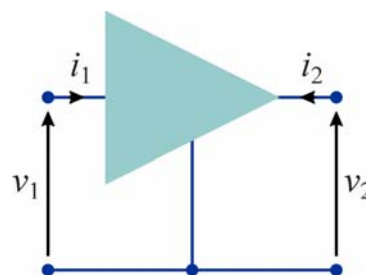
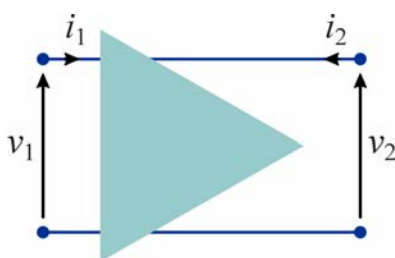


Amplificatori

www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm
(versione del 28-11-2012)

Amplificatore



- Un **amplificatore** è un dispositivo a due porte in grado di
 - ◆ aumentare l'ampiezza del segnale $s_i(t)$ applicato alla porta di ingresso, cioè di fornire in uscita un segnale
$$s_o(t) = A s_i(t) \quad \text{con} \quad |A| > 1$$
 - ◆ fornire alla porta di uscita una potenza maggiore di quella assorbita dalla porta di ingresso

Guadagno di potenza

- Per un amplificatore deve risultare > 1 il **guadagno di potenza** definito come rapporto tra la potenza ceduta al carico e la potenza assorbita in ingresso

$$A_p = \frac{P_L}{P_1} = \frac{-P_2}{P_1} = \frac{-v_2 i_2}{v_1 i_1} = -A_v A_i$$

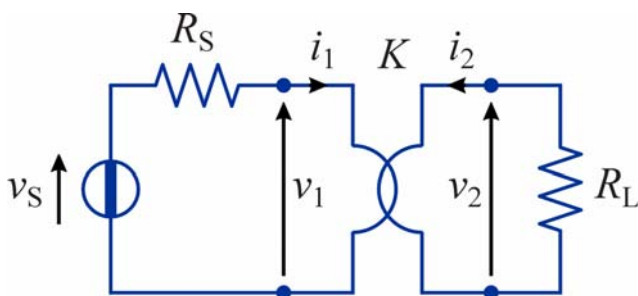
- Questo comporta che almeno uno tra il guadagno di tensione e il guadagno di corrente deve avere valore assoluto > 1 (inoltre A_v e A_i devono avere segni opposti)

$$A_p > 1 \Rightarrow |A_v| > 1 \text{ oppure } |A_i| > 1$$

- ➔ E' possibile che un amplificatore amplifichi solo la tensione e attenui la corrente ($|A_v| > 1$ e $|A_i| < 1$) o amplifichi solo la corrente e attenui la tensione ($|A_v| < 1$ e $|A_i| > 1$), purché i valori dei guadagni di tensione e di corrente siano tali da dare luogo a un guadagno di potenza > 1

3

Esempio – trasformatore ideale



$$v_1 = K v_2 = \frac{N_1}{N_2} v_2 \Rightarrow A_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$i_1 = -\frac{1}{K} i_2 = -\frac{N_2}{N_1} i_2 \Rightarrow A_i = \frac{i_2}{i_1} = -\frac{N_1}{N_2}$$

- Un trasformatore può fornire guadagno di tensione (se $N_2 > N_1$) o di corrente se ($N_1 > N_2$), ma non è in grado di fornire guadagno di potenza

$$A_p = -A_v A_i = 1$$

- La potenza fornita in uscita è uguale a quella assorbita in ingresso (considerando il caso ideale in cui si trascurano le perdite)

- ➔ *Un trasformatore non è un caso particolare di amplificatore*

4

Espressione dei guadagni in decibel

- Il **decibel** (dB) è una unità logaritmica convenzionale utilizzata per esprimere il rapporto tra due potenze (es. guadagno di potenza)

$$A_{\text{pdB}} = 10 \log_{10} \frac{P_L}{P_1} = 10 \log_{10} A_p$$

- Nel caso di rapporti tra due tensioni o due correnti (es. guadagno di tensione o di corrente) si possono esprimere i valori in dB considerando le potenze che le tensioni o le correnti svilupperebbero se applicate a resistenze di uguale valore

$$A_{\text{vdB}} = 10 \log_{10} \frac{V_2^2 / R}{V_1^2 / R} = 20 \log_{10} \frac{|V_2|}{|V_1|} = 20 \log_{10} |A_v|$$

$$A_{\text{idB}} = 10 \log_{10} \frac{RI_2^2}{RI_1^2} = 20 \log_{10} \frac{|I_2|}{|I_1|} = 20 \log_{10} |A_i|$$

- ➔ *Per i rapporti tra potenze il coefficiente moltiplicativo è 10, per i rapporti tra tensioni o correnti è 20*

5

Note

- I valori in decibel sono sempre quantità adimensionali dato che derivano da rapporti tra grandezze omogenee
- Nelle espressioni dei guadagni di tensione e di corrente in decibel compare il valore assoluto perché A_v e A_i possono assumere sia valori positivi o sia valori negativi
 - un valore negativo indica che il segnale in uscita è in opposizione di fase con l'ingresso
 - la relazione tra le ampiezze è data dal valore assoluto del guadagno
- I valori in decibel dei guadagni forniscono solo le informazioni relative alle ampiezze (le informazioni sulle fasi devono essere indicata a parte)
 - un valore positivo del guadagno in dB indica che si ha amplificazione
 - un valore negativo del guadagno in dB indica che il segnale in uscita è attenuato

6

Valori in dB di quantità non adimensionali

- E' possibile esprimere i valori in dB anche di quantità non adimensionali considerando il rapporto con un opportuno valore di riferimento
 - ◆ In questi casi si deve specificare l'unità di misura

- Esempi

- ◆ dBV (dB Volt) = valore in dB del rapporto tra una tensione e la tensione di riferimento di 1 V

$$V_{\text{dBV}} = 20 \log_{10}(V)$$

- ◆ dBm (dB milliwatt) = valore in dB del rapporto tra una potenza e la potenza di riferimento di 1 mW

