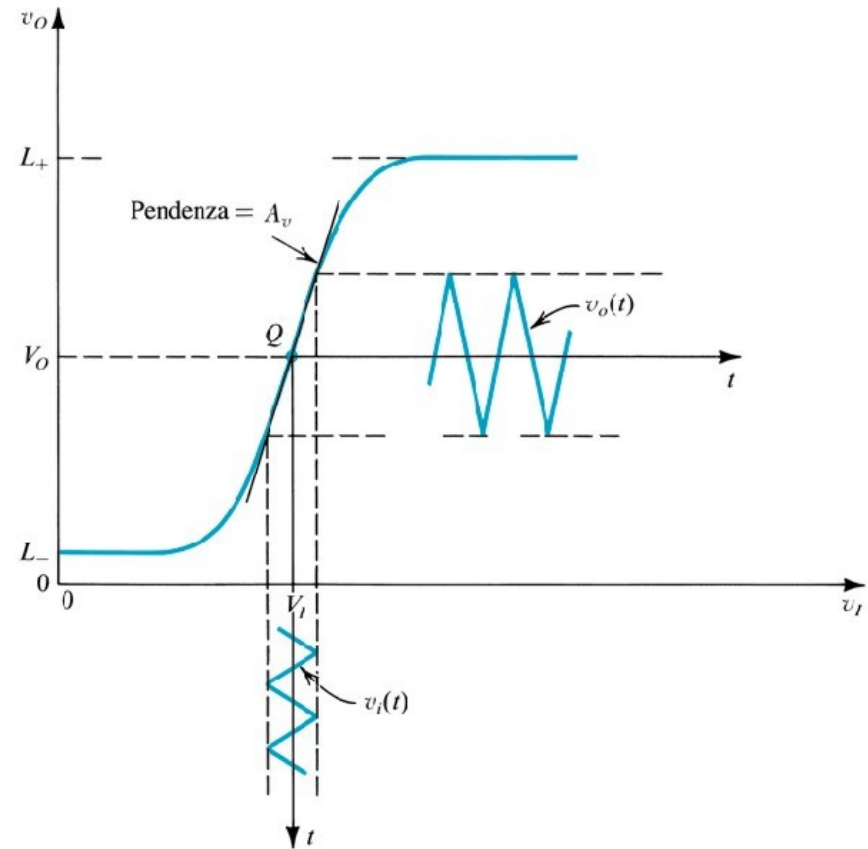


Il segnale di ingresso  $v_i(t)$  deve avere un'ampiezza sufficientemente piccola, affinché l'amplificatore si comporti linearmente.

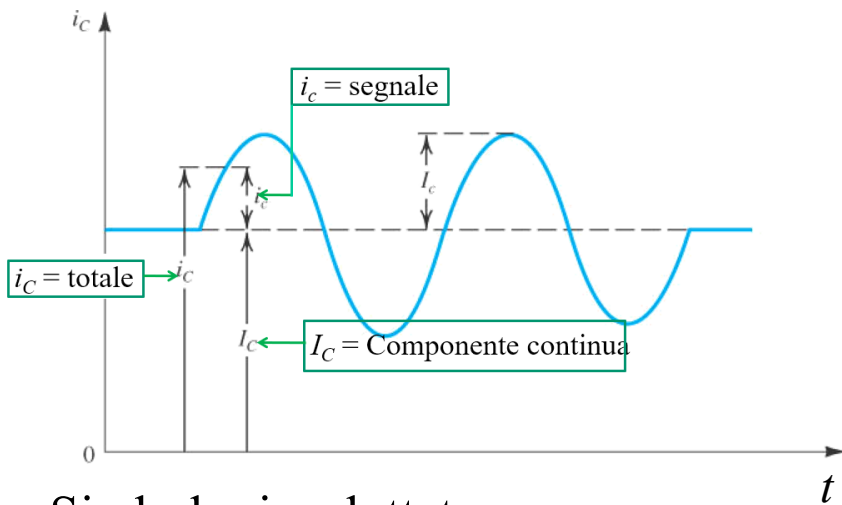
Al segnale di ingresso si deve sovrapporre una tensione di polarizzazione  $V_I$  in modo da far funzionare l'amplificatore nell'intorno del punto  $Q$  prescelto

# Polarizzazione

Q è detto: punto di riposo o di polarizzazione, o di funzionamento statico o di lavoro. Deve essere scelto in una **regione lineare** della caratteristica di trasferimento, con **elevata pendenza**



# Simbologia



Le grandezze che incontreremo nell'analisi degli amplificatori sono quasi sempre tensioni (o correnti) variabili combinate con tensioni (o correnti) di polarizzazione.

Simbologia adottata:

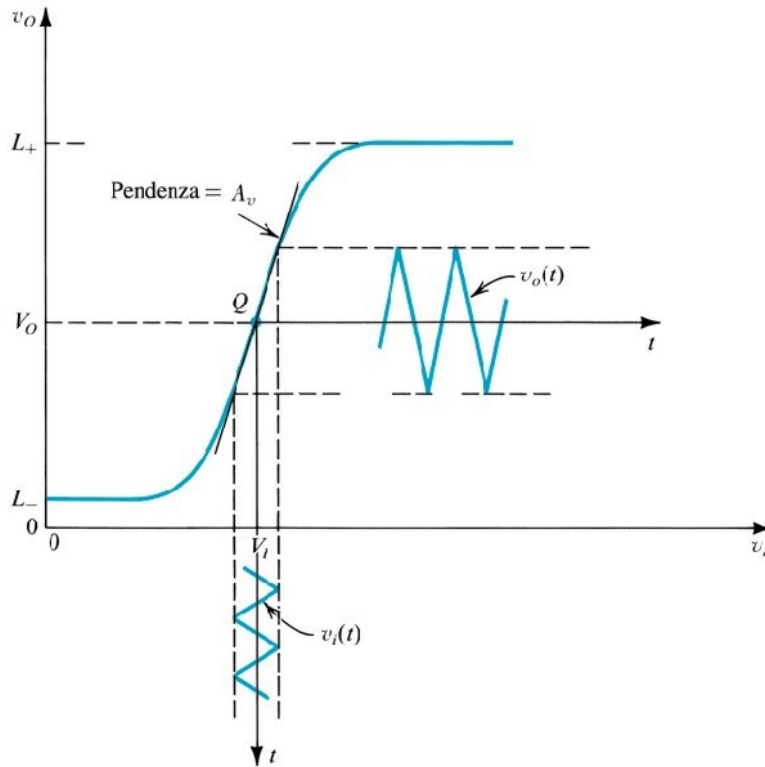
Valore totale: lettera minuscola e pedice maiuscolo (esempio:  $i_C$ ,  $v_{GS}$  ecc.)

