



POLITECNICO
DI TORINO

DET

Department of Electronics and Telecommunications

Amplificatori

■ Amplificatori

– *Applicazioni e classificazione*

- Uso degli amplificatori in un sistema elettronico
- Classificazione:
 - Amplificatori di tensione
 - Amplificatori di corrente
 - Amplificatori di transconduttanza
 - Amplificatori di transresistenza
- Resistenza d'ingresso, d'uscita ed effetti di carico
- Amplificazione di Potenza (cenni)



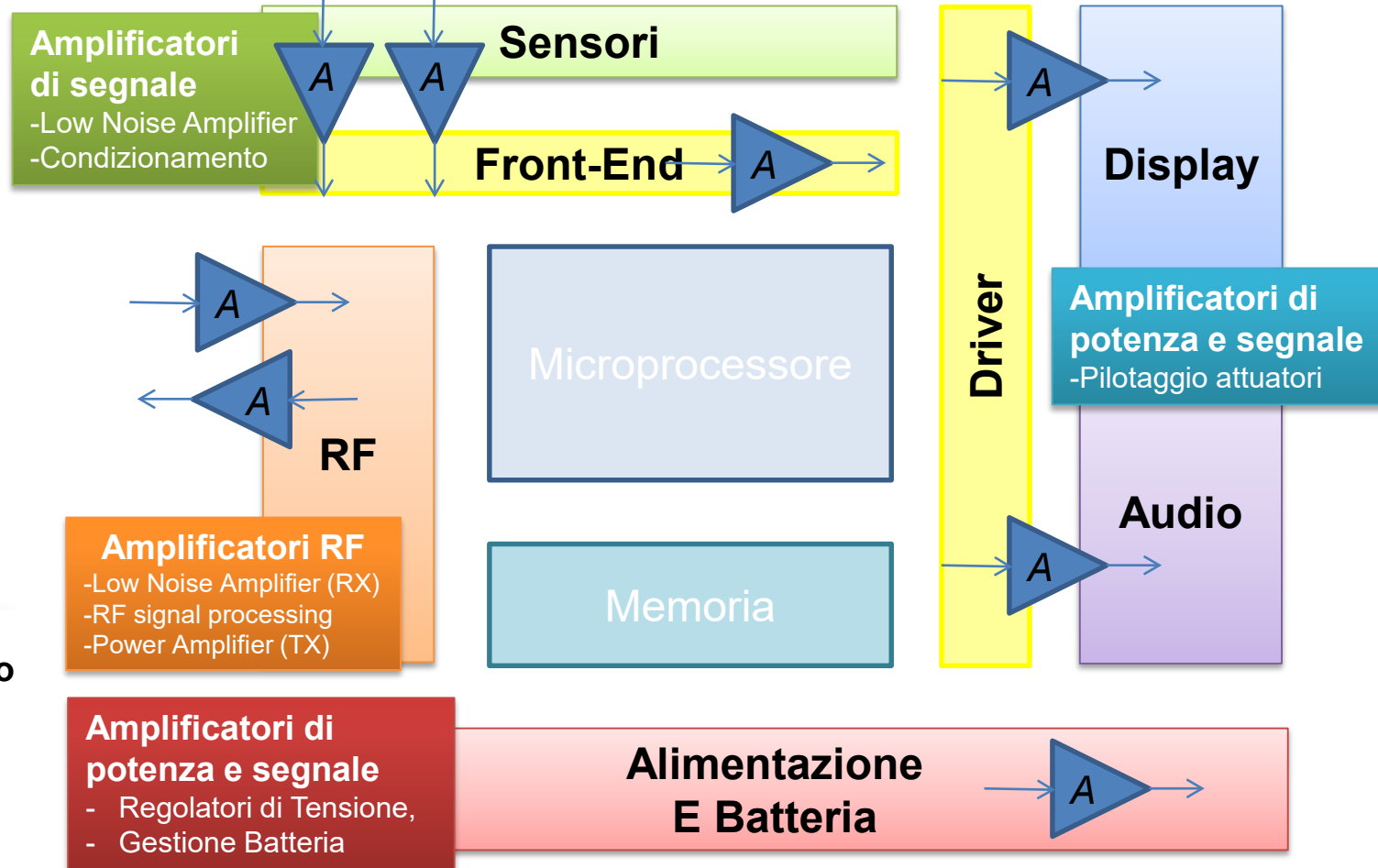
Amplificatori nei Sistemi Elettronici

Schema a blocchi funzionale semplificato

Apple iPhone5



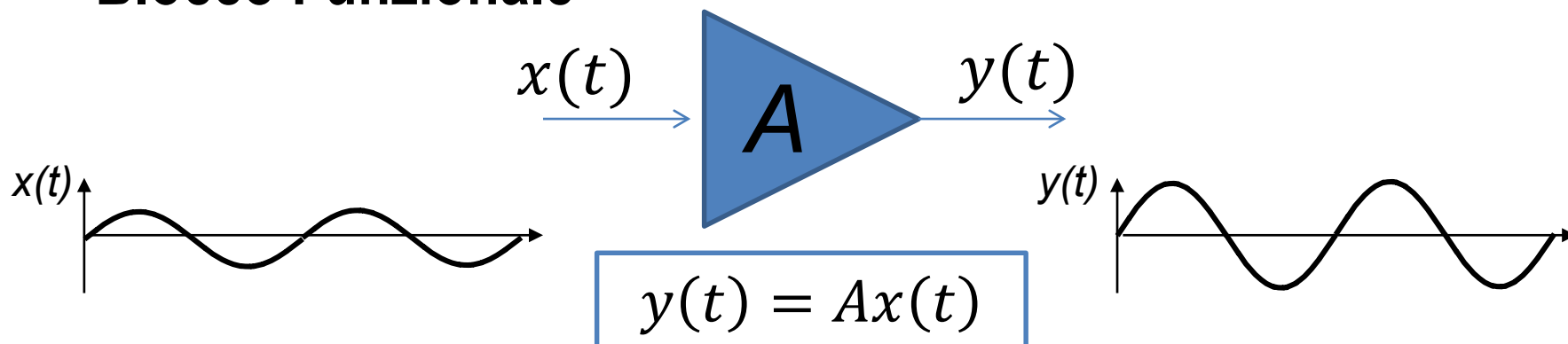
Gli amplificatori sono alla base di tutti i blocchi non digitali!



POLITECNICO
DI TORINO

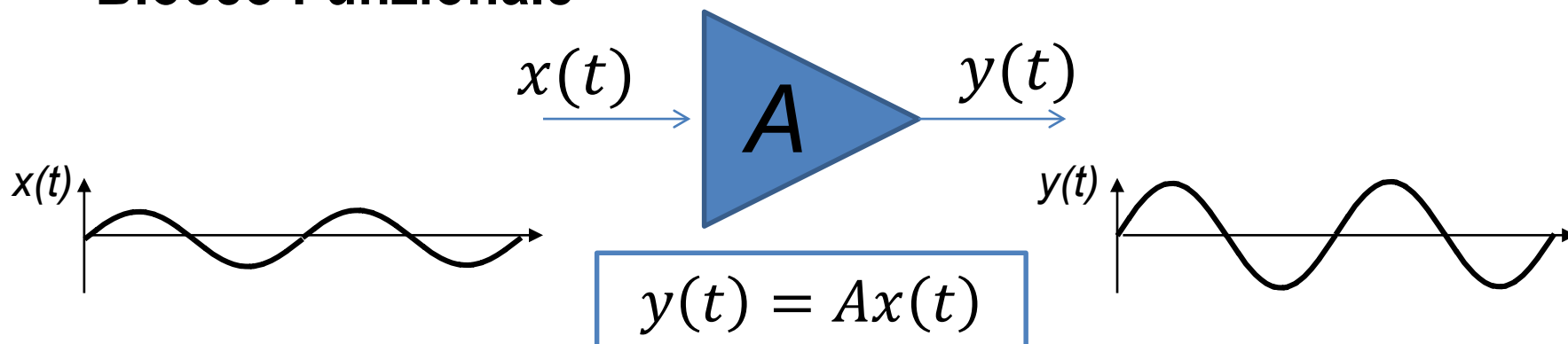
DET
Department of Electronics and Telecommunications

■ Blocco Funzionale

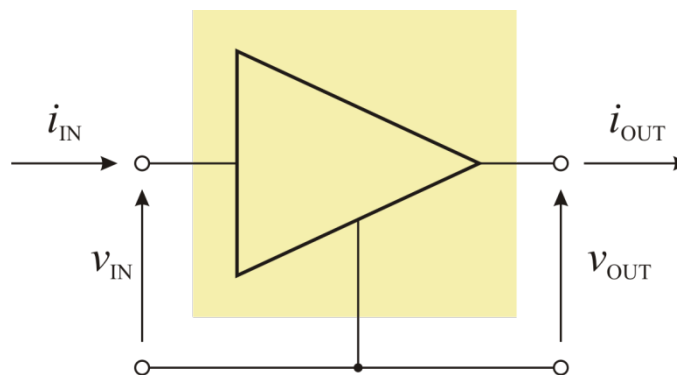


- Funzione: moltiplica il segnale d'ingresso per una costante
- Da un punto di vista applicativo è utilizzato:
 - come **primo elemento di una catena di acquisizione**, per aumentare la dinamica di un segnale e renderlo più immune al rumore degli stadi successivi → **Low noise amplifier (LNA)**
 - **come sotto-blocco funzionale** in funzioni analogiche più complesse.
 - **Per fornire ai segnali la potenza** necessaria per pilotare agli attuatori → **Amplificatori di potenza**.