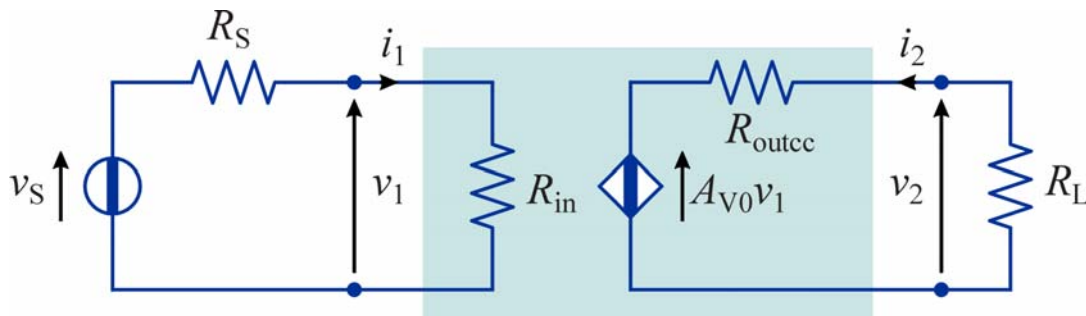
$$P_{\text{dBm}} = 10 \log_{10}(P_{\text{mW}}) = 10 \log_{10}(P_W) + 30$$

$$P_{\text{mW}} = 10^{\frac{P_{\text{dBm}}}{10}}$$

7

Amplificatore di tensione

- Un amplificatore utilizzato per trattare segnali "in tensione" può essere rappresentato mediante lo schema seguente



- Se l'amplificatore non è unilaterale R_{in} dipende anche dalla resistenza di carico R_L
- A_{v0} rappresenta il guadagno a vuoto (cioè per $R_L \rightarrow \infty$)
- R_{outcc} rappresenta il rapporto tra v_2 e i_2 quando $v_1 = 0$

8

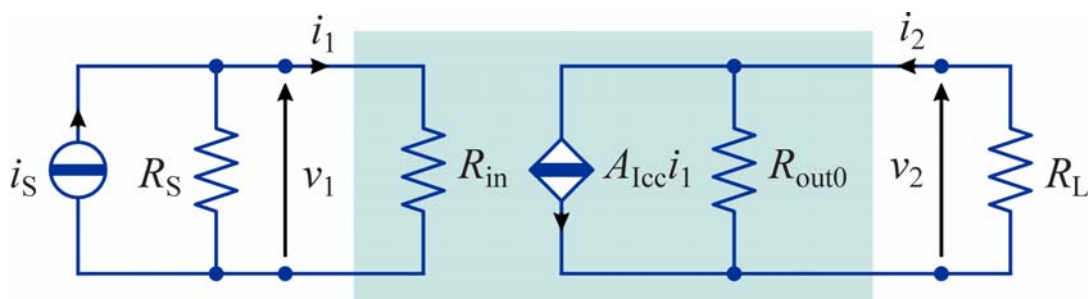
Amplificatore di tensione

- In generale per un amplificatore di tensione è opportuno che
 - ◆ La resistenza di ingresso sia grande rispetto alla resistenza della sorgente: $R_{in} \gg R_S$
 - ➔ la tensione fornita dalla sorgente non viene alterata dalla presenza dell'amplificatore
 - ➔ la caduta di tensione su R_S è trascurabile, quindi v_1 è prossima al valore massimo possibile v_s
 - ◆ La resistenza di uscita sia piccola rispetto alla resistenza di carico: $R_{outcc} \ll R_L$
 - ➔ la tensione in uscita non varia apprezzabilmente al variare del carico
 - ➔ la caduta di tensione sulla resistenza di uscita è trascurabile, quindi il guadagno di tensione è prossimo al valore massimo possibile rappresentato da A_{v0}

9

Amplificatore di corrente

- Un amplificatore utilizzato per trattare segnali “in corrente” può essere rappresentato mediante lo schema seguente



- Se l'amplificatore non è unilaterale R_{in} dipende anche dalla resistenza di carico R_L
- A_{Icc} rappresenta il guadagno di corrente in cortocircuito (cioè per $R_L = 0$)
- R_{out0} rappresenta il rapporto tra v_2 e i_2 quando $i_1 = 0$

10

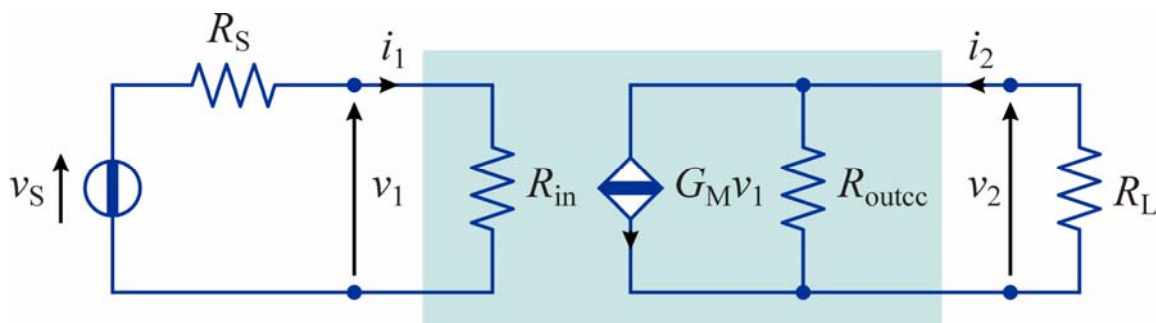
Amplificatore di corrente

- In generale per un amplificatore di tensione è opportuno che
 - ◆ La resistenza di ingresso sia piccola rispetto alla resistenza della sorgente: $R_{in} \ll R_S$
 - ➔ la corrente di R_S è trascurabile, quindi i_1 è prossima al valore massimo possibile i_s
 - ➔ la corrente fornita dalla sorgente non dipende dalle caratteristiche dell'amplificatore
 - ◆ La resistenza di uscita sia grande rispetto alla resistenza di carico: $R_{out0} \gg R_L$
 - ➔ la corrente in uscita non varia apprezzabilmente al variare del carico
 - ➔ la corrente attraverso la resistenza di uscita è trascurabile, quindi il guadagno di corrente è prossimo al valore massimo possibile rappresentato da A_{Icc}

11

Amplificatore a transconduttanza

- Si utilizza quando l'ingresso è "in tensione" e si vuole ottenere in uscita un segnale "in corrente"