Componente continua o di polarizzazione: lettera e pedice maiuscoli (esempio:  $I_D$ ,  $V_{DS}$  ecc.)

Segnale, o componente variabile: lettera e pedice minuscoli (esempio:  $i_b$ ,  $i_s$ ,  $v_{ds}$ )

**Il valore totale è la somma della componente variabile e di quella di polarizzazione** (esempio:  $v_I = V_I + v_i$ ;  $i_D = I_D + i_d$ ; ecc.)

# Relazioni fra i segnali:



$$v_o = f(v_i) = f(V_I + v_i)$$

Sviluppando in serie:

$$v_o = f(V_I + v_i) \approx f(V_I) + \left. \frac{df}{dv_I} \right|_{V_I} v_i$$

Poiché:  $v_o = V_O + v_o$  si ha:

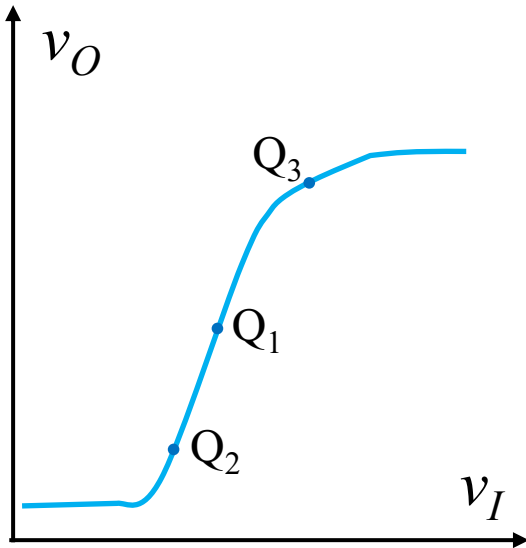
$$V_O = f(V_I); \quad v_o = \left. \frac{df}{dv_I} \right|_{V_I} v_i$$

Fissiamo la nostra attenzione sulle componenti variabili:

$$v_o = A_V v_i \quad \Rightarrow \quad A_V = \left. \frac{df}{dv_I} \right|_{V_I}$$

Il guadagno  $A_V$  è dato dalla derivata della caratteristica di trasferimento, valutata nel punto di riposo  $Q$ .

# Scelta del punto Q



La scelta del punto Q **influenza il guadagno**  $A_V$  (dato dalla derivata della caratteristica di trasferimento in Q) e **la possibile escursione del segnale di uscita** prima di raggiungere la saturazione. Nella caratteristica di trasferimento a sinistra, esempio, la scelta migliore corrisponde al punto  $Q_1$

Nel punto  $Q_2$  la derivata della caratteristica di trasferimento (e quindi il guadagno) è simile rispetto a  $Q_1$ , ma la possibile escursione della  $v_O$  è alquanto limitata.

In corrispondenza del punto di lavoro  $Q_3$  il guadagno è minore.

---

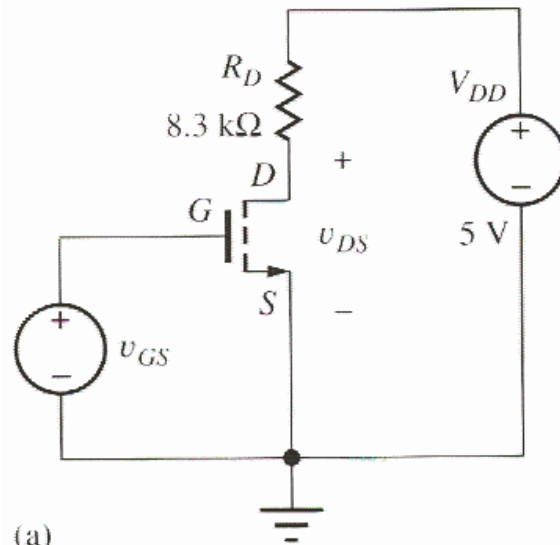
# Il MOS come amplificatore

# Amplificatore a MOS

---

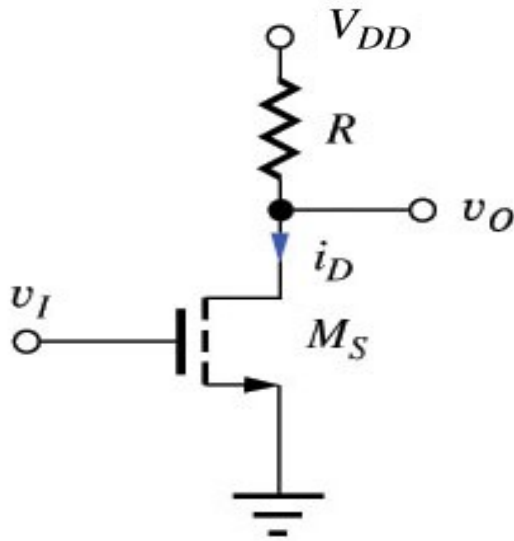
Consideriamo un MOS con un carico resistivo sul drain. Il segnale di ingresso è applicato fra Gate e Source, mentre l'uscita è la tensione fra Drain e source.

Valutiamo la caratteristica di trasferimento e vediamo in quale zona è opportuno posizionare il punto Q



# Amplificatore MOS

---



Il circuito è esattamente lo stesso dell'invertitore con carico resistivo!