- **Blocco Funzionale**

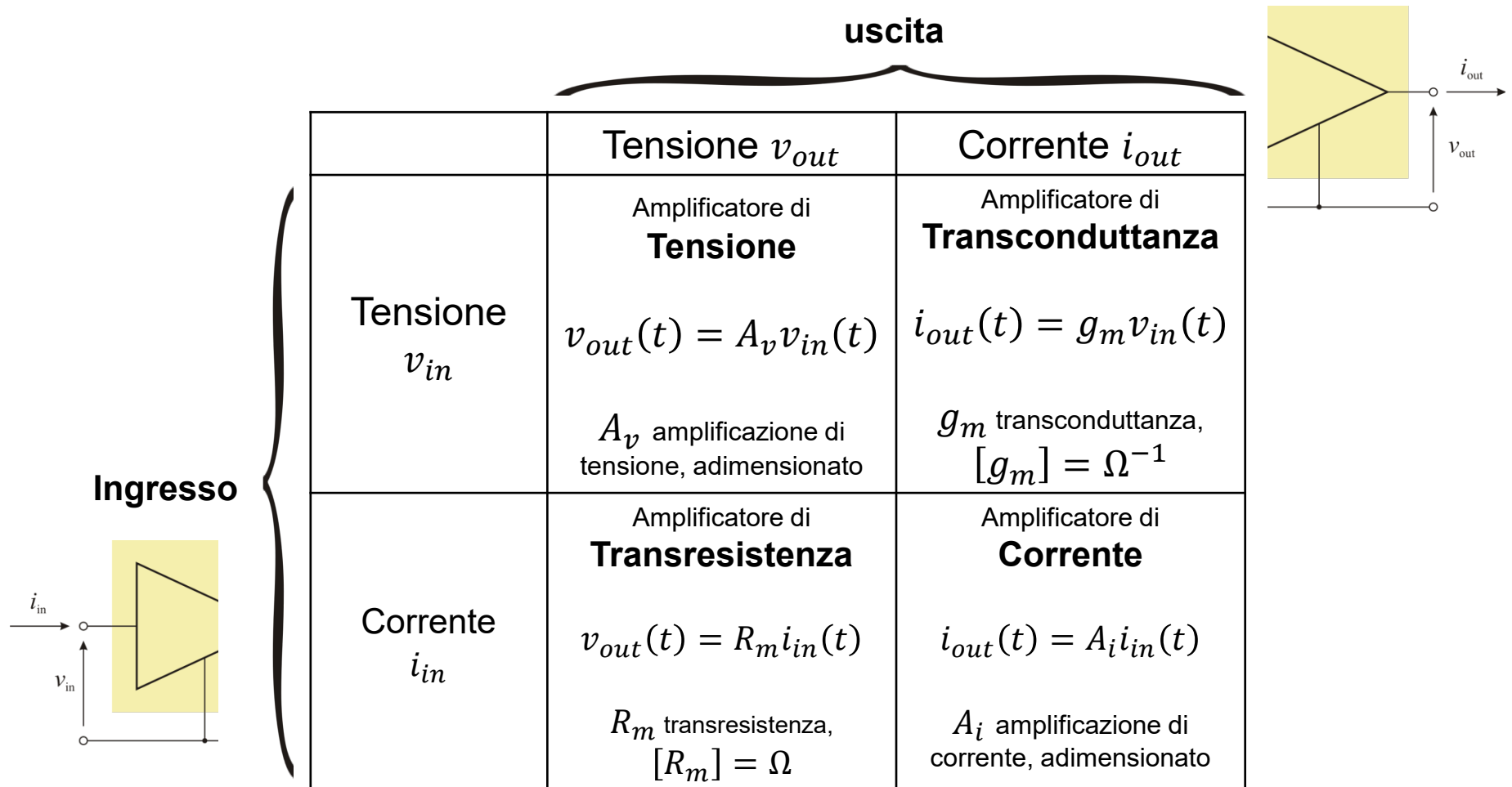


- Funzione: moltiplica il segnale d'ingresso per una costante
- **Elemento Circuitale:** doppio bipolo lineare *unidirezionale*



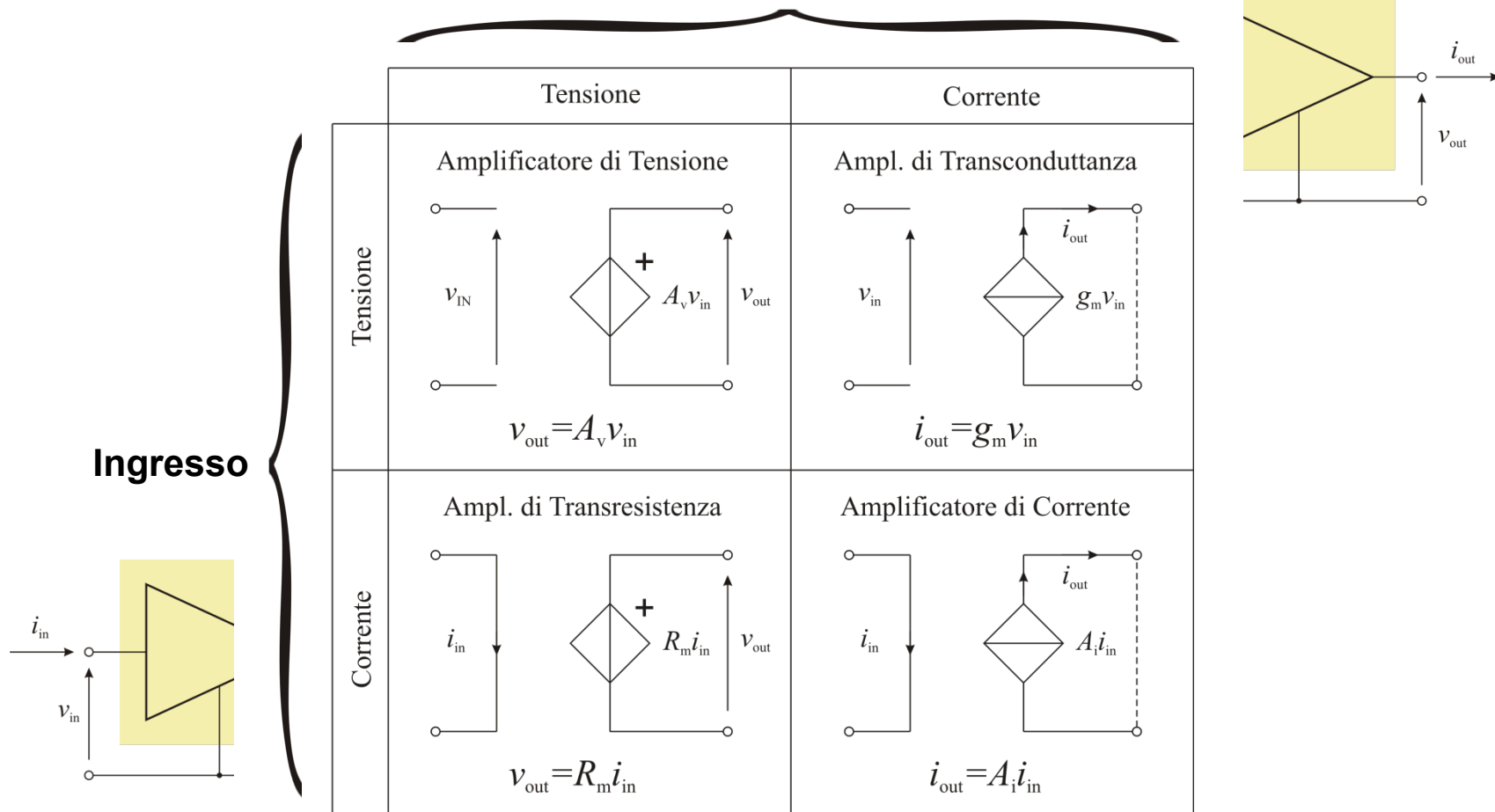
Amplificatori

- Le grandezze in **ingresso** e le grandezze in **uscita** a cui è associata informazione possono essere sia **tensioni**, sia **correnti**. Si hanno quindi **quattro tipi di amplificatore**:



Amplificatori

- Idealmente (!!), i quattro tipi di amplificatore corrispondono ai **generatori controllati lineari**.



Amplificatori

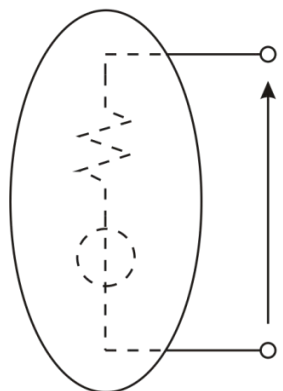
- Per gli amplificatori con **ingresso in tensione**:

- amplificatore di **tensione**
- amplificatore di **transconduttanza**

l'**ingresso** è la tensione (a vuoto) ai capi di un bipolo dato (nel caso lineare: equivalente di Thévenin).

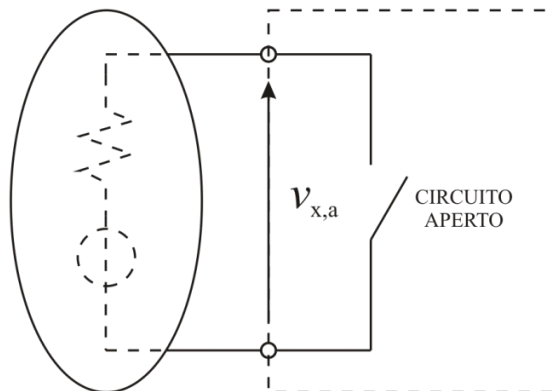
- Ci si aspetta che l'amplificatore **non perturbi la tensione** d'ingresso
- La porta d'ingresso dovrebbe comportarsi come un **circuito aperto**...
- In pratica, però, applicando la tensione d'ingresso, l'amplificatore può assorbire corrente dalla porta d'ingresso... ☹ → caso lineare: la resistenza d'ingresso R_{in} ha un valore *finito* (e non è infinita)

circuito che fornisce
l'ingresso



senza collegare
l'amplificatore

circuito che fornisce
l'ingresso



collegando
l'amplificatore

$$V_{x,a} = V_{x,0}$$

porta d'ingresso
di un Ampl. di Tensione
o di Transconduttanza

Caso
ideale



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Amplificatori

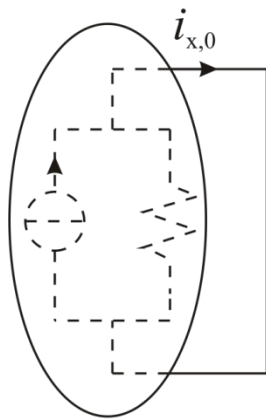
- Per gli amplificatori con **ingresso in corrente**:

- amplificatore di **transresistenza**
- amplificatore di **corrente**

l'**ingresso** è la corrente erogata da un bipolo dato chiuso in corto circuito (nel caso lineare: equivalente Norton).

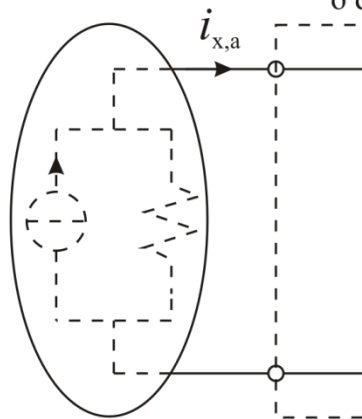
- Ci si aspetta che l'amplificatore **non perturbi la corrente** d'ingresso.
- La porta d'ingresso deve comportarsi come un **corto circuito**...
- In pratica, però, la corrente d'ingresso può dar luogo ad una caduta di tensione alla porta d'ingresso... ☹ →
caso lineare: la resistenza d'ingresso R_{in} ha un valore *non nullo*.

circuito che fornisce
l'ingresso



senza collegare
l'amplificatore

circuito che fornisce
l'ingresso



collegando
l'amplificatore

$$i_{x,a} = i_{x,0}$$

porta d'ingresso
di un Ampl. di Transresistenza
o di Corrente

CORTO
CIRCUITO

Caso
ideale

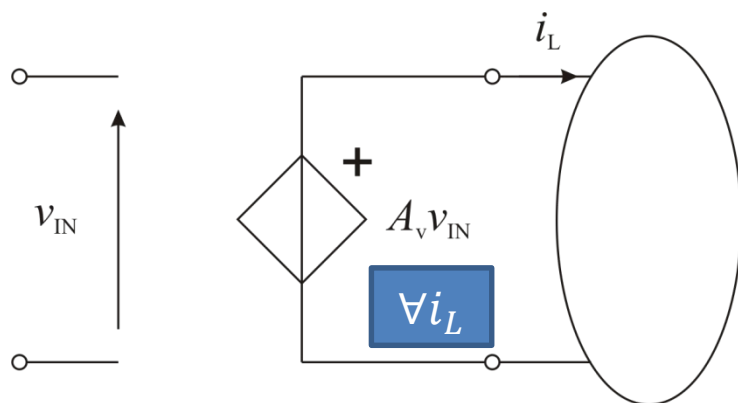


POLITECNICO
DI TORINO

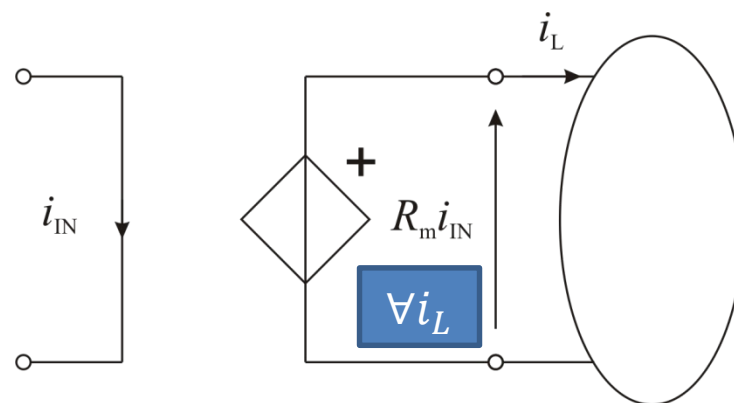
DET
Department of Electronics and Telecommunications

Amplificatori

- Per gli amplificatori con **uscita in tensione**:
 - amplificatore di **tensione**
 - amplificatore di **transresistenza**
- Ci si aspetta che l'amplificatore fissi la tensione d'uscita al valore previsto, indipendentemente dal carico collegato in uscita.
- L'uscita deve comportarsi come un **generatore ideale di tensione**, controllato dall'ingresso ...nella pratica la tensione d'uscita *dipende dalla corrente erogata al carico* ☹ → caso lineare: la resistenza d'uscita R_{out} *non è nulla*.