- G_M rappresenta la transconduttanza in cortocircuito

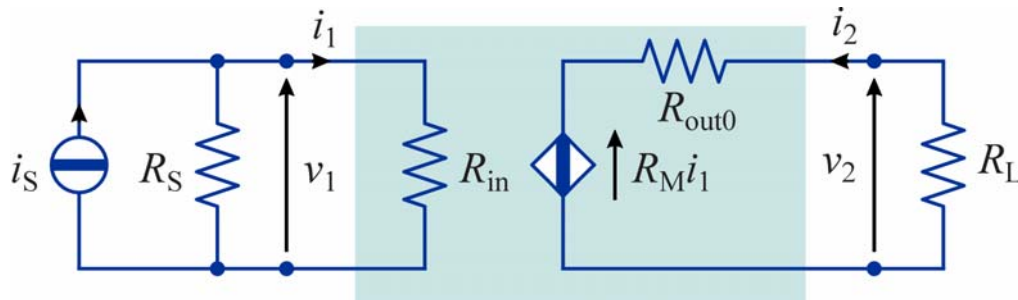
$$G_M = \left. \frac{i_2}{v_1} \right|_{v_2=0}$$

- In questo caso è opportuno avere
 - ◆ $R_{in} \gg R_S$
 - ◆ $R_{outcc} \gg R_L$

12

Amplificatore a transresistenza

- Si utilizza quando l'ingresso è "in corrente" e si vuole ottenere in uscita un segnale "in tensione"



- R_M rappresenta la transresistenza a vuoto

$$R_M = \left. \frac{v_2}{i_1} \right|_{i_2=0}$$

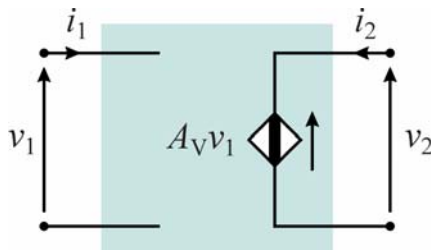
- In questo caso è opportuno avere
 - ♦ $R_{in} \ll R_S$
 - ♦ $R_{out0} \ll R_L$

13

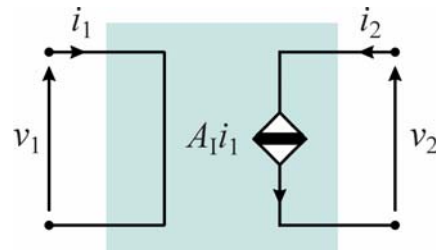
Amplificatori ideali

- I generatori dipendenti possono essere visti anche come amplificatori idealizzati

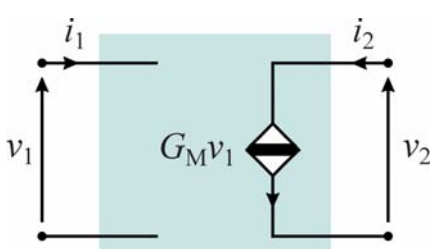
Amplificatore di tensione



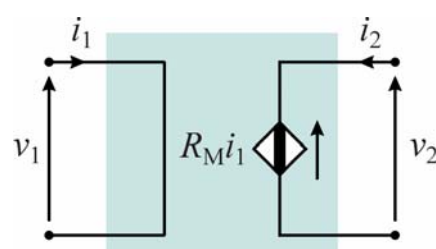
Amplificatore di corrente



Amplificatore a transconduttanza



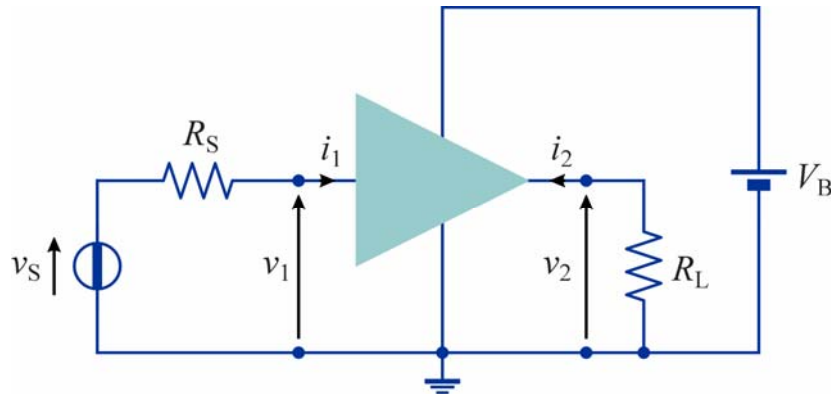
Amplificatore a transresistenza



14

Alimentazione dell'amplificatore

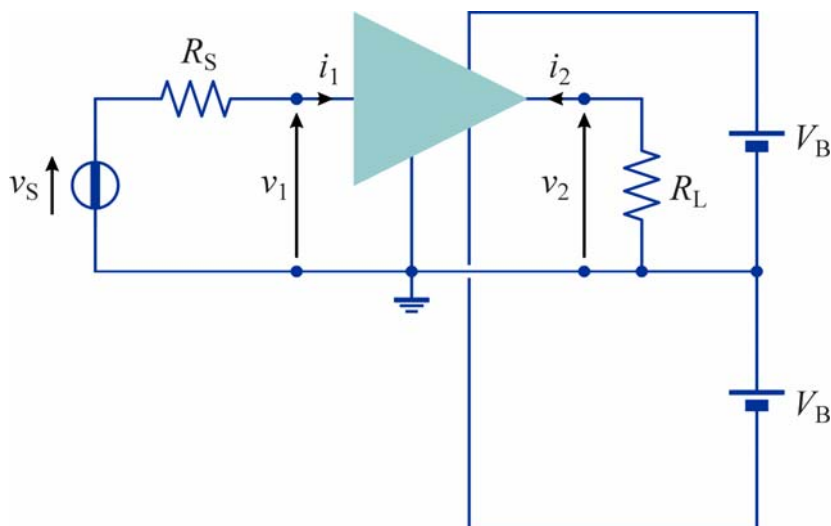
- Gli schemi di principio considerati finora non mostrano come un amplificatore possa fornire un guadagno di potenza
- Per poter erogare in uscita una potenza maggiore di quella assorbita in ingresso, un amplificatore deve essere dotato di una sorgente di energia (**alimentatore**), normalmente rappresentata da un generatore di tensione costante