Per studiare il circuito, osserviamo che  $v_{DS}$  ed  $i_D$  sono legate da due relazioni. La prima è l'equazione alla maglia:

$$v_{DS} = V_{DD} - R i_D$$

ovvero:

$$i_D = V_{DD}/R - v_{DS}/R$$

La seconda relazione è data dalle caratteristiche del MOS:

$$i_D = f(v_{DS}, v_{GS})$$

# Analisi grafica

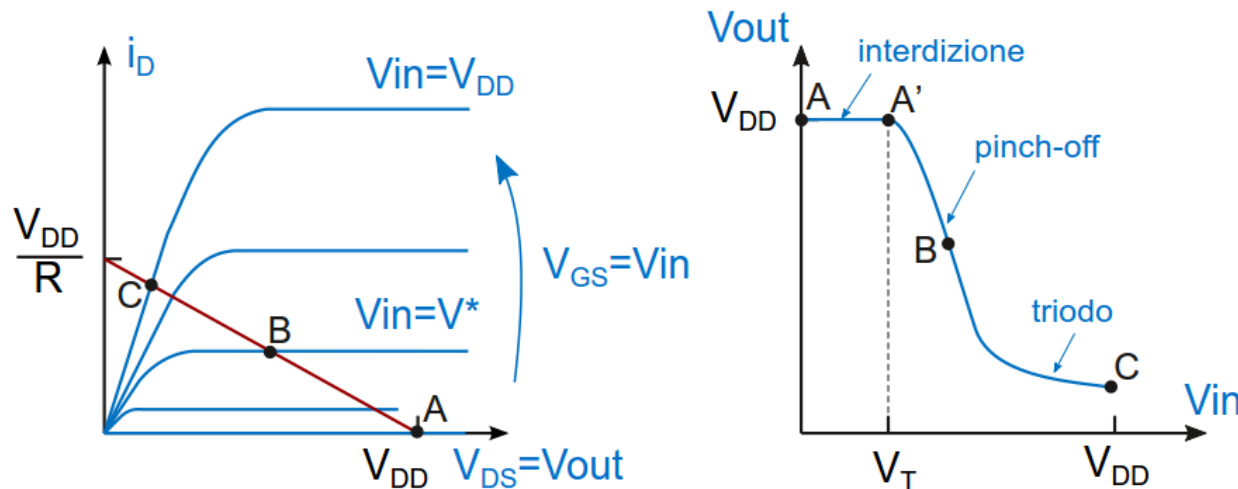
Ci poniamo nel piano  $i_D - v_{DS}$

L'equazione:  $i_D = V_{DD}/R - v_{DS}/R$  è una retta (la **retta di carico**)

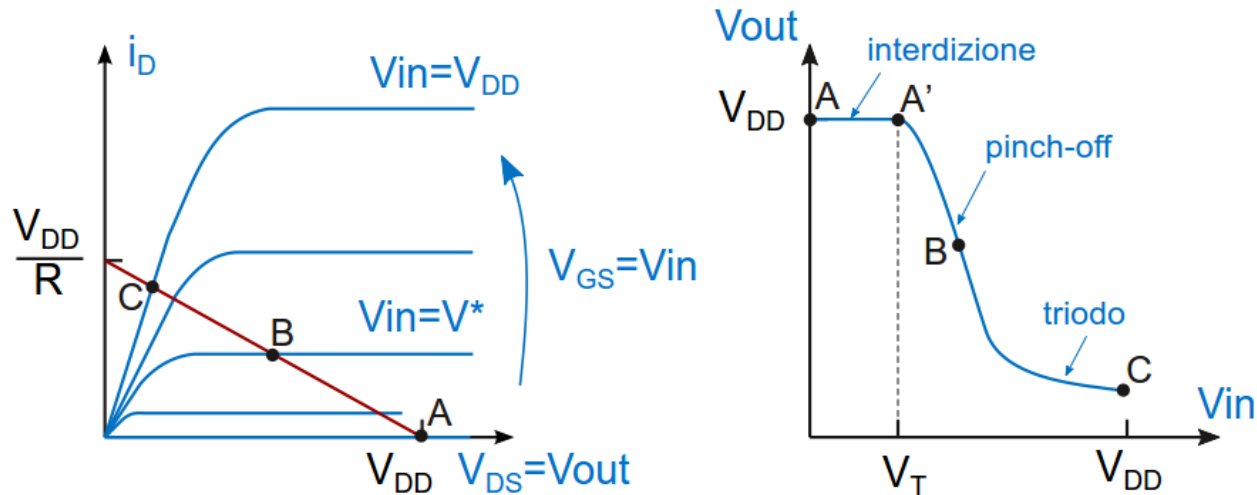
La relazione  $i_D = f(v_{DS}, v_{GS})$  corrisponde alle caratteristiche del MOS

Per ogni valore di  $v_{GS}$ , l'intersezione fra la caratteristica del MOS e la retta di carico fornisce i valori di  $i_D$  e  $v_{DS}$

Notare che  $v_{GS} = V_{in}$  e  $v_{DS} = V_{out}$



# Caratteristica di trasferimento

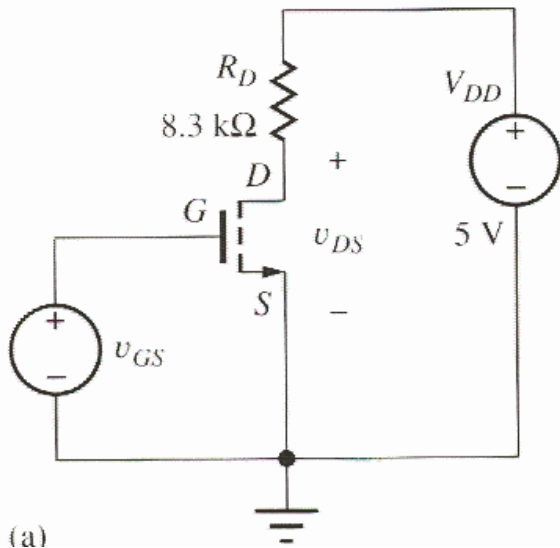


La caratteristica di trasferimento è il grafico di destra! Il grafico di sinistra ci serve per ottenere (per punti) la caratteristica di trasferimento.