Caso ideale

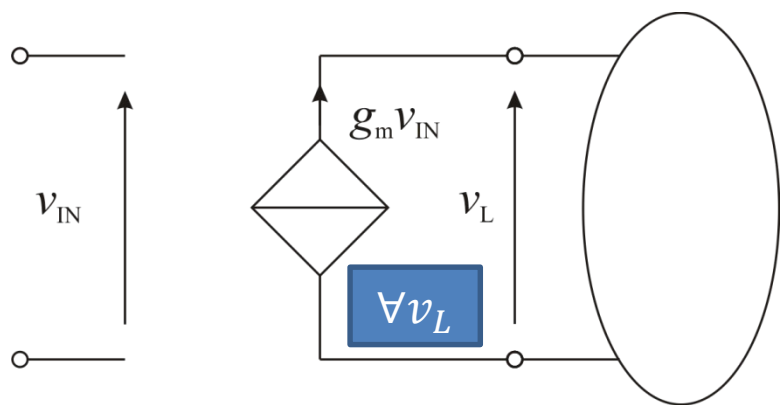


Caso ideale

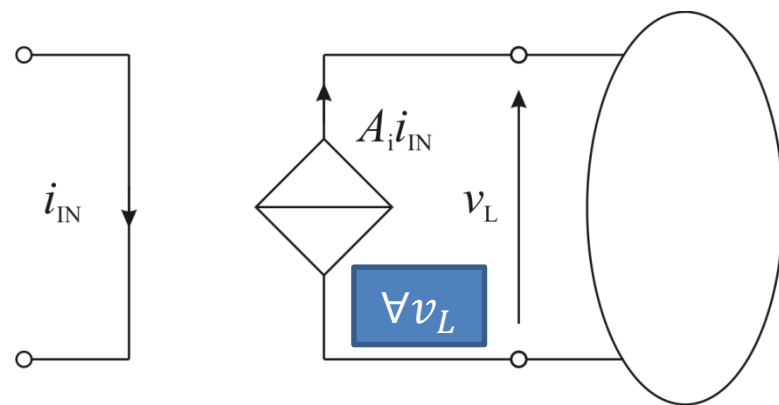


Amplificatori

- Per gli amplificatori con **uscita in corrente**:
 - amplificatore di **transconduttanza**
 - amplificatore di **corrente**
- Ci si aspetta che l'amplificatore fissi la corrente al valore previsto, indipendentemente dal carico collegato in uscita.
- L'uscita deve comportarsi come un **generatore ideale di corrente**, controllato dall'ingresso ...in pratica la corrente *dipende anche dalla tensione sul carico* ☹ → caso lineare: la resistenza d'uscita R_{out} ha un valore *finito* (e non è infinita)



Caso ideale



Caso ideale



Amplificatori: Resistenze d'ingresso e d'uscita

- A differenza del caso ideale, gli amplificatori **reali** (!!)
- sono tipicamente caratterizzati in termini di R_{in} , R_{out} e amplificazione (A_v , g_m , R_m o A_i)

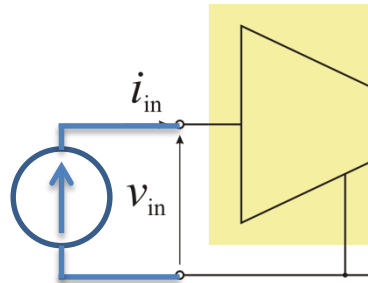
Uscita

Uscita

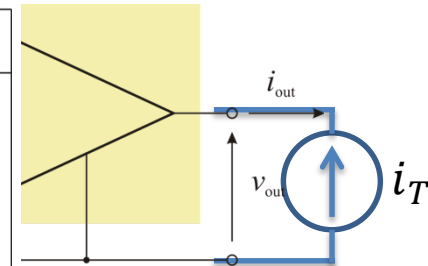
i_T : corrente di test applicata all'ingresso

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_T}$$

Ingresso



	Tensione	Corrente
Tensione	<p>Amplificatore di Tensione</p> <p>$v_{out} = A_v v_{in}$</p>	<p>Ampl. di Transconduttanza</p> <p>$i_{out} = g_m v_{in}$</p>
Corrente	<p>Ampl. di Transresistenza</p> <p>$v_{out} = R_m i_{in}$</p>	<p>Amplificatore di Corrente</p> <p>$i_{out} = A_i i_{in}$</p>



$$R_{out} = \frac{v_{out}}{i_T}$$

i_T : corrente di test applicata all'uscita
(**dopo aver spento i generatori indipendenti**)

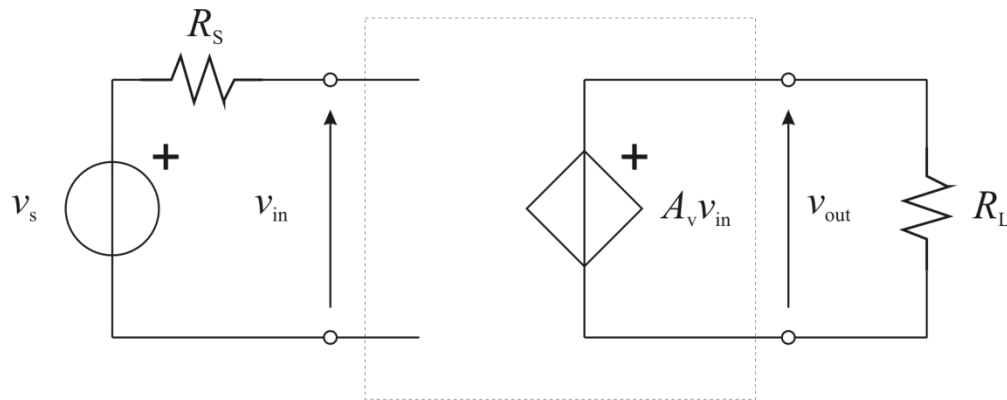


POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Amplificatore di Tensione: Effetto di Carico

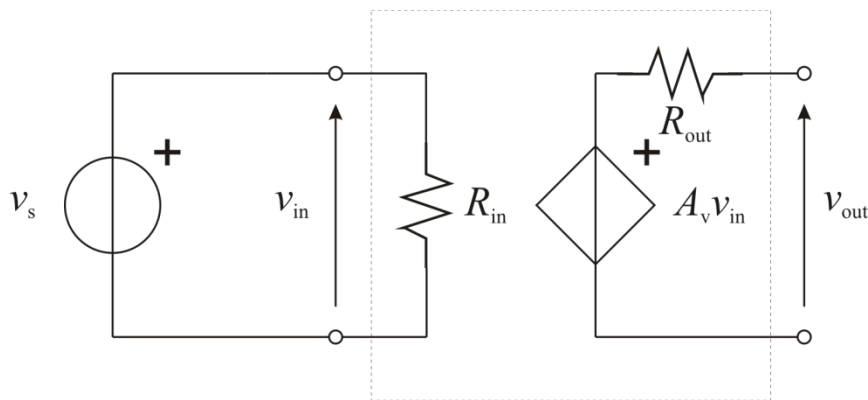
- Consideriamo un **Amplificatore di Tensione**,
 - l'ingresso è fornito da un generatore di tensione v_s resistenza interna R_S
 - l'uscita pilota un carico R_L



Amplificatore di tensione Ideale

$$v_{out} = A_v v_s \\ \forall R_S, \forall R_L$$

Il segnale è moltiplicato per A_v , indipendentemente dalla resistenza interna del generatore e dal carico



Amplificatore di tensione con R_{in} , R_{out} finite e non nulle

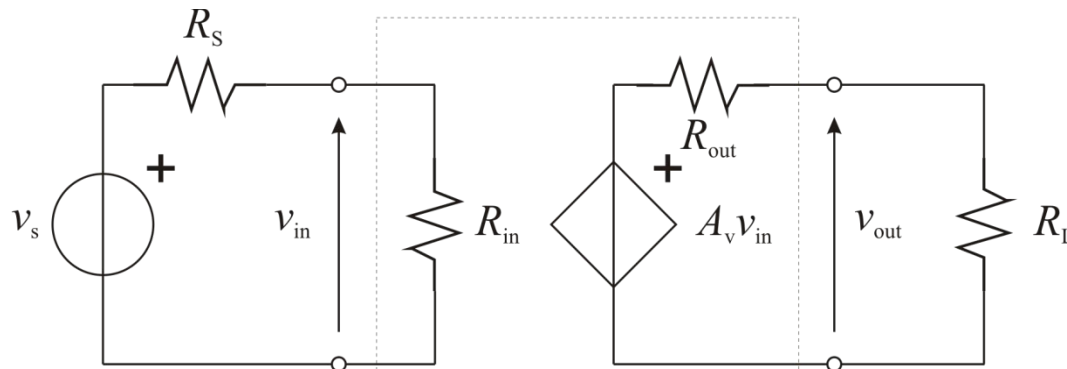
$$v_{out} = A_v v_s \\ \text{solo per } R_S = 0, R_L \rightarrow \infty$$

Se il generatore di segnale fosse ideale e l'uscita fosse a vuoto, la relazione ingresso-uscita sarebbe analoga al caso ideale, ma se così non è...



Amplificatore di Tensione: Effetto di Carico

- Consideriamo un **Amplificatore di Tensione**:
 - l'ingresso è fornito da un generatore di tensione v_s resistenza interna R_s
 - l'uscita pilota un carico R_L



Amplificatore di Tensione con R_{in} , R_{out} finite e non nulle

$$R_s \neq 0, G_L \neq 0$$

la relazione ingresso-uscita dipende dalla resistenza interna del **generatore di segnale** R_s e dal **carico** R_L che danno luogo a due fattori di partizione.