15

Amplificatore con alimentazione duale

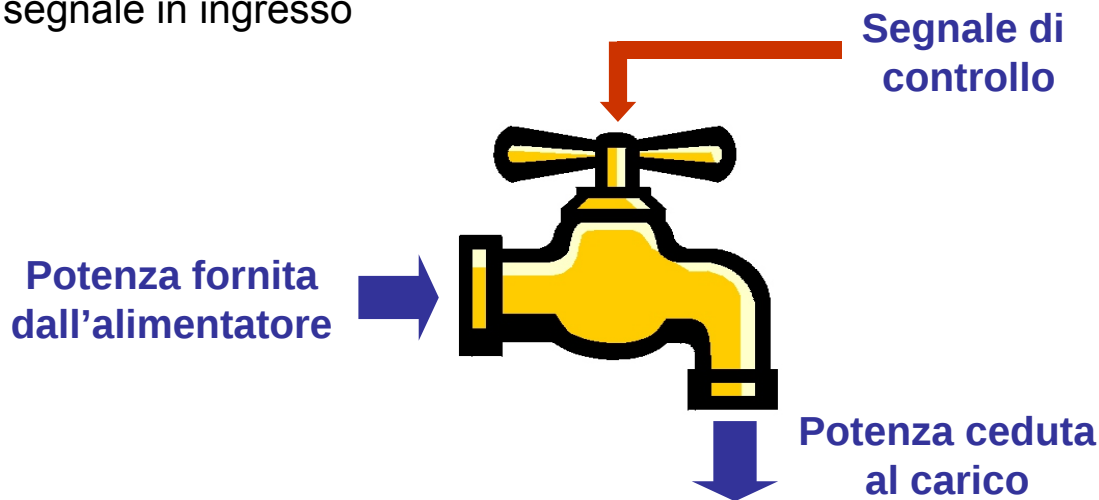
- Alcuni amplificatori possono richiedere più generatori di alimentazione
- Un caso frequente è rappresentato dall'alimentazione duale, realizzata mediante due generatori uguali con polarità opposte



16

Componenti attivi

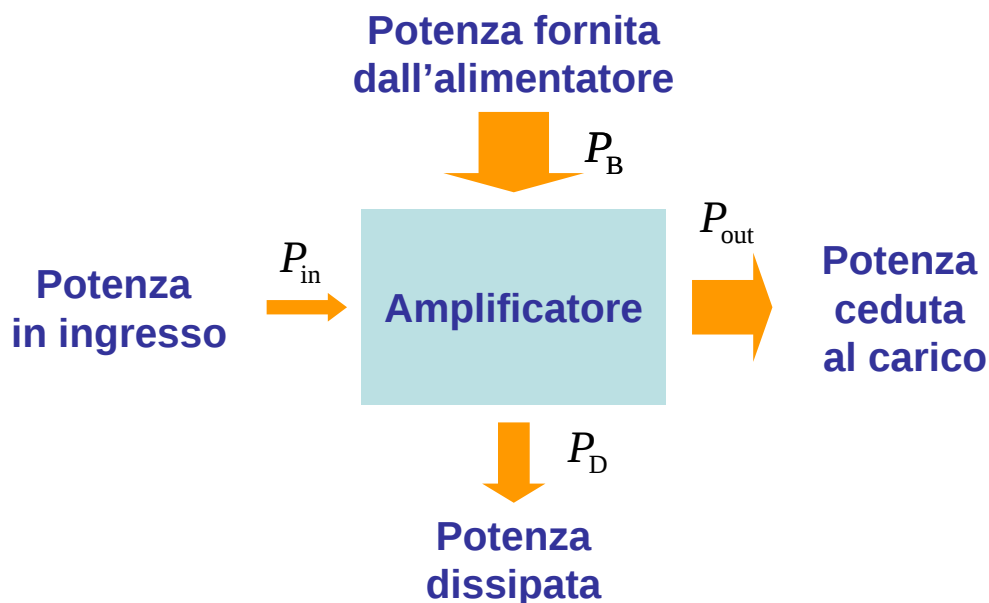
- Inoltre un amplificatore deve contenere dei dispositivi in grado di regolare il flusso di energia dall'alimentatore al carico in funzione del segnale in ingresso



- Questi dispositivi (normalmente **transistori**) sono detti impropriamente **componenti attivi**, perché, assieme ai generatori di alimentazione, possono essere rappresentati mediante circuiti equivalenti attivi

17

Bilancio energetico



$$P_B = P_{out} - P_{in} + P_D$$

18

Necessità dell'impiego di componenti non lineari

- I componenti che regolano il flusso di energia dall'alimentatore al carico devono essere necessariamente non lineari
- Se l'amplificatore fosse realizzato solo con componenti lineari dovrebbe valere il principio di sovrapposizione degli effetti
- Quindi le tensioni v_1 e v_2 sarebbero legate alle tensioni dei generatori da relazioni del tipo

$$v_1 = \alpha v_S + \beta V_B$$

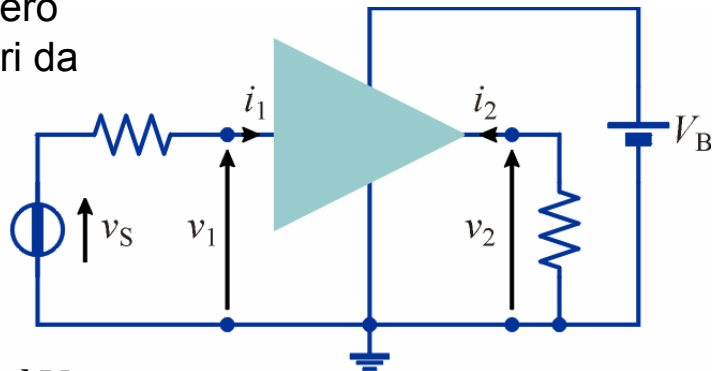
$$v_2 = \gamma v_S + \delta V_B$$

- Da cui si otterrebbe

$$v_2 = \frac{\gamma}{\alpha} v_1 + \frac{\alpha\delta - \beta\gamma}{\alpha} V_B = A_V v_1 + k V_B$$

- Analogamente per le correnti si avrebbe una relazione del tipo

$$i_2 = A_I i_1 + h V_B$$



19

Necessità dell'impiego di componenti non lineari

- Nelle relazioni precedenti i guadagni di tensione e di corrente A_V e A_I non dipendono da V_B
- Quindi se ne trarrebbe la conclusione assurda che l'amplificatore può fornire un guadagno di potenza > 1 anche in assenza di alimentazione
- Se l'amplificatore contiene componenti non lineari, in generale le relazioni tra le tensioni e le correnti in ingresso e in uscita sono del tipo