La caratteristica di trasferimento evidenzia chiaramente che **il MOS deve essere polarizzato in regione di pinch-off per essere utilizzato efficacemente come amplificatore.**

# Amplificatore a MOS

Analisi con il MOS in regione di pinch-off



$$v_O = v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$$

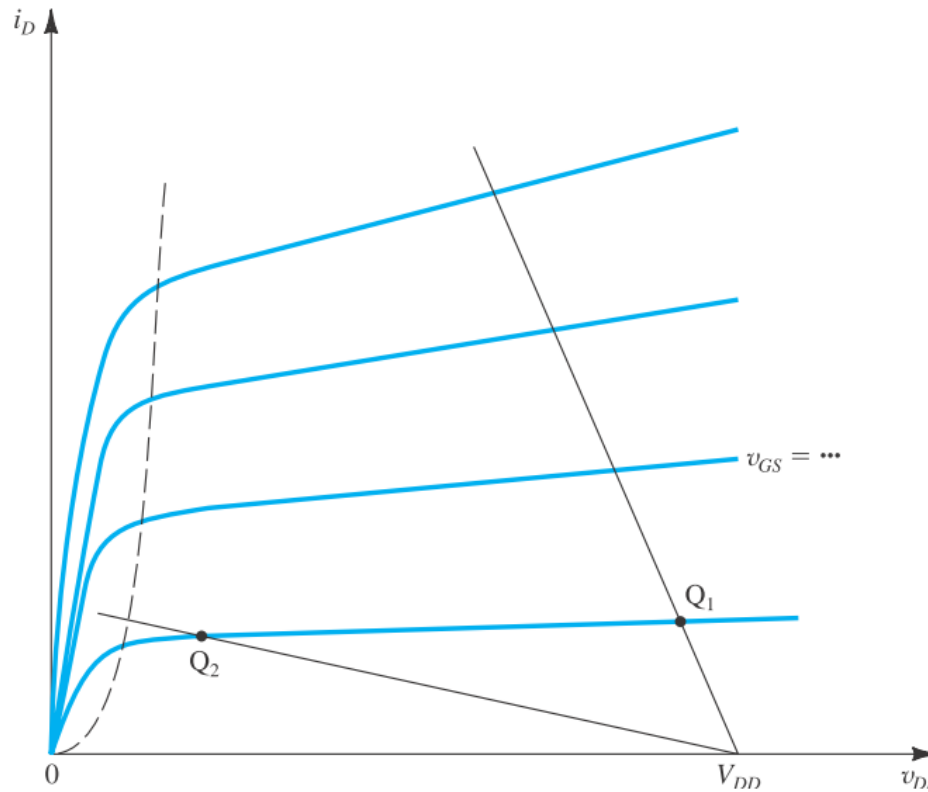
$$\text{in pinch-off: } i_D = \frac{1}{2} K (v_{GS} - V_T)^2$$

$$v_O = V_{DD} - \frac{1}{2} R_D K (v_I - V_T)^2$$

$$A_V = \left. \frac{dv_O}{dv_I} \right|_{v_I=V_I} = -R_D K (V_I - V_T)^2$$

L'ultima relazione evidenzia analiticamente la dipendenza del guadagno dal punto di lavoro.

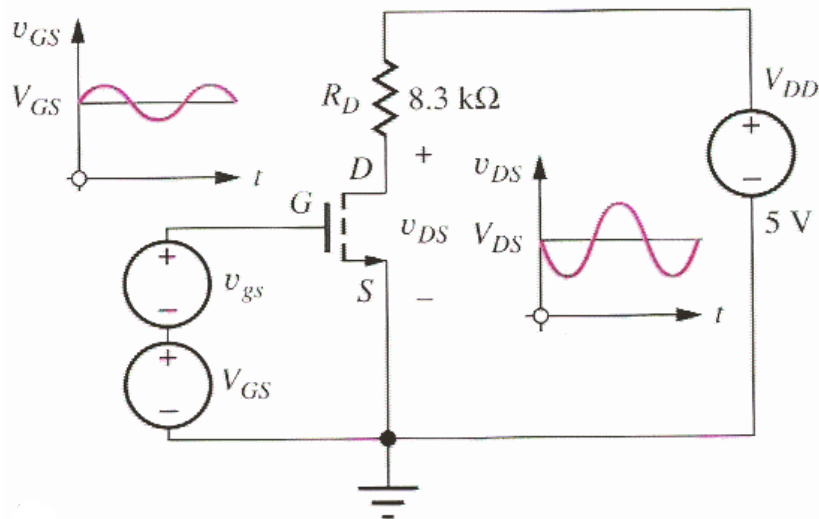
# Scelta del punto Q



**FIGURA 4.27** Due rette di carico ed i corrispondenti punti di polarizzazione. Il punto  $Q_1$  non lascia sufficiente spazio alle variazioni positive della tensione di drain (troppo vicino a  $V_{DD}$ ). Il punto  $Q_2$  è troppo vicino al limite della regione di triodo e potrebbe non essere adatto per variazioni negative della tensione di drain.

# Amplificatore a MOS

Il circuito in basso mostra uno schema di principio, idealizzato, in cui la polarizzazione è garantita da un opportuno generatore di tensione  $V_{GS}$ . A questo generatore, costante, si sovrappone il segnale di ingresso rappresentato dal generatore  $v_{gs}$ .



**Non si tratta, evidentemente, di una configurazione utilizzabile in pratica**, ma solo di uno schema di principio – si richiede infatti un generatore aggiuntivo per polarizzare l'amplificatore.

# Reti di polarizzazione con condensatori

---

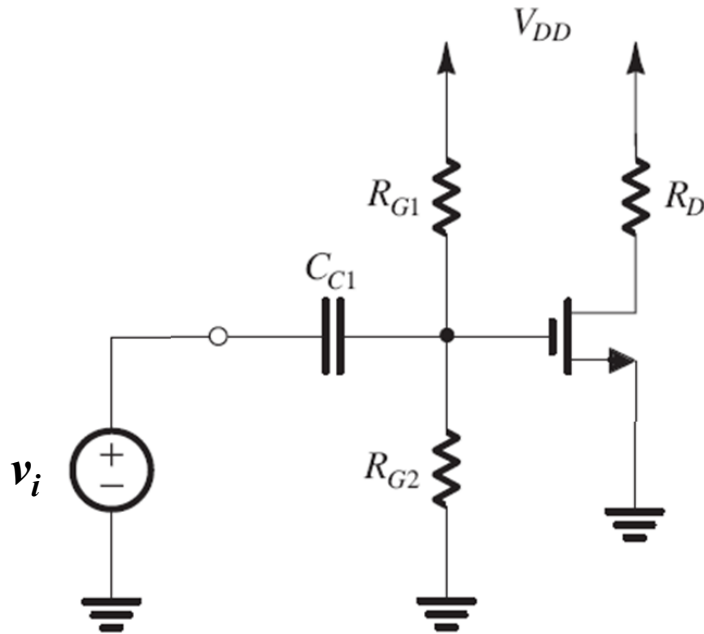
Si impiegano **delle reti di resistori per polarizzare l'amplificatore**, senza utilizzare ulteriori generatori.