Tende al caso ideale se:

$$R_{in} \rightarrow \infty$$

$$R_{out} \rightarrow 0$$

$$v_{out} = \underbrace{\frac{R_{in}}{R_{in} + R_s}}_{\text{Effetto di Carico sull'ingresso}} \underbrace{\frac{R_L}{R_L + R_{out}}}_{\text{Effetto di Carico sull'uscita}} \underbrace{A_v v_s}_{\text{Termine atteso}}$$

Effetto di Carico sull'ingresso
tende a 1
se $R_s \ll R_{in}$

Effetto di Carico sull'uscita
tende a 1
se $R_{out} \ll R_L$

Termine atteso

Per evitare **effetto di carico in ingresso** si deve avere $R_s \ll R_{in}$
(si evita del tutto se $R_{in} \rightarrow \infty$ o $R_s \rightarrow 0$)

Per evitare **effetto di carico in uscita** si deve avere $R_{out} \ll R_L$
(si evita del tutto se $R_{out} \rightarrow 0$ o $R_L \rightarrow \infty$)

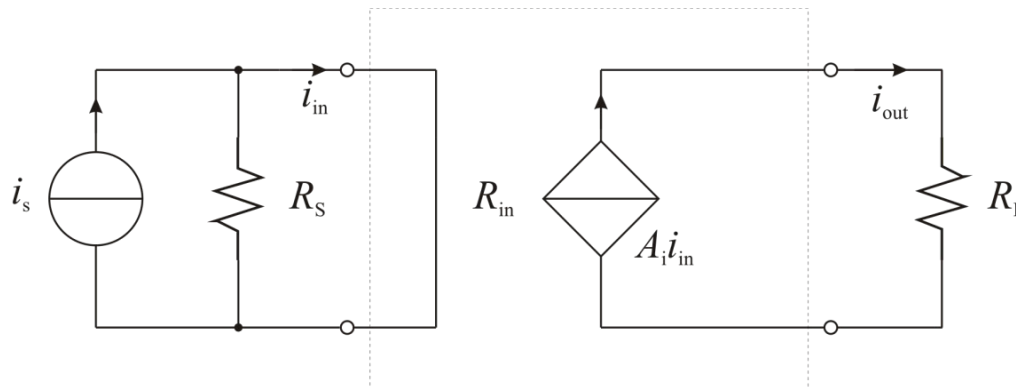


POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Amplificatore di Corrente: Effetto di Carico

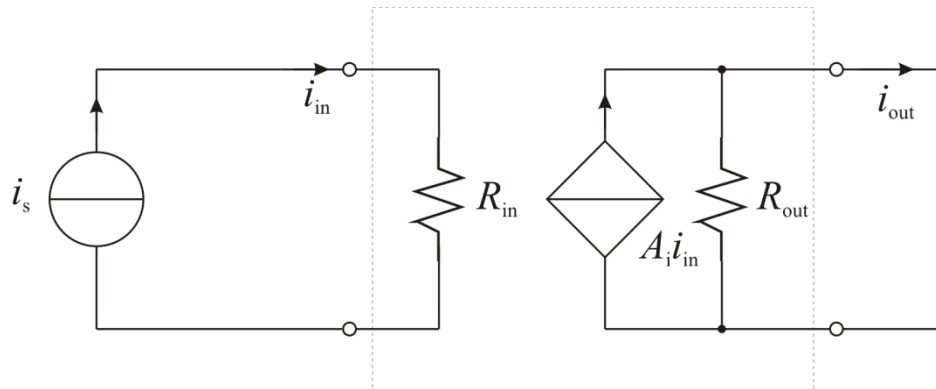
- Consideriamo un **Amplificatore di Corrente**,
 - l'ingresso è fornito da un generatore di corrente i_s con resistenza interna R_S
 - l'uscita pilota un carico R_L



**Amplificatore
di Corrente Ideale**

$$i_{out} = A_i i_{in} \\ \forall R_S, \forall R_L$$

Il segnale è amplificato di A_i , indipendentemente dalla resistenza interna del generatore e dal carico



**Amplificatore con R_{in} , R_{out}
finite e non nulle**

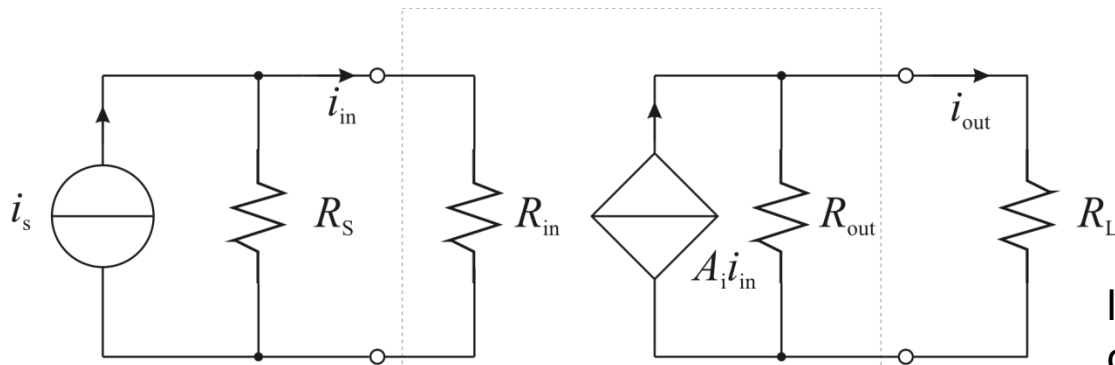
$$i_{out} = A_i i_{in} \\ \text{solo per } R_S \rightarrow \infty, R_L = 0$$

Se il generatore di segnale fosse ideale e se l'uscita fosse in corto circuito, la relazione ingresso-uscita sarebbe analoga al caso ideale, ma se così non è...



Amplificatore di Corrente: Effetto di Carico

- Consideriamo un **Amplificatore di Corrente**:
 - l'ingresso è fornito da un generatore di corrente i_s resistenza interna R_S
 - l'uscita pilota un carico R_L



Amplificatore di corrente con R_{in} , R_{out} finite e non nulle

$$G_S \neq 0, R_L \neq 0$$

la relazione ingresso-uscita dipende dalla resistenza interna del **generatore di segnale** R_S e dal **carico** R_L che danno luogo a due fattori di partizione.

Tende al caso ideale per:

$$R_{in} \rightarrow 0$$

$$R_{out} \rightarrow \infty$$

$$i_{out} = \underbrace{\frac{R_S}{R_{in} + R_S}}_{\text{Effetto di Carico sull'ingresso}} \underbrace{\frac{R_{out}}{R_L + R_{out}}}_{\text{Effetto di Carico sull'uscita}} \underbrace{A_i i_s}_{\text{Termine atteso}}$$

Effetto di Carico sull'ingresso
tende a 1
se $R_S \gg R_{in}$

Effetto di Carico sull'uscita
tende a 1
se $R_{out} \gg R_L$

Termine atteso

Per evitare **effetto di carico in ingresso** si deve avere $R_S \gg R_{in}$
(si evita del tutto se $R_{in} \rightarrow 0$ o $R_S \rightarrow \infty$)

Per evitare **effetto di carico in uscita** si deve avere $R_{out} \gg R_L$
(si evita del tutto se $R_{out} \rightarrow \infty$ o $R_L = 0$)

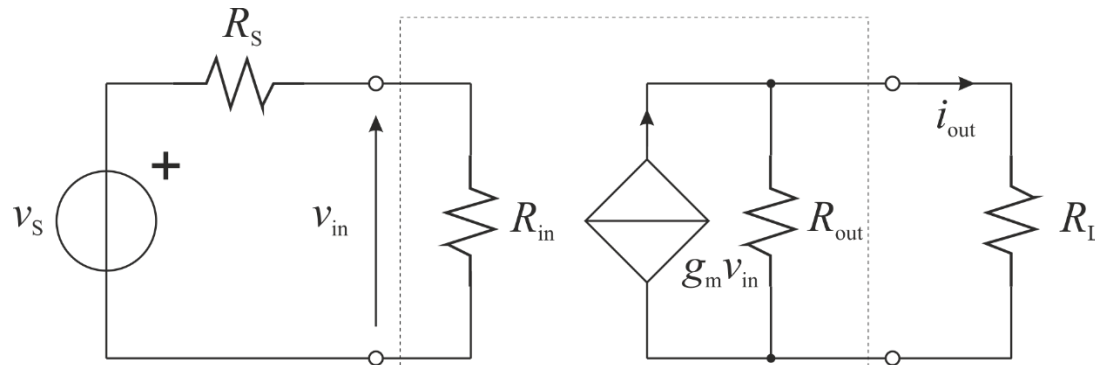


POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Amplificatore di Transconduttanza: Effetto di Carico

- Consideriamo un **Amplificatore di Transconduttanza**:
 - l'ingresso è fornito da un generatore di tensione v_s con esistenza interna R_s
 - l'uscita pilota un carico R_L



Amplificatore di transconduttanza con R_{in} , R_{out} finite e non nulle

$$R_s \neq 0, R_L \neq 0$$

la relazione ingresso-uscita dipende dalla resistenza interna del generatore di segnale R_s e dal carico R_L che danno luogo a due fattori di partizione.

Tende al caso ideale se:

$$R_{in} \rightarrow \infty$$

$$R_{out} \rightarrow \infty$$

$$i_{out} = \underbrace{\frac{R_{in}}{R_{in} + R_s}}_{\text{Effetto di Carico sull'ingresso}} \underbrace{\frac{R_{out}}{R_L + R_{out}}}_{\text{Effetto di Carico sull'uscita}} \underbrace{g_m v_s}_{\text{Termine atteso}}$$

Effetto di Carico sull'ingresso

tende a 1

se $R_s \ll R_{in}$

Effetto di Carico sull'uscita

tende a 1

se $R_{out} \gg R_L$

Termine atteso

Per evitare **effetto di carico in ingresso** si deve avere $R_s \ll R_{in}$
(si evita del tutto se $R_{in} \rightarrow \infty$ o $R_s = 0$)

Per evitare **effetto di carico in uscita** si deve avere $R_{out} \gg R_L$
(si evita del tutto se $R_{out} \rightarrow \infty$ o $R_L = 0$)

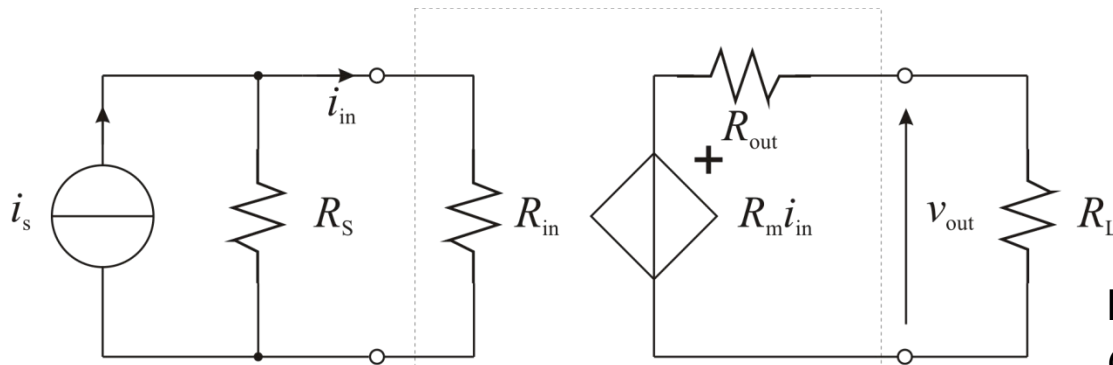


POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Amplificatore di Transresistenza: Effetto di Carico

- Consideriamo un **Amplificatore di Transresistenza**:
 - l'ingresso è fornito da un generatore di corrente i_s resistenza interna R_S
 - l'uscita pilota un carico R_L



Amplificatore di transresistenza con R_{in} , R_{out} finite e non nulle

$$G_S \neq 0, G_L \neq 0$$

la relazione ingresso-uscita dipende dalla resistenza interna del generatore di segnale R_S e dal carico R_L che danno luogo a due fattori di partizione.