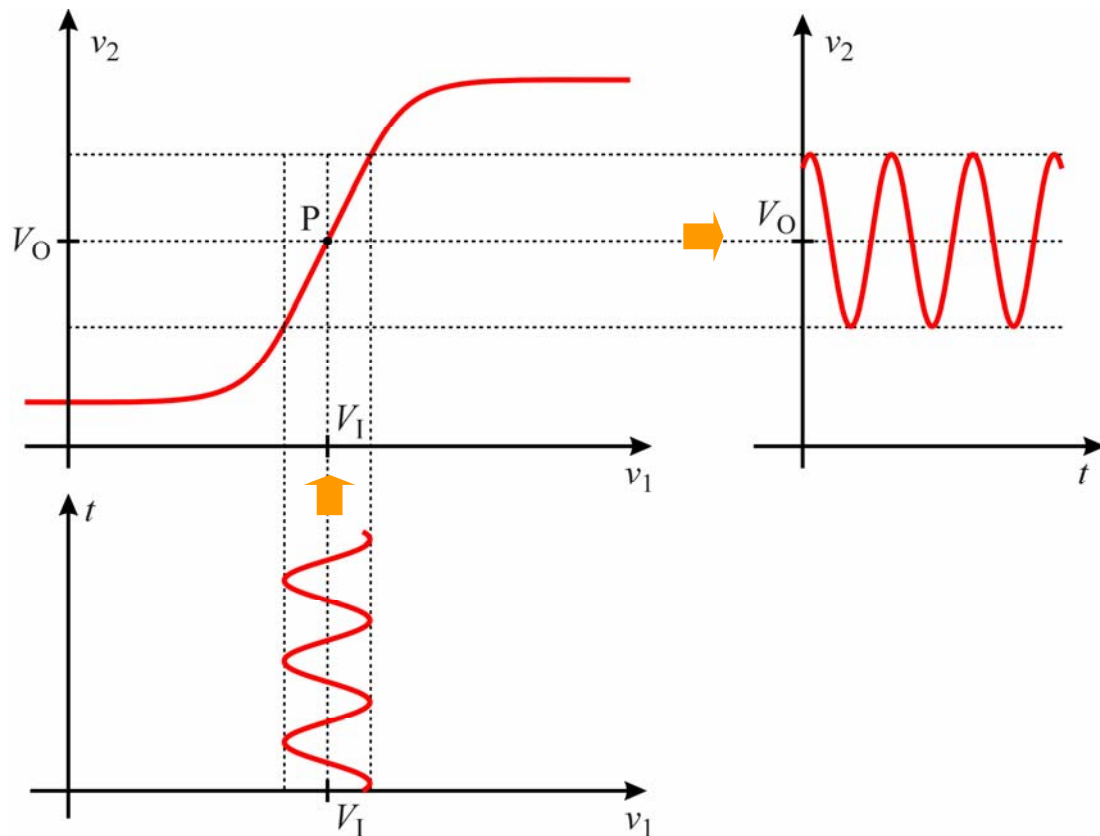
$$v_2 = f(v_1, V_B)$$

$$i_2 = g(i_1, V_B)$$

- La relazione tra i segnali in ingresso e uscita cambia al variare di V_B , ma è non lineare, mentre a un amplificatore si richiede l'uscita sia proporzionale all'ingresso
- In pratica è possibile ottenere caratteristiche ingresso-uscita che presentano dei tratti (almeno approssimativamente) rettilinei

20

Caratteristica ingresso-uscita



21

Espressione del guadagno nell'intorno del punto di lavoro

- Si considera un punto P (**punto di lavoro**) della caratteristica ingresso-uscita dell'amplificatore corrispondente a $v_1 = V_I$ e $v_2 = V_O$ con $V_O = f(V_I, V_B)$
- Se la tensione di ingresso varia in un intorno sufficientemente piccolo di V_I la tensione in uscita può essere espressa nella forma

$$V_O + \Delta v_2 = f(V_I + \Delta v_1, V_B) \cong f(V_I, V_B) + \left. \frac{\partial f}{\partial v_1} \right|_{v_1=V_I} \Delta v_1$$

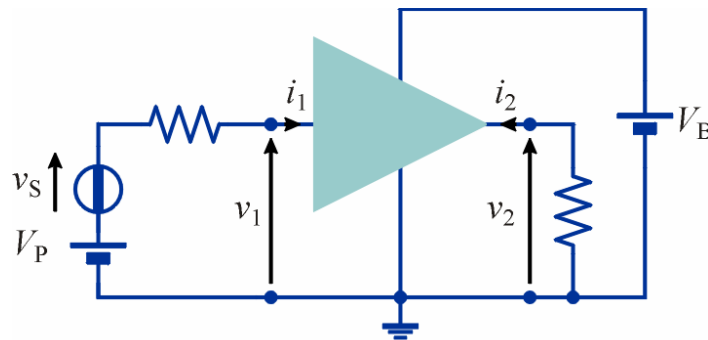
- In queste condizioni la relazione le variazioni di v_1 e v_2 è praticamente lineare ed è espressa dal guadagno di tensione

$$A_V = \frac{\Delta v_2}{\Delta v_1} = \left. \frac{\partial f}{\partial v_1} \right|_{v_1=V_I}$$

22

Polarizzazione

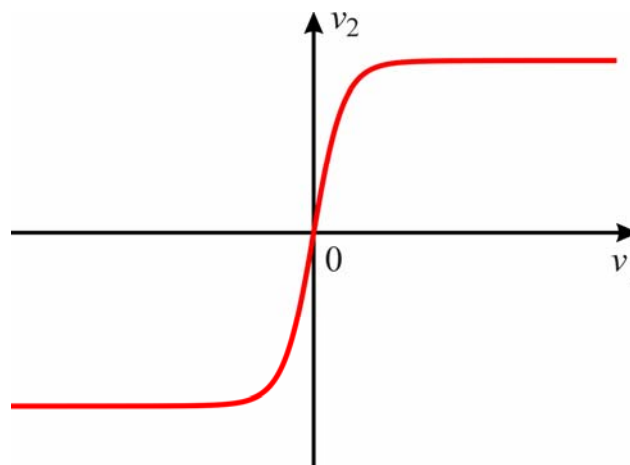
- Al segnale di ingresso viene sommata una tensione costante (**tensione di polarizzazione**) in modo che il punto di lavoro si trovi al centro del tratto rettilineo della caratteristica (normalmente questo non viene realizzato mediante un generatore separato, come mostra lo schema di principio, ma utilizzando il generatore V_B)
- Se l'ampiezza di v_S è tale da mantenere v_1 nel tratto rettilineo si ottiene un'amplificazione lineare