Si aggiungono dei condensatori per ottenere che il segnale si sommi alla polarizzazione, senza alterare quest'ultima.

I condensatori introducono nella risposta in frequenza un comportamento di tipo **passa - alto**

# Esempio: amplificatore con NMOS

---

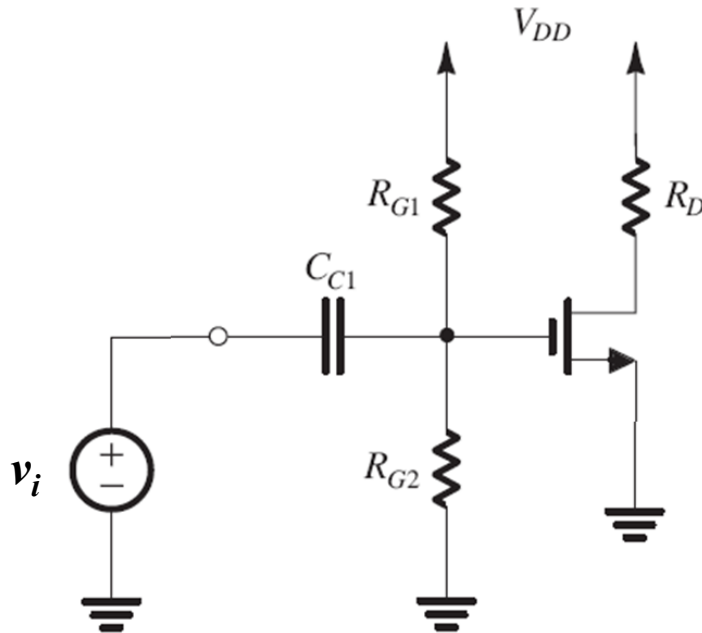


I resistori  $R_{G1}$  ed  $R_{G2}$  consentono di polarizzare l'amplificatore.

Il segnale d'ingresso è iniettato nel circuito attraverso il **condensatore di accoppiamento**  $C_{C1}$ : in questo modo possiamo applicare il segnale d'ingresso all'amplificatore senza alterare la polarizzazione del circuito.

Il condensatore  $C_{C1}$  viene anche detto **condensatore di blocco** per le componenti continue.

# Effetto del condensatore



Se il segnale di ingresso ha una frequenza sufficientemente alta, l'impedenza del condensatore è trascurabile e la sua presenza, nell'analisi delle componenti variabili, può essere trascurata.

Al decrescere della frequenza del segnale d'ingresso, l'amplificatore comincerà a manifestare una riduzione di guadagno a causa della impedenza offerta dal condensatore  $C_{C1}$ .

Il sistema si configura quindi come un amplificatore passa-alto.

Approfondiremo il comportamento in frequenza più avanti.

# Comportamento dei condensatori

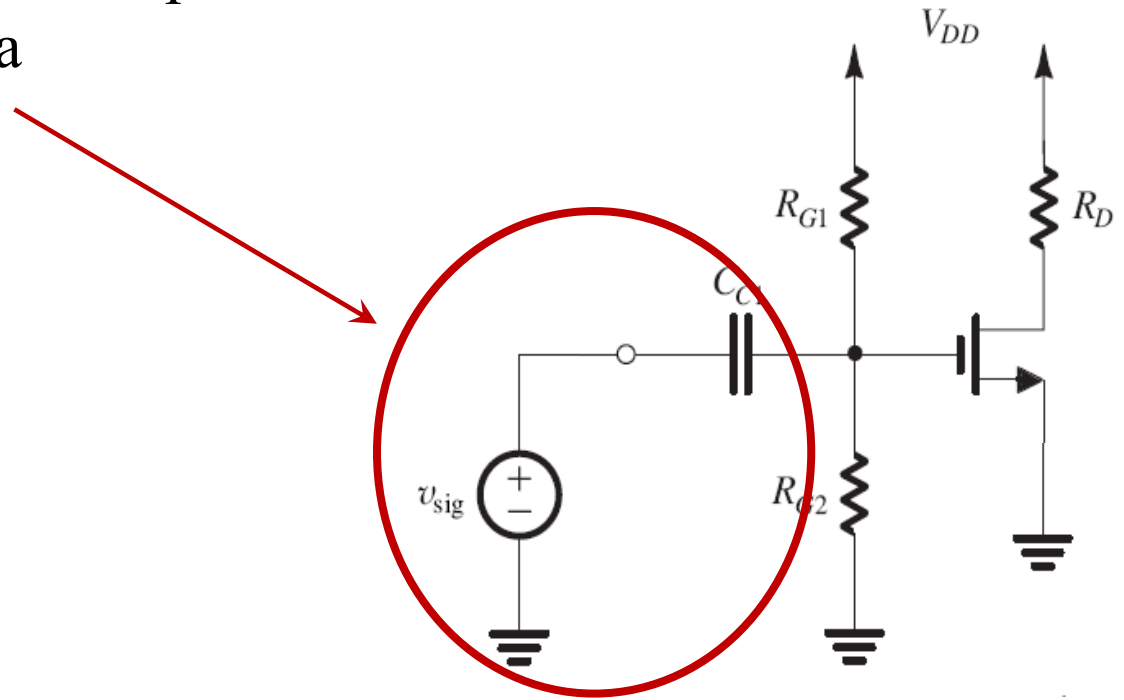
---

**Determinazione del punto Q (analisi statica):** il condensatore blocca la componente continua e quindi è un circuito aperto.