Tende al caso ideale se:

$$R_{in} \rightarrow 0$$

$$R_{out} \rightarrow 0$$

$$v_{out} = \underbrace{\frac{R_S}{R_{in} + R_S}}_{\text{Effetto di Carico sull'ingresso}} \underbrace{\frac{R_L}{R_L + R_{out}}}_{\text{Effetto di Carico sull'uscita}} \underbrace{R_m i_s}_{\text{Termine atteso}}$$

Effetto di Carico sull'ingresso

tende a 1

se $R_S \gg R_{in}$

Effetto di Carico sull'uscita

tende a 1

se $R_{out} \ll R_L$

Termine atteso

Per evitare **effetto di carico in ingresso** si deve avere $R_S \gg R_{in}$
(si evita del tutto se $R_{in} = 0$ o $R_S \rightarrow \infty$)

Per evitare **effetto di carico in uscita** si deve avere $R_{out} \ll R_L$
(si evita del tutto se $R_{out} = 0$ o $R_L \rightarrow \infty$)

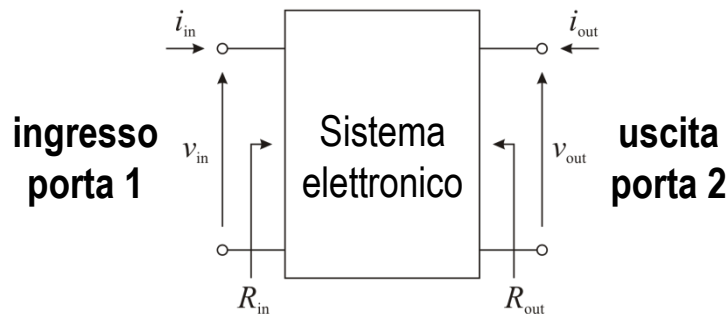


POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

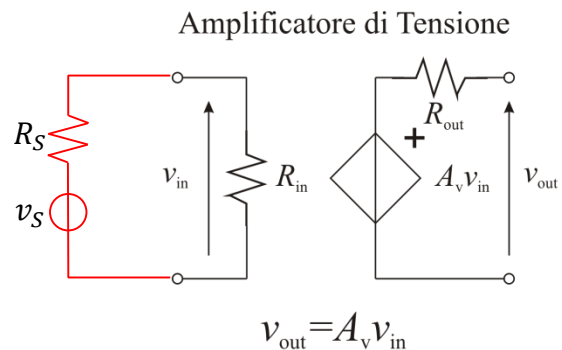
Rappresentazioni e loro connessioni

- Un sistema elettronico a 2 porte (doppio bipolo) può comportarsi da amplificatore reale se **non presenta reazione tra l'uscita (porta 2) e l'ingresso (porta 1)**
- Utilizzando le rappresentazioni matriciali **R , G , H , e H'** dei doppi bipoli



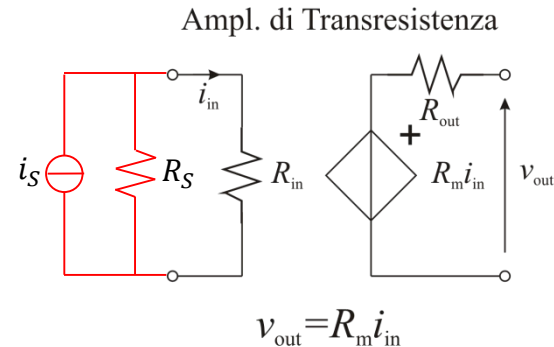
$$\begin{aligned} h'_{12} &= 0 \\ h_{12} &= 0 \\ r_{12} &= 0 \\ g_{12} &= 0 \end{aligned}$$

- Lo stesso sistema può ammettere più di una *rappresentazione*



$$\begin{aligned} i_S &= \frac{v_S}{R_S} \\ R_m &= A_v R_{in} \end{aligned}$$

⇒

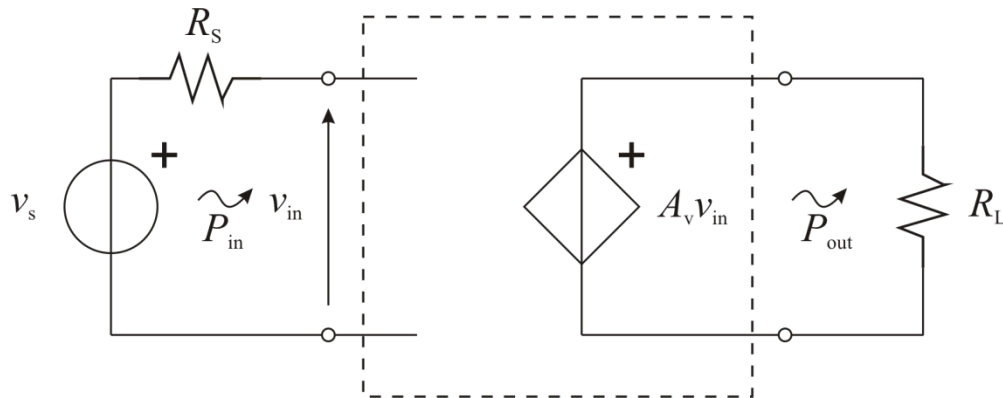


- E' possibile passare da una rappresentazione ad un'altra, ma di solito lo stadio funziona in maniera ottima solo in una di quelle possibili



Amplificazione di Potenza e considerazioni energetiche

- Consideriamo un **Amplificatore di Tensione ideale**



- Potenza assorbita alla porta d'ingresso:

$$P_{in} = v_{in} i_{in} = 0$$

- Potenza erogata alla porta d'uscita:

$$P_{out} = \frac{A_v^2 v_{in}^2}{R_L}$$

nota: $P_{out} \rightarrow \infty$ per $R_L \rightarrow 0$, $A_v \neq 0$
anche se $A_v < 1$!

- Amplificazione di potenza:

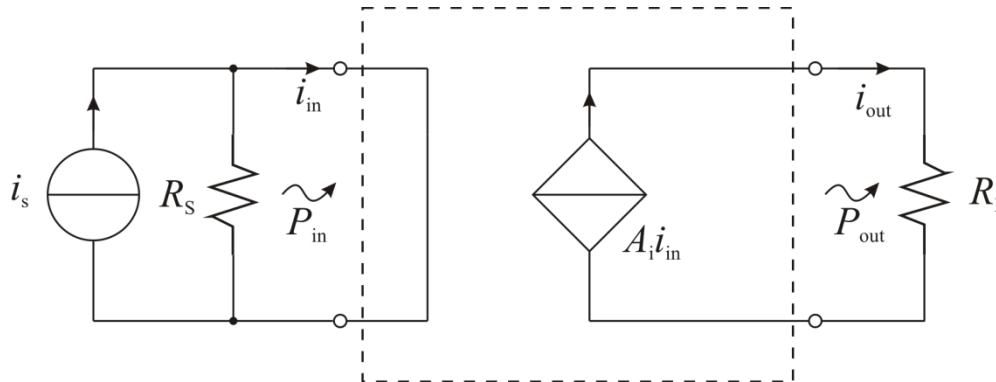
$$A_P = \frac{P_{out}}{P_{in}} \rightarrow \infty \quad \forall A_v \neq 0, \forall R_L \neq 0$$

L'amplificatore genera potenza dal nulla?!



Amplificazione di Potenza e considerazioni energetiche

- Consideriamo un **Amplificatore di Corrente ideale**



- Potenza assorbita alla porta d'ingresso:

$$P_{in} = v_{in} i_{in} = 0$$

- Potenza erogata alla porta d'uscita:

$$P_{out} = A_i^2 i_{in}^2 R_L$$

nota: $P_{out} \rightarrow \infty$ per $R_L \rightarrow \infty$, $A_i \neq 0$
anche se $A_i < 1$!!

- Amplificazione di potenza:

$$A_P = \frac{P_{out}}{P_{in}} \rightarrow \infty \quad \forall A_i \neq 0, \forall R_L \neq 0$$

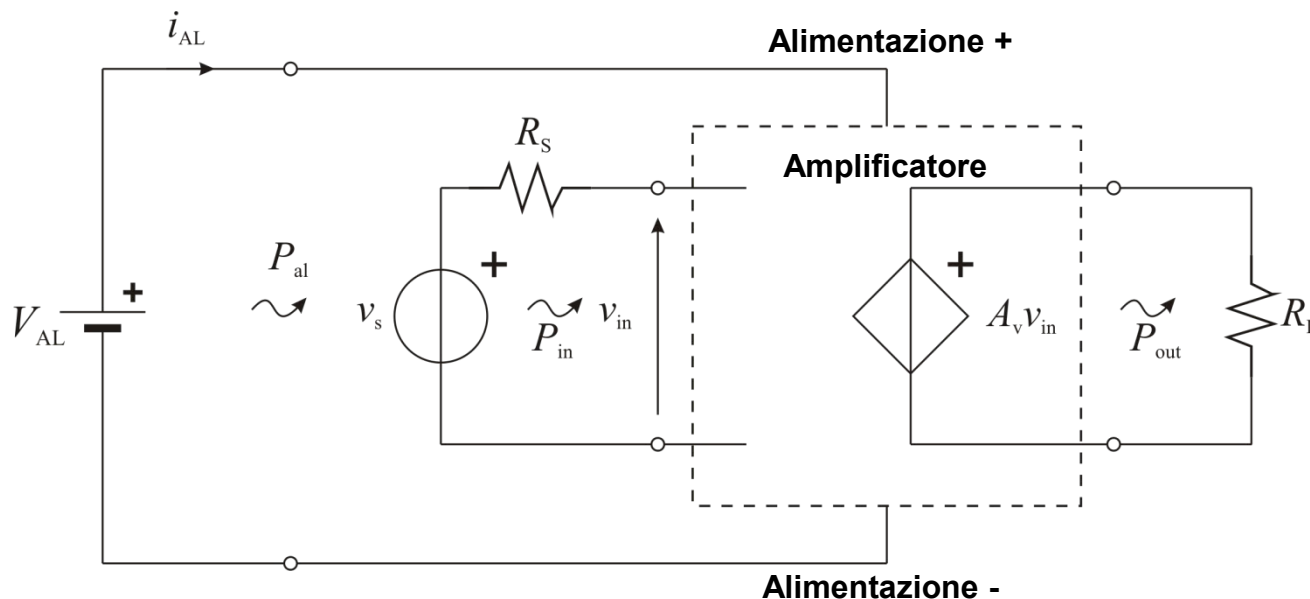
L'amplificatore genera potenza dal nulla?!

...analoghe considerazioni valgono per gli amplificatori di transconduttanza e transresistenza



Amplificazione di Potenza e considerazioni energetiche

- ~~L'amplificatore genera potenza dal nulla?!~~ Certamente NO...