23

Caratteristica ingresso-uscita di un amplificatore con alimentazione duale

- Gli amplificatori con alimentazione duale in genere presentano caratteristiche ingresso-uscita simmetriche rispetto all'origine
- In questo caso è possibile utilizzare il punto di lavoro $v_1 = 0$, $v_2 = 0$



- Nell'intorno dell'origine v_2 è praticamente una funzione lineare di v_1 , ma è una funzione non lineare di V_B

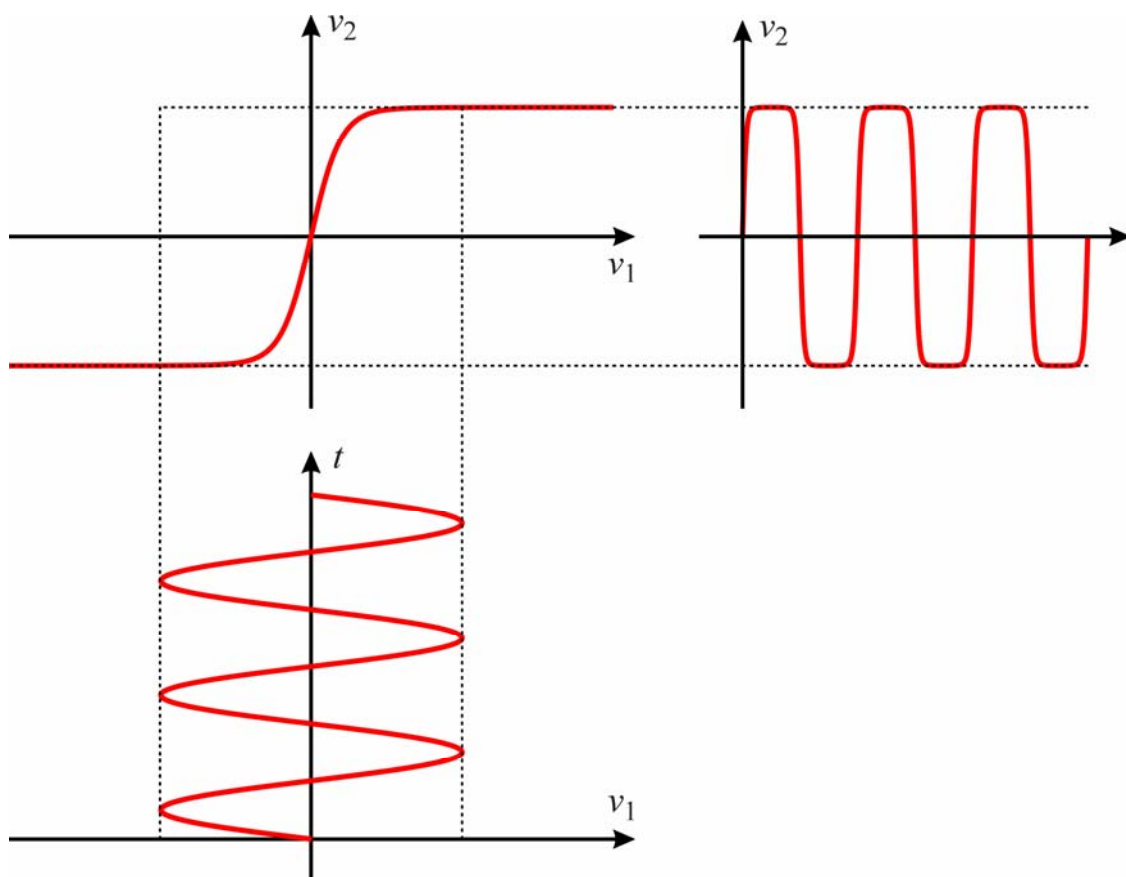
24

Saturazione

- Un amplificatore può avere un comportamento lineare solo in per un intervallo limitato di valori delle ampiezza dei segnale di ingresso e di uscita
- In particolare il livello del segnale di uscita non può superare dei valori limite (**livelli di saturazione**) dipendenti dal valore della tensione di alimentazione
- ➔ Da questo deriva un limite sull'intervallo di valori che può assumere il segnale in ingresso affinché non si abbia distorsione

25

Saturazione



26

Distorsione non lineare



- Si considera un due porte resistivo con caratteristica di trasferimento non lineare
$$v_2(t) = f[v_1(t)]$$
- Si assume che l'ingresso $v_1(t)$ sia sinusoidale
$$v_1(t) = V_M \cos(\omega t)$$
- La funzione f può essere rappresentata mediante uno sviluppo in serie di Taylor
$$f(v_1) = c_0 + c_1 v_1 + c_2 v_1^2 + c_3 v_1^3 + c_4 v_1^4 + \dots$$

27

Distorsione non lineare

- Sostituendo $v_1(t)$ nell'espressione di f si ottiene

$$\begin{aligned} v_2(t) &= c_0 + c_1 V_M \cos(\omega t) + c_2 V_M^2 \cos^2(\omega t) + c_3 V_M^3 \cos^3(\omega t) + c_4 V_M^4 \cos^4(\omega t) + \dots = \\ &= c_0 + c_1 V_M \cos(\omega t) + \frac{c_2 V_M^2}{2} [1 + \cos(2\omega t)] + \frac{c_3 V_M^3}{4} [3\cos(\omega t) + \cos(3\omega t)] + \\ &\quad + \frac{c_4 V_M^4}{8} [3 + 4\cos(2\omega t) + \cos(4\omega t)] + \dots \end{aligned}$$

- ➔ La tensione in uscita $v_2(t)$ è periodica con pulsazione fondamentale ω
 - ◆ Le potenze di v_1 di grado n dispari danno origine ad armoniche dispari di ordine $\leq n$
 - ◆ Le potenze di v_1 di grado n pari danno origine ad armoniche pari di ordine $\leq n$ e a termini costanti