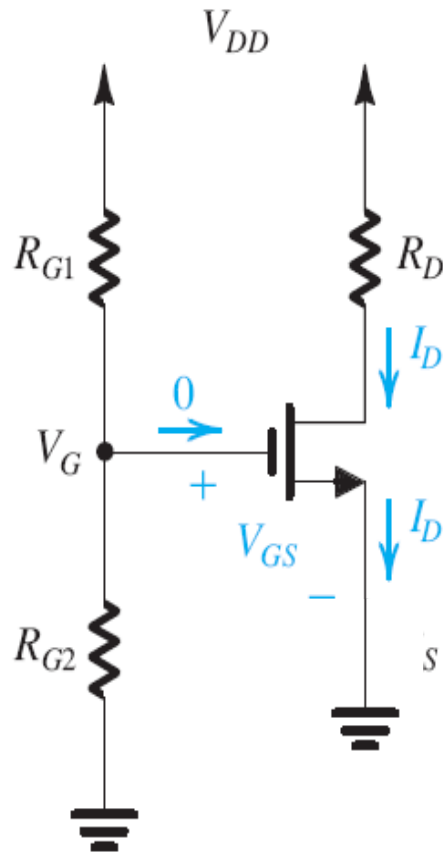
**Determinazione del guadagno (analisi dinamica):** se la frequenza del segnale è sufficientemente alta, l'impedenza offerta dal condensatore è trascurabile ed il condensatore di accoppiamento può essere trattato come un *corto circuito*. Per frequenze più basse, invece, l'effetto del condensatore di accoppiamento sulle componenti di segnale non può essere trascurato.

# Analisi statica

Per lo studio della polarizzazione (analisi statica), il condensatore è un circuito aperto e si può quindi eliminare la parte di circuito evidenziata in figura



# Analisi statica



La figura mostra il circuito equivalente per l'analisi statica.

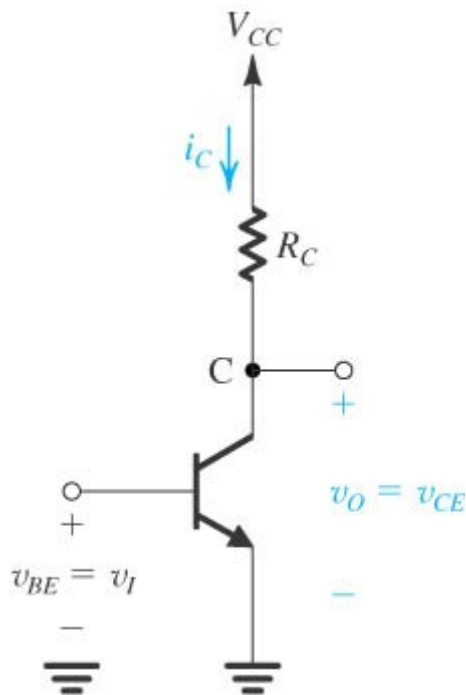
Scegliamo le  $R$  in modo da posizionare il punto  $Q$  nella zona desiderata della caratteristica di trasferimento.

---

# Il BJT come Amplificatore

# Il BJT Come amplificatore

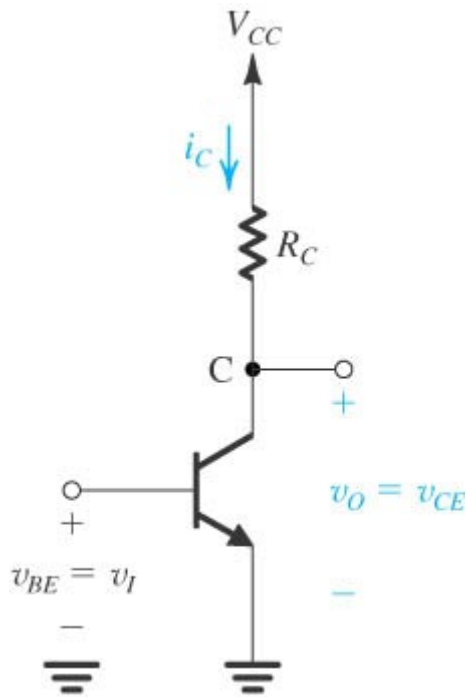
L'amplificatore elementare a transistor bipolare ha la stessa struttura dell'amplificatore a MOS, come mostra la figura.



Il segnale di ingresso si applica fra base ed emettitore, per cui:  $v_I = v_{BE}$   
L'uscita corrisponde alla tensione collettore-emettitore:  $v_O = v_{CE}$

# Il BJT Come amplificatore

$v_{BE} < 0.6V \Rightarrow$   
BJT interdetto  
correnti nulle  
 $v_O = V_{CC}$



al crescere di  $v_{BE}$   
BJT conduce,  $v_{CE} > 0.3V$   
regione attiva diretta:  $i_C \approx I_S e^{v_{BE}/V_T}$

al crescere ulteriore di  $v_{BE}$   
BJT conduce,  $v_{CE} < 0.3V$   
regione di saturazione

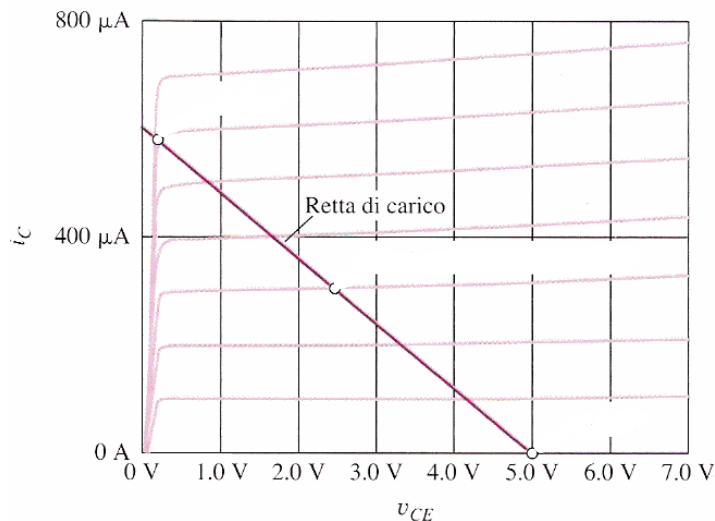
# Analisi grafica

Del tutto analoga a quella del circuito a MOS.