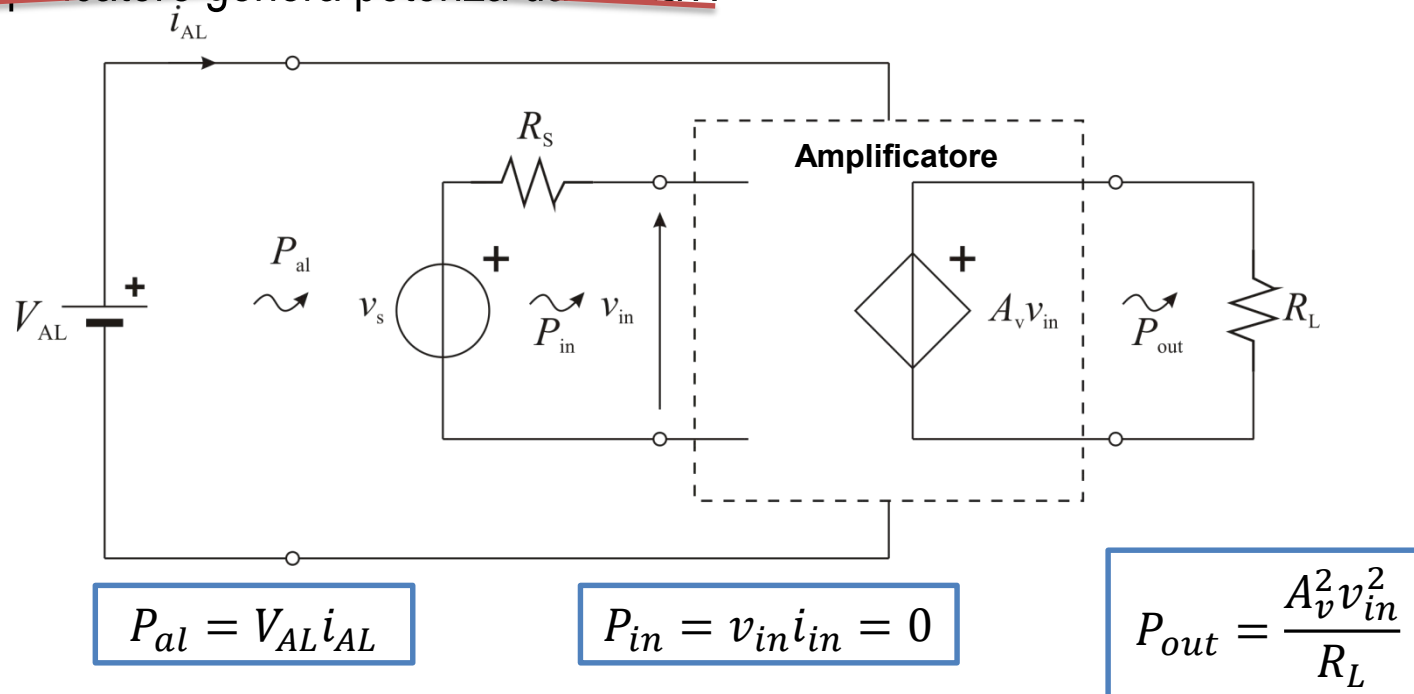


- La *potenza* fornita all'uscita *proviene dall'alimentazione* (è **sempre** presente: ad es. per polarizzare i transistori, anche se non indicata nei circuiti per il piccolo segnale).
- L'*informazione* associata al segnale d'uscita *proviene dall'ingresso*.
- Si può dire che l'amplificatore genera **potenza di segnale** a partire dall'alimentazione.



Amplificazione di Potenza e considerazioni energetiche

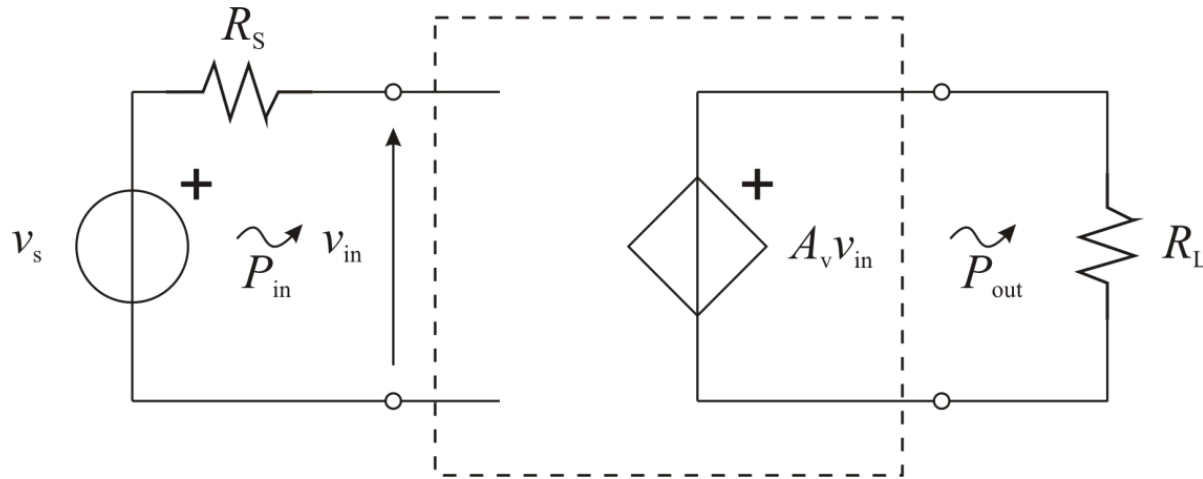
- ~~L'amplificatore genera potenza dal nulla?!~~



- L'amplificatore è **globalmente passivo**: $P_{out} < P_{al} + P_{in}$
- **Efficienza Energetica**: $\eta = \frac{P_{out}}{P_{al} + P_{in}} \simeq \frac{P_{out}}{P_{al}}$
- Spesso molto bassa ($\eta < 20\%$) negli amplificatori di segnale, ma se P_{out} è piccola, non è grave.
- Negli amplificatori di potenza (P_{out} significativa) è invece fondamentale avere η elevata.



Amplificatori: Amplificazione di Potenza



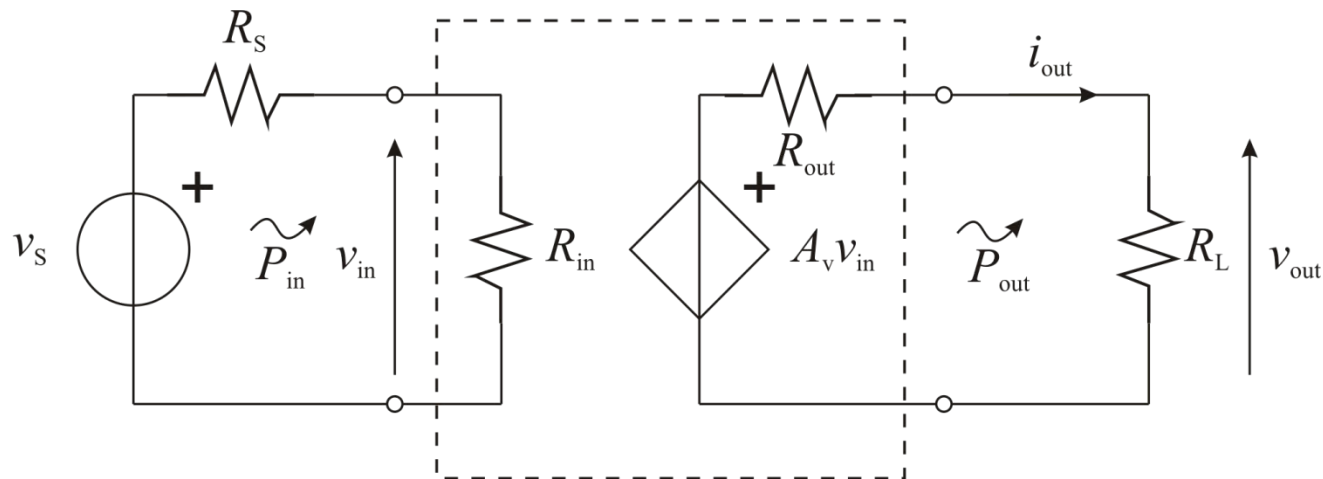
- Negli amplificatori con ingresso simile ad un corto circuito o a un circuito aperto, l'amplificazione di potenza

$$A_P = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

è infinita (o comunque elevatissima) perché $P_{in} \simeq 0$. Ma in questi casi interessa poco...



Amplificatori: Amplificazione di Potenza



- Se R_{in} e R_{out} assumono valori finiti non nulli

$$P_{in} = v_{in} i_{in} = \frac{v_{in}^2}{R_{in}} \quad P_{out} = v_{out} i_{out} = \frac{R_L A_v^2 v_{in}^2}{(R_{out} + R_L)^2}$$

$$A_P = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{R_L R_{in}}{(R_{out} + R_L)^2} A_v^2$$

- P_{out} ha un massimo $\left(\frac{\partial P_{out}}{\partial R_L} = 0 \right)$ per $R_L = R_{out}$, spesso imposti pari a 50Ω



- **Limitazioni degli amplificatori reali**
 - Limitazione di Banda
 - Analisi nel dominio della frequenza e diagrammi di Bode
 - Limitazione di Dinamica
 - Dinamica d'ingresso (tensione e corrente)
 - Dinamica d'uscita (tensione e corrente)
 - Limitazione di *Slew Rate*
 - Rumore
 - Offset e tolleranze di fabbricazione
 - Distorsione non-lineare



Limitazione di Banda

- Negli amplificatori reali sono presenti elementi reattivi:
 - Condensatori di accoppiamento (introdotti intenzionalmente)
 - Filtri passivi
 - Capacità parassite dei transistori e/o degli elementi resistivi
 - Induttanze parassite legate alle interconnessioni
- Il comportamento degli amplificatori reali dipende dalla frequenza dei segnali applicati.
- In linearità (piccolo segnale) i parametri di un amplificatore sono funzioni della frequenza (**funzioni di trasferimento**)