28

Distorsione non lineare

- La risposta a regime di un circuito non lineare con ingressi sinusoidali isofrequenziali di pulsazione ω è in generale periodica con pulsazione fondamentale ω
- Mentre in un circuito lineare le risposte possono contenere solo le componenti spettrali presenti negli ingressi, un circuito non lineare può generare armoniche
- Un circuito lineare può introdurre distorsione solo se è dinamico
 - ♦ infatti in un circuito lineare resistivo le condizioni di non distorsione sono sempre verificate

$$v_2(t) = A_V v_1(t)$$

- Un circuito non lineare introduce distorsione anche se è puramente resistivo

29

Distorsione armonica totale

- L'entità della distorsione della forma d'onda di una tensione o di una corrente rispetto all'andamento sinusoidale è rappresentata mediante un parametro detto **distorsione armonica totale** o **THD** (*total harmonic distortion*)
- Per una funzione periodica

$$y(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega t + \alpha_k)$$

la THD è definita come rapporto tra la radice quadrata della somma dei quadrati dei valori efficaci delle armoniche superiori e il valore efficace della componente fondamentale

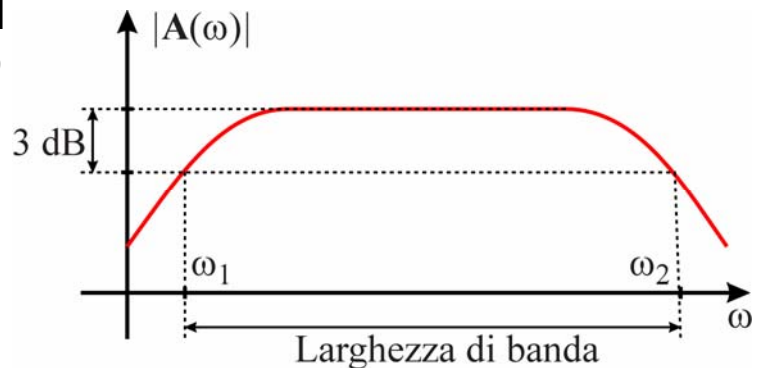
$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} A_{k\text{rms}}^2}}{A_{1\text{rms}}} \quad \left(A_{k\text{rms}} = \frac{A_k}{\sqrt{2}} \right)$$

$$\text{THD \%} = 100 \cdot \text{THD}$$

30

Risposta in frequenza

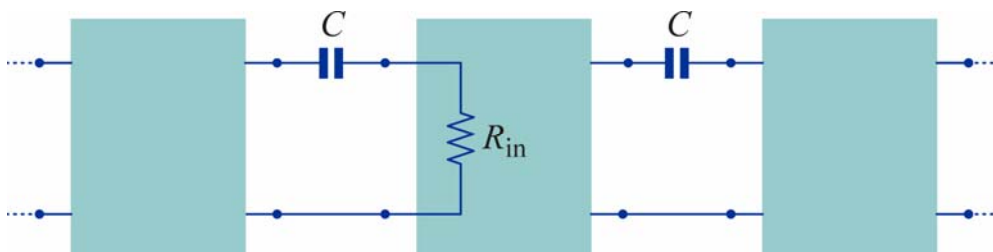
- Finora si è assunto che il comportamento dell'amplificatore sia puramente resistivo
- Normalmente nella pratica gli effetti reattivi sono trascurabili quando i segnali hanno componenti spettrali in una banda limitata di frequenze
- In particolare, di solito esiste un intervallo all'interno del quale il modulo del guadagno è praticamente indipendente dalla frequenza, mentre all'esterno il modulo del guadagno decresce
- Convenzionalmente si definisce **banda passante** dell'amplificatore l'intervallo di valori di ω entro il quale le variazioni del modulo del guadagno sono inferiori a 3 dB
- La differenza tra i valori di ω agli estremi dell'intervallo è detta **larghezza di banda**



31

Amplificatori ad accoppiamento capacitivo

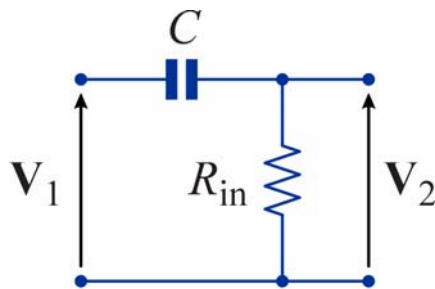
- La diminuzione del guadagno ad alte frequenze normalmente è dovuta alla presenza di effetti reattivi indesiderati (es. capacità parassite nei dispositivi attivi)
- La limitazione a basse frequenze di solito è dovuta alla presenza di **condensatori di accoppiamento** utilizzati per collegare gli stadi dell'amplificatore
 - ♦ questi condensatori consentono di semplificare il progetto dei singoli stadi dell'amplificatore
 - ♦ sono dimensionati in modo che, alle frequenze appartenenti allo spettro del segnale da amplificare, la loro reattanza sia trascurabile rispetto alla resistenza di ingresso dello stadio successivo



32

Amplificatori ad accoppiamento capacitivo

- Al diminuire di ω la reattanza dei condensatori aumenta, quindi si ha una caduta di tensione sempre maggiore
- Di conseguenza si riduce la tensione all'ingresso dello stadio seguente e quindi anche il guadagno complessivo dell'amplificatore
- Al limite, per $\omega = 0$ i condensatori si comportano come circuiti aperti e il guadagno si annulla

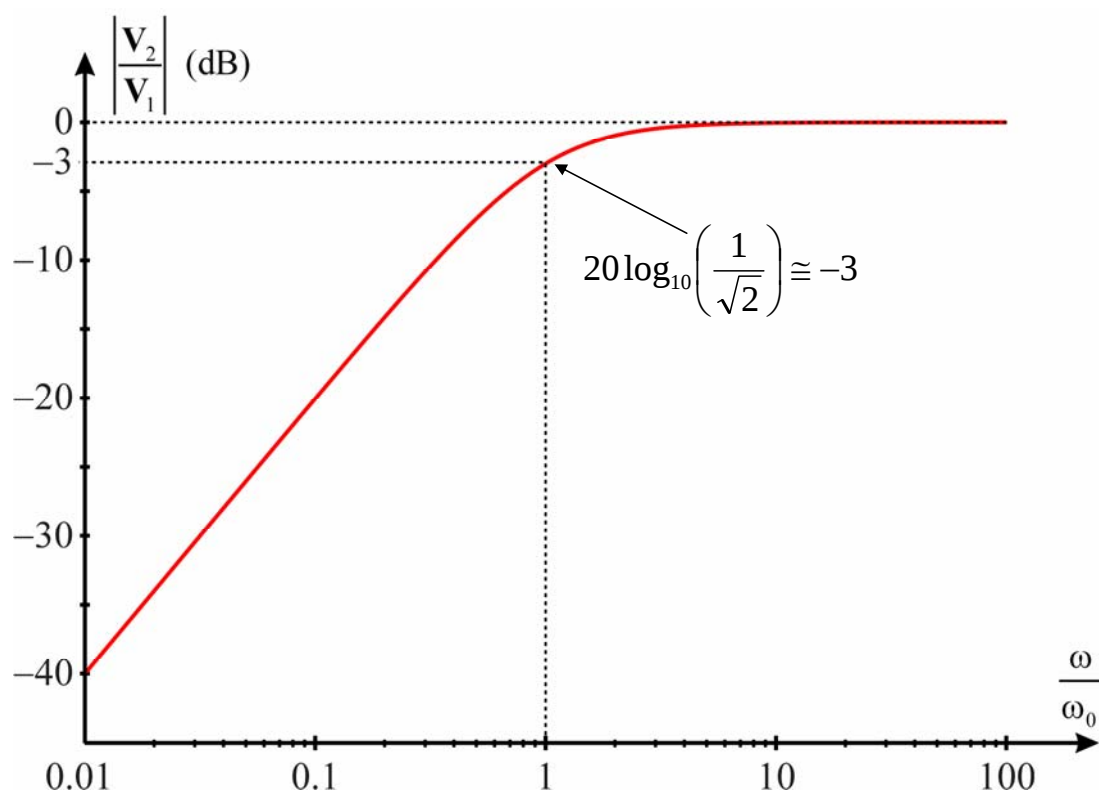


$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| = \frac{R_{in}}{R_{in} + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{R_{in} C}$$

33

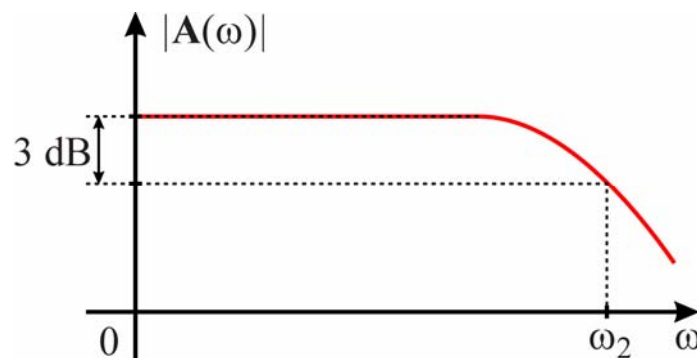
Amplificatori ad accoppiamento capacitivo



34

Amplificatori ad accoppiamento diretto

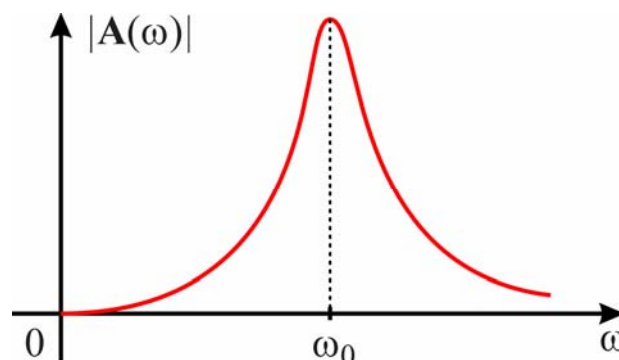
- In alcune applicazioni occorre che il guadagno dell'amplificatore sia costante fino a frequenze molto basse o anche in continua
- In questo caso si utilizzano gli **amplificatori ad accoppiamento diretto** (o **in continua**) in cui gli stadi sono collegati direttamente, senza introdurre condensatori
- Inoltre gli amplificatori integrati di solito sono ad accoppiamento diretto, dato che la tecnologia dei circuiti integrati non consente di realizzare capacità di valore elevato



35

Amplificatori accordati

- In alcune applicazioni (in particolare in sistemi a radiofrequenza) si impiegano amplificatori la cui risposta in frequenza presenta un picco in corrispondenza di un particolare valore ω_0 della pulsazione e decresce molto rapidamente quando ω si allontana da ω_0
- Gli amplificatori di questo tipo sono detti **amplificatori accordati**



36

Altri tipi di amplificatori

- Oltre ai tipi di amplificatori considerati finora (detti anche **amplificatori di segnale**) ne esistono altri che vengono dimensionati seguendo criteri diversi
- In particolare, con i criteri precedentemente indicati per la scelta delle resistenze di ingresso e di uscita
 - ◆ la potenza trasferita dalla sorgente all'amplificatore è molto minore della potenza disponibile della sorgente
 - ◆ la potenza ceduta al carico è molto minore della potenza disponibile all'uscita dell'amplificatore
- ➔ Questa scelta non è ottimale per quanto riguarda il guadagno di potenza
- In genere questo non è un problema per amplificatori che operano a frequenze relativamente basse e con potenze non troppo elevate
 - ◆ Se è richiesto un elevato guadagno di potenza, in genere conviene utilizzare più amplificatori in cascata piuttosto che impiegare reti di adattamento, che comportano costi e ingombri maggiori

37

Altri tipi di amplificatori

- Nel caso degli **amplificatori ad alta frequenza**
 - ◆ I guadagni di potenza ottenibili sono generalmente inferiori (per limiti intrinseci dei dispositivi)
 - ◆ Le reti di adattamento sono meno ingombranti e meno costose
 - ➔ Conviene operare in condizioni di adattamento per ottenere il massimo trasferimento di potenza
- Gli **amplificatori a basso rumore** (**LNA**, *low-noise amplifiers*) sono utilizzati per amplificare segnali molto deboli (come quelli all'uscita di un'antenna ricevente)
 - ◆ Vengono dimensionati in modo da ottenere valori elevati del rapporto tra la potenza del segnale e la potenza del rumore in uscita (**rapporto segnale/rumore**)
 - ➔ Anche in questo caso è necessario ottimizzare il trasferimento di potenza

38

Altri tipi di amplificatori

- Gli **amplificatori di potenza** sono utilizzati quando è necessario fornire potenze elevate al carico
- Vengono dimensionati in modo da ottimizzare il guadagno di potenza, l'efficienza energetica (cioè il rapporto tra la potenza ceduta al carico e la potenza assorbita dall'alimentatore) e la linearità della caratteristica ingresso-uscita
- In questo caso la resistenza di ingresso normalmente è dimensionata in modo da ottenere il massimo trasferimento di potenza
- Dato che in uscita generalmente si hanno valori relativamente elevati della tensione e della corrente, la resistenza di uscita viene dimensionata in modo da ottenere le massime escursioni di tensione e corrente compatibili con le caratteristiche dei dispositivi attivi