Ci poniamo nel piano  $i_C - v_{CE}$

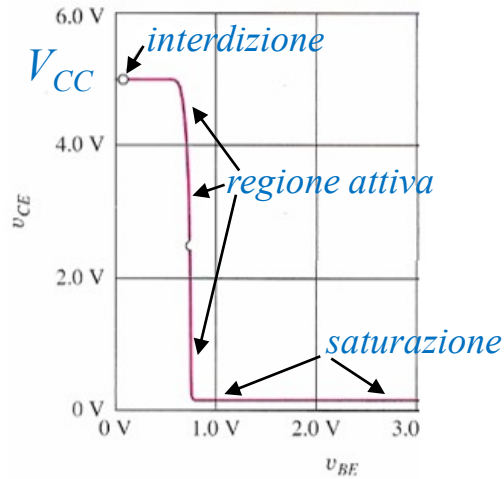
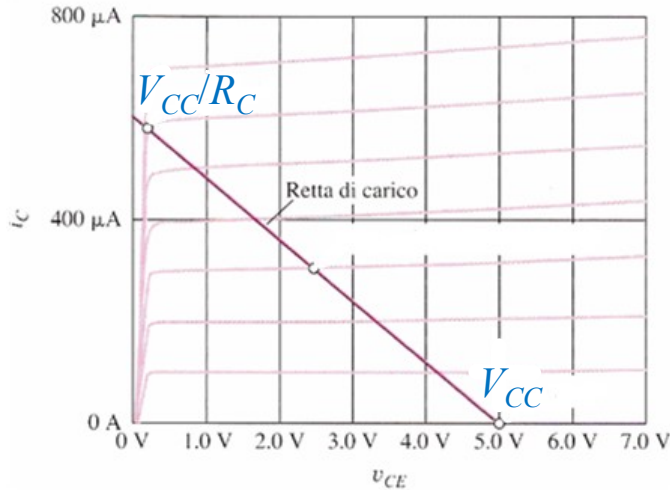
L'equazione:  $i_C = V_{CC}/R - v_{CE}/R$  è la retta di carico

La relazione  $i_C = f(v_{CE}, v_{BE})$  corrisponde alle caratteristiche del BJT (da notare che le caratteristiche del BJT sono in questo caso parametrizzate in  $v_{BE}$ , mentre normalmente si riportano al variare di  $i_B$ ).



Per ogni valore di  $v_{BE}$ , l'intersezione fra la caratteristica del BJT e la retta di carico fornisce i valori di  $i_C$  e  $v_{CE}$  e possiamo così costruire per punti la caratteristica di trasferimento.

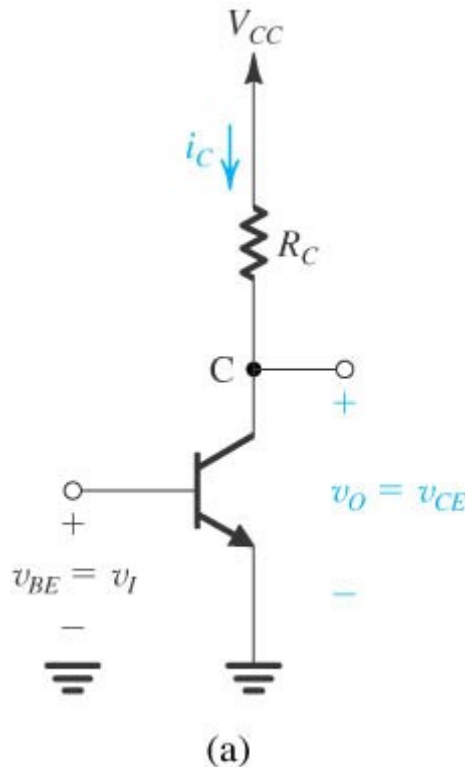
# Caratteristica di trasferimento



La caratteristica di trasferimento è il grafico di destra! Il grafico di sinistra ci serve per ottenere (per punti) la caratteristica di trasferimento.

- Per:  $v_{BE} < 0.6\text{V} \Rightarrow$  BJT interdetto,  $i_C = 0$  e quindi  $v_O = V_{CC}$
- Al crescere di  $v_{BE}$  il BJT entra in regione attiva diretta ( $v_{CE} > 0.3\text{V}$ ) e la caratteristica di trasferimento decresce molto rapidamente. Il punto Q deve essere posizionato in questa regione!
- Al crescere ulteriore di  $v_{BE}$  il BJT entra in saturazione con  $v_{CE} \approx 0.3\text{V}$