$A_v \rightarrow A_v(\omega)$ ampl. di tensione

$R_{in} \rightarrow Z_{in}(\omega)$ impedenza d'ingresso

$A_i \rightarrow A_i(\omega)$ ampl. di corrente

$R_{out} \rightarrow Z_{out}(\omega)$ impedenza d'uscita

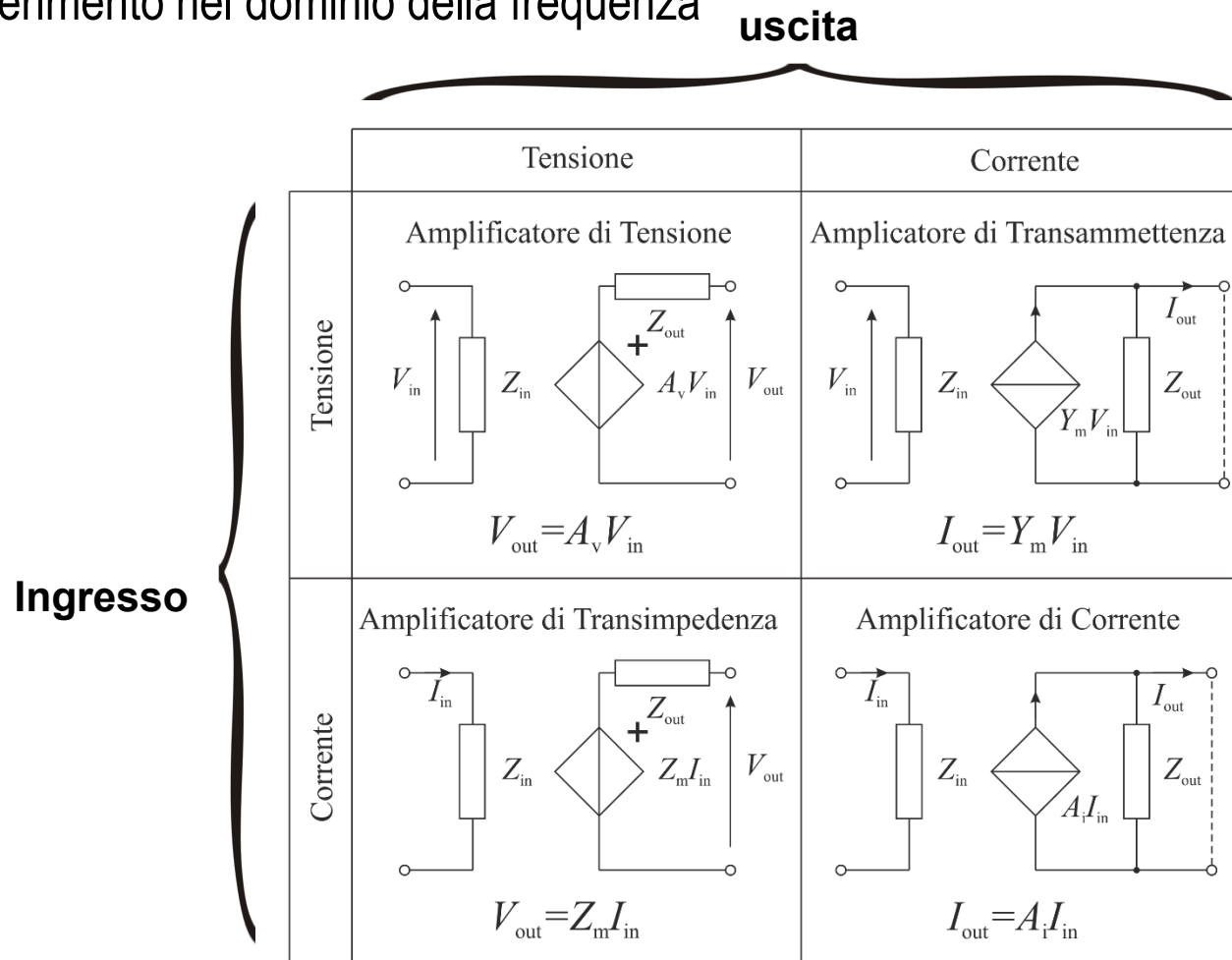
$g_m \rightarrow Y_m(\omega)$ transammettenza

$R_m \rightarrow Z_m(\omega)$ transimpedenza



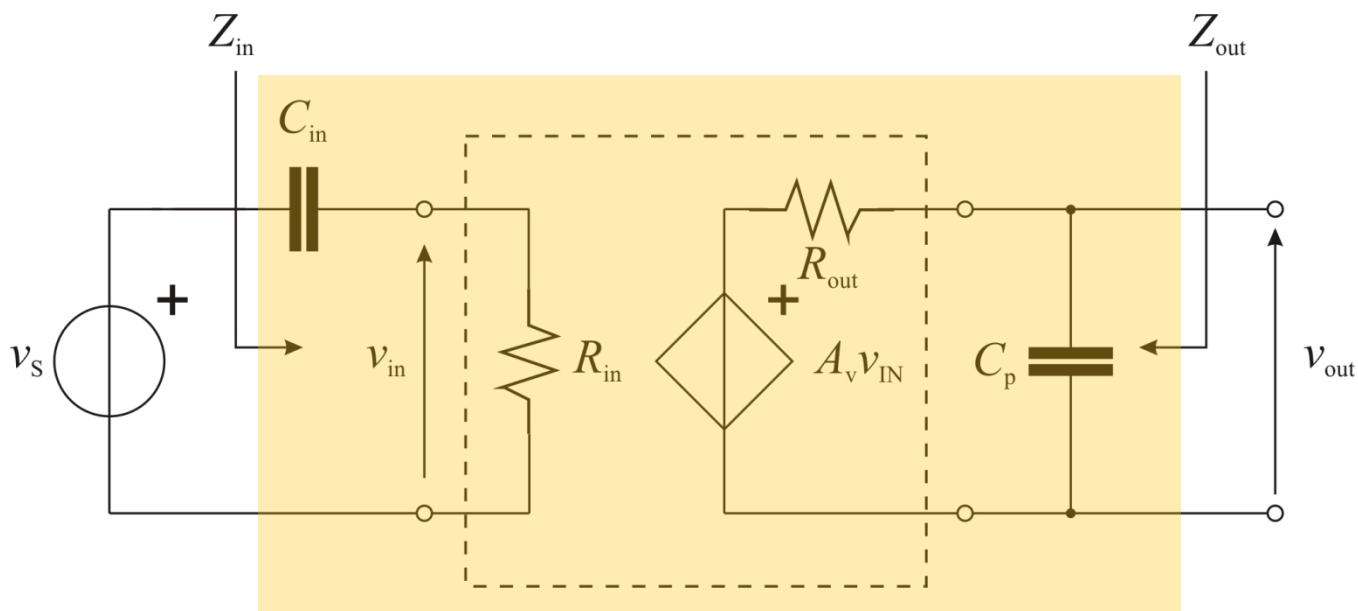
Amplificatori: Parametri nel dominio della frequenza

- In linearità (piccolo segnale) i parametri di un amplificatore sono funzioni di trasferimento nel dominio della frequenza



Risposta in Frequenza: Esercizio (I)

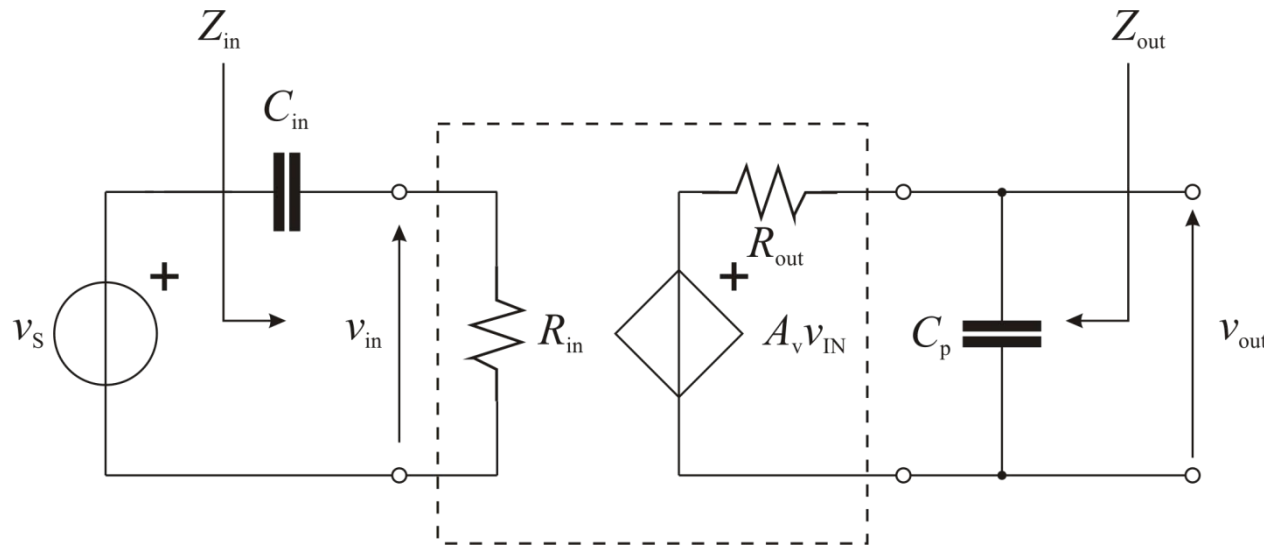
- E' dato un amplificatore di tensione, con amplificazione di tensione $A_{v0} = 10$, resistenza d'ingresso $R_{in} = 100k\Omega$, resistenza di uscita di $R_{out} = 10k\Omega$. L'amplificatore è accoppiato in AC al generatore di segnale con un condensatore $C_{in} = 1\mu F$ e presenta una capacità parassita in parallelo all'uscita $C_p = 100pF$ che descrive tutti gli effetti dinamici nei dispositivi attivi e nelle interconnessioni.
- Determinare $A_v(s)$, $Z_{in}(s)$ e $Z_{out}(s)$ e tracciarne i diagrammi di Bode in modulo e fase.



Amplificatore non ideale con impedenza di ingresso e uscita reattiva



Risposta in Frequenza: Esercizio (II)



$$A_{v0} = 10$$

$$R_{in} = 100k\Omega, R_{out} = 10k\Omega$$

$$C_{in} = 1\mu F, C_p = 100pF$$

$$s_{p1} = -\frac{1}{R_{in}C_{in}} = -10 \text{ rad/s}$$

$$s_{p2} = -\frac{1}{R_{out}C_p} = -10^6 \text{ rad/s}$$

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi R_{in}C_{in}} = 1.59 \text{ Hz}$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi R_{out}C_p} = 159 \text{ kHz}$$

$$A_v(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_s(s)} = \frac{R_{in}}{R_{in} + \frac{1}{sC_{in}}} A_{v0} \frac{\frac{1}{sC_p}}{\frac{1}{sC_p} + R_{out}}$$

$$= \underbrace{\frac{sR_{in}C_{in}}{1 + sR_{in}C_{in}}}_{\text{Fattore passa-alto}} \underbrace{\frac{1}{1 + sR_{out}C_p}}_{\text{Fattore passa-basso}} A_{v0} = \frac{-\frac{s}{s_{p1}}}{1 - \frac{s}{s_{p1}}} \frac{1}{1 - \frac{s}{s_{p2}}} A_{v0}$$

Fattore passa-alto
legato a $R_{in}C_{in}$

Fattore passa-basso
legato a $R_{out}C_p$



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Risposta in Frequenza: Esercizio (III)

$$A_v(s) = -\frac{A_{v0}}{s_{p1}} \frac{s}{1 - \frac{s}{s_{p1}}} \frac{1}{1 - \frac{s}{s_{p2}}}$$

$$s_{p1} = -\frac{1}{R_{in}C_{in}} = -10 \text{ rad/s}$$

$$s_{p2} = -\frac{1}{R_{out}C_p} = -10^6 \text{ rad/s}$$

1) Si identificano gli elementi dell'espressione generale, ordinando le singolarità (poli/zeri) in ordine di frequenza crescente

$$H(s) = k s^m \frac{\prod_i \left(1 - \frac{s}{s_{z,i}}\right)}{\prod_i \left(1 - \frac{s}{s_{p,i}}\right)}$$

costante moltiplicativa: $\frac{A_{v0}}{s_{p1}} = 1 \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^{-1}$

uno zero semplice nell'origine: $m = +1$

un polo reale negativo in $s_{p1} = -10 \text{ rad/s} \rightarrow$ frequenza di taglio $f_{p1} = \frac{1}{2\pi R_{in}C_{in}} = 1.59 \text{ Hz}$

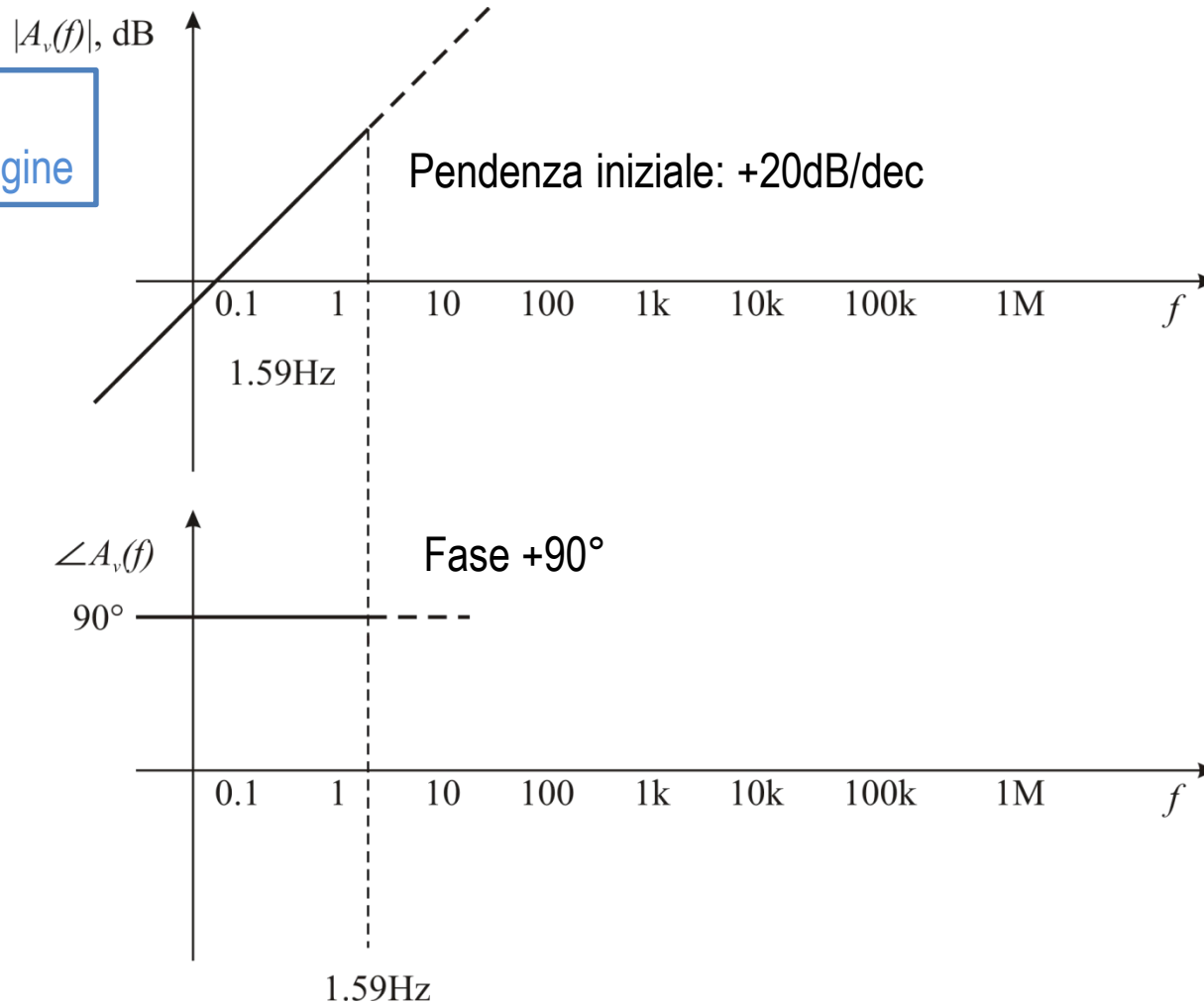
un polo reale negativo in $s_{p2} = -10^6 \text{ rad/s} \rightarrow$ frequenza di taglio $f_{p2} = \frac{1}{2\pi R_{out}C_p} = 159 \text{ kHz}$

2) Si tracciano i diagrammi di Bode del modulo e della fase (non quotati sull'asse delle ordinate) per i vari contributi, partendo da quelli a frequenza più bassa e sommando via via i successivi.

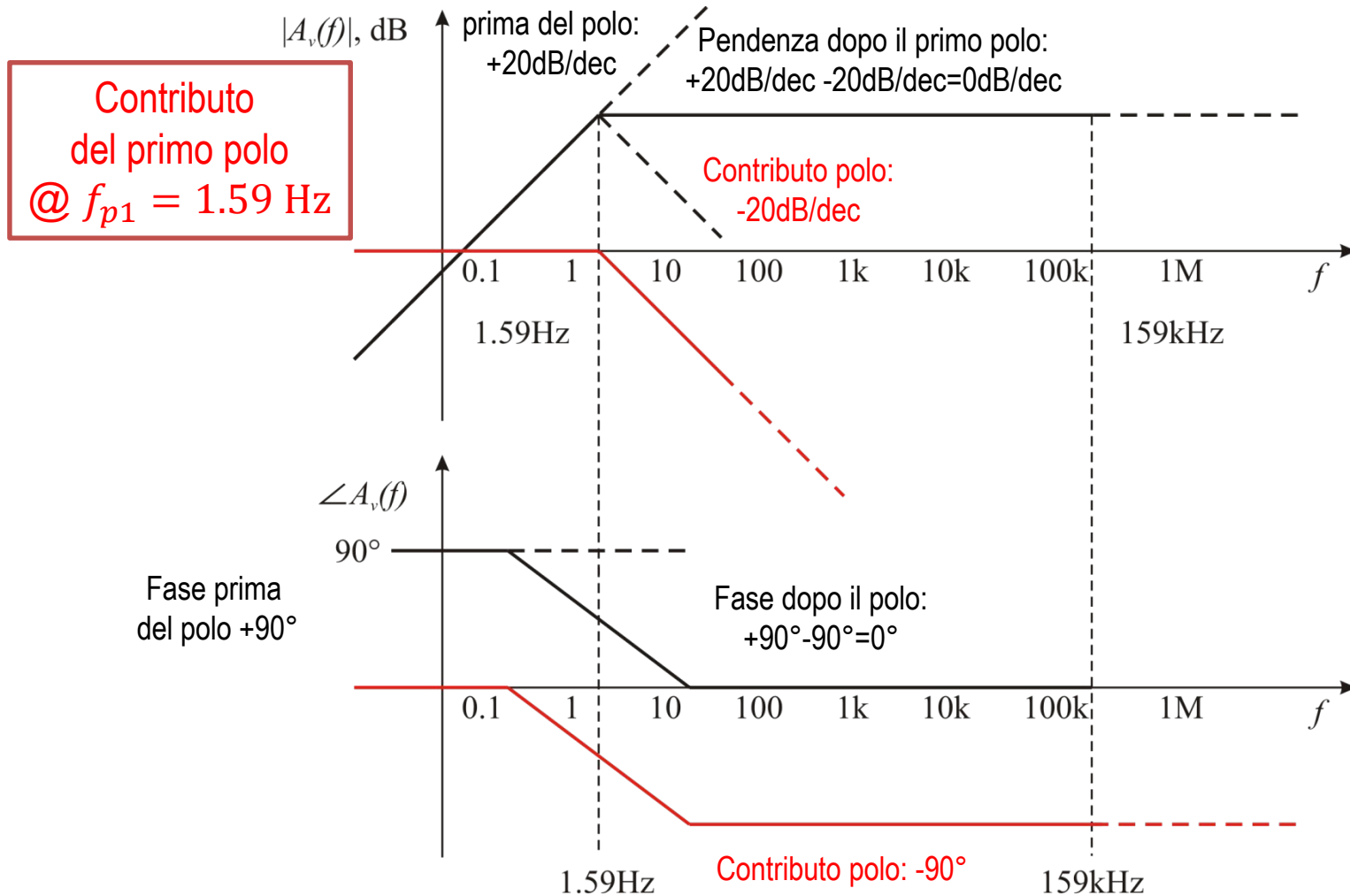


Risposta in Frequenza: Esercizio (IV)

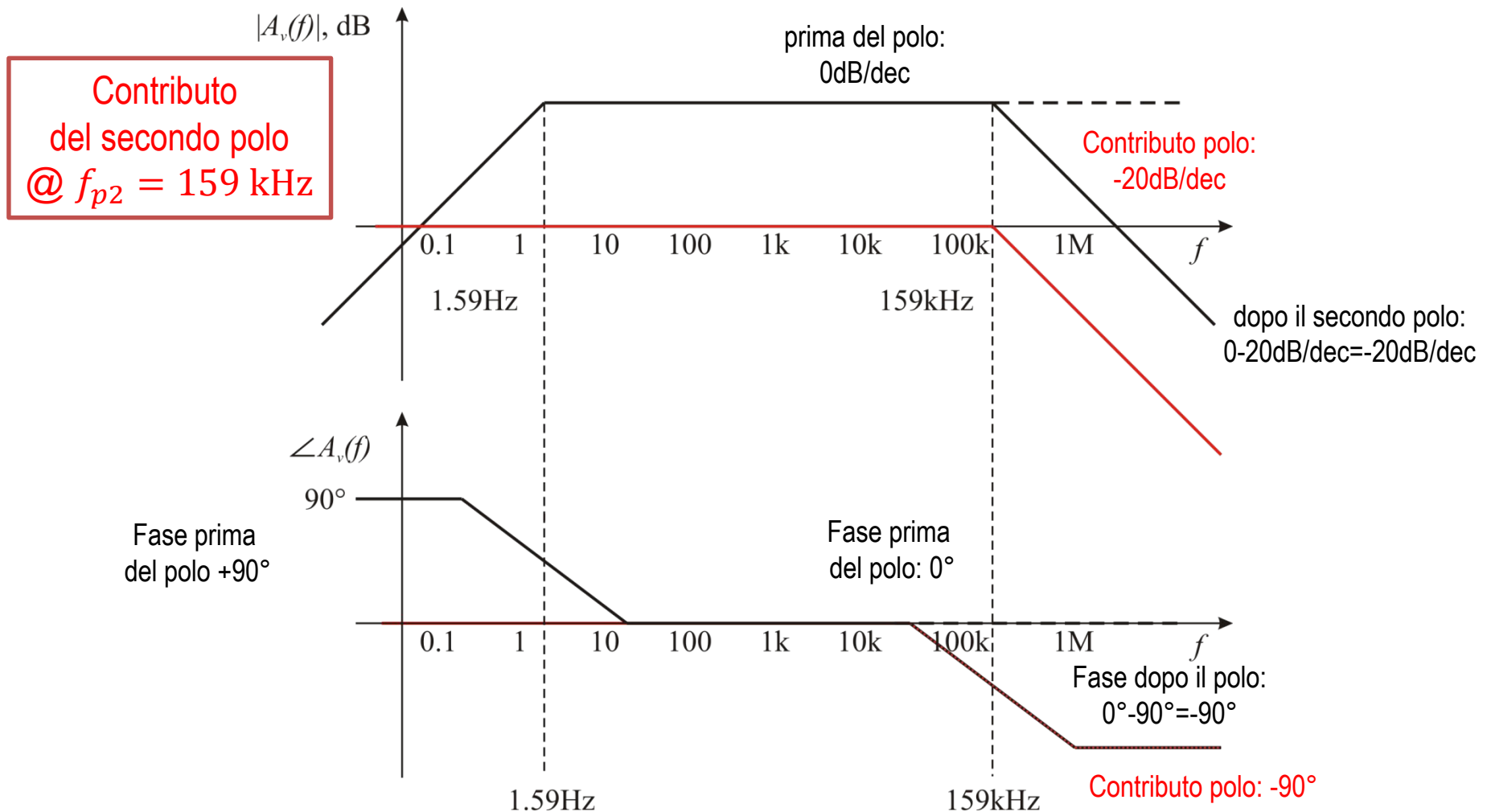
Contributo
dello zero nell'origine