# Il BJT Come amplificatore



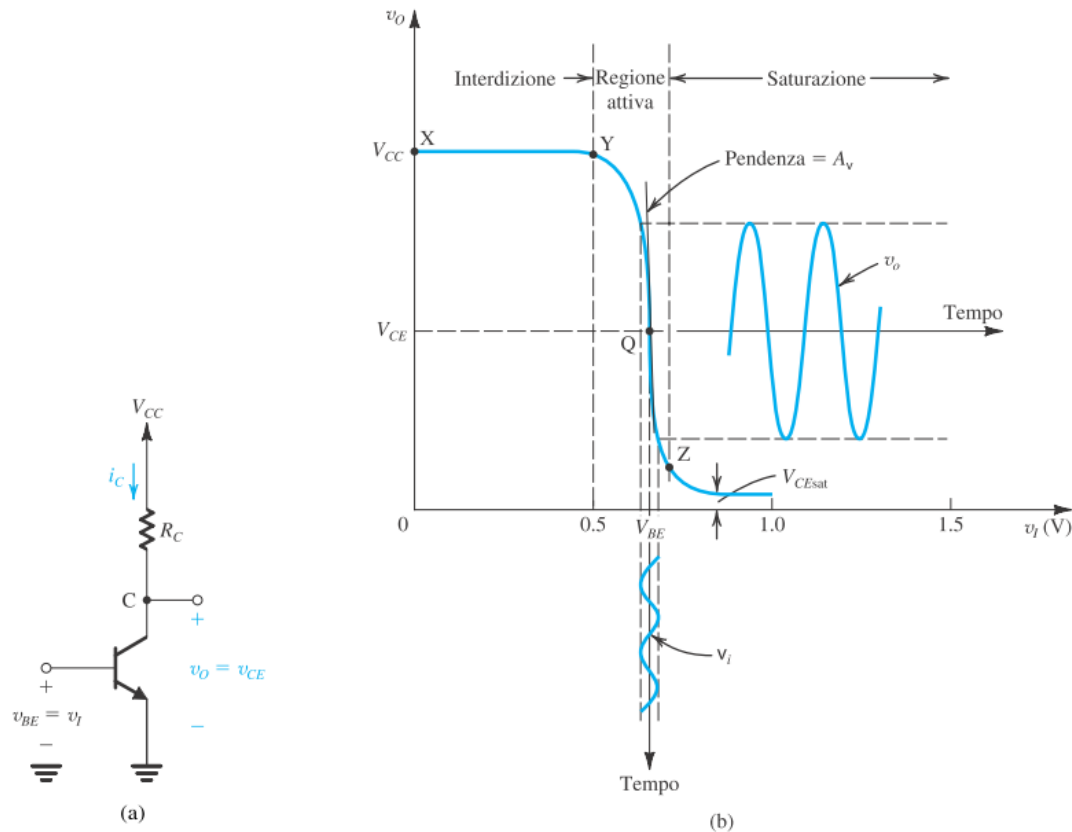
Analisi in regione attiva diretta

$$i_C \approx I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$v_O = V_{CC} - R_C i_C = V_{CC} - R_C I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

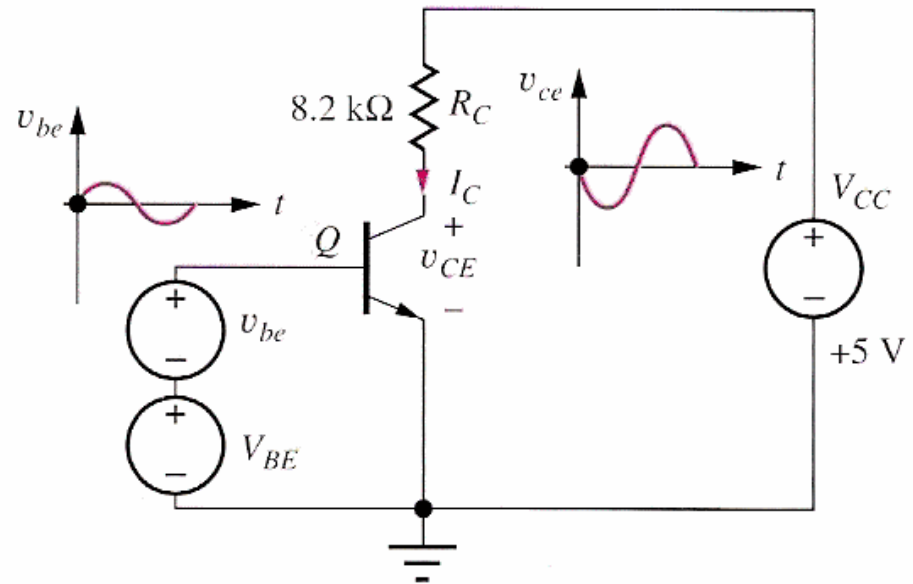
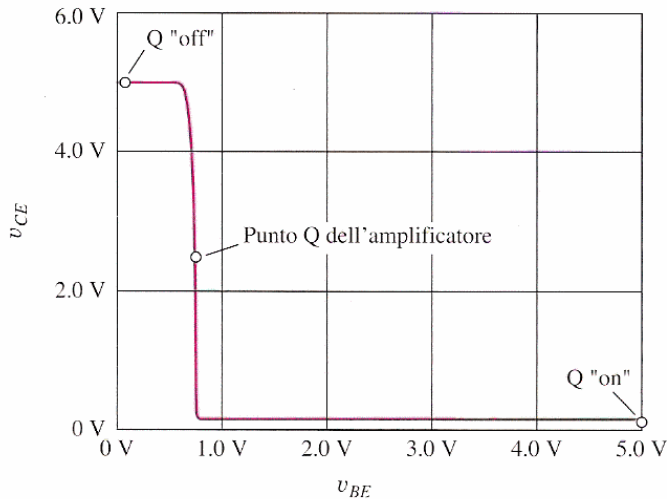
$$A_v \equiv \frac{dv_O}{dv_I} = -\frac{R_C I_S}{V_T} e^{v_{BE}/V_T} = -\frac{R_C I_C}{V_T}$$

# Il BJT Come amplificatore



**FIGURA 5.26** (a) Circuito amplificatore fondamentale ad emettitore comune. (b) Caratteristica di trasferimento del circuito mostrato in (a). L'amplificatore è polarizzato nel punto  $Q$  e alla tensione di polarizzazione dc  $V_{BE}$  è sovrapposto un piccolo segnale  $v_i$ . La componente di segnale della tensione di uscita  $v_o$  appare sovrapposta alla tensione continua di collettore  $V_{CE}$ . L'ampiezza di  $v_o$  è maggiore di quella di  $v_i$  del guadagno di tensione  $A_v$ .

# Il BJT Come amplificatore



Il circuito a destra mostra uno schema di principio, idealizzato, in cui la polarizzazione è garantita da un opportuno generatore di tensione  $V_{BE}$ . A questo generatore, costante, si sovrappone il segnale di ingresso rappresentato dal generatore  $v_{be}$ . **Non si tratta, evidentemente, di una configurazione utilizzabile in pratica, ma solo di uno schema di principio.**

# Reti di polarizzazione con condensatori

---

La problematica è analoga a quella vista per i MOS.

Si impiegano delle reti di resistori per polarizzare l'amplificatore, senza utilizzare ulteriori generatori.

Si aggiungono dei condensatori per ottenere che il segnale si sommi alla polarizzazione, senza alterare quest'ultima.

I condensatori introducono nella risposta in frequenza un comportamento di tipo **passa - alto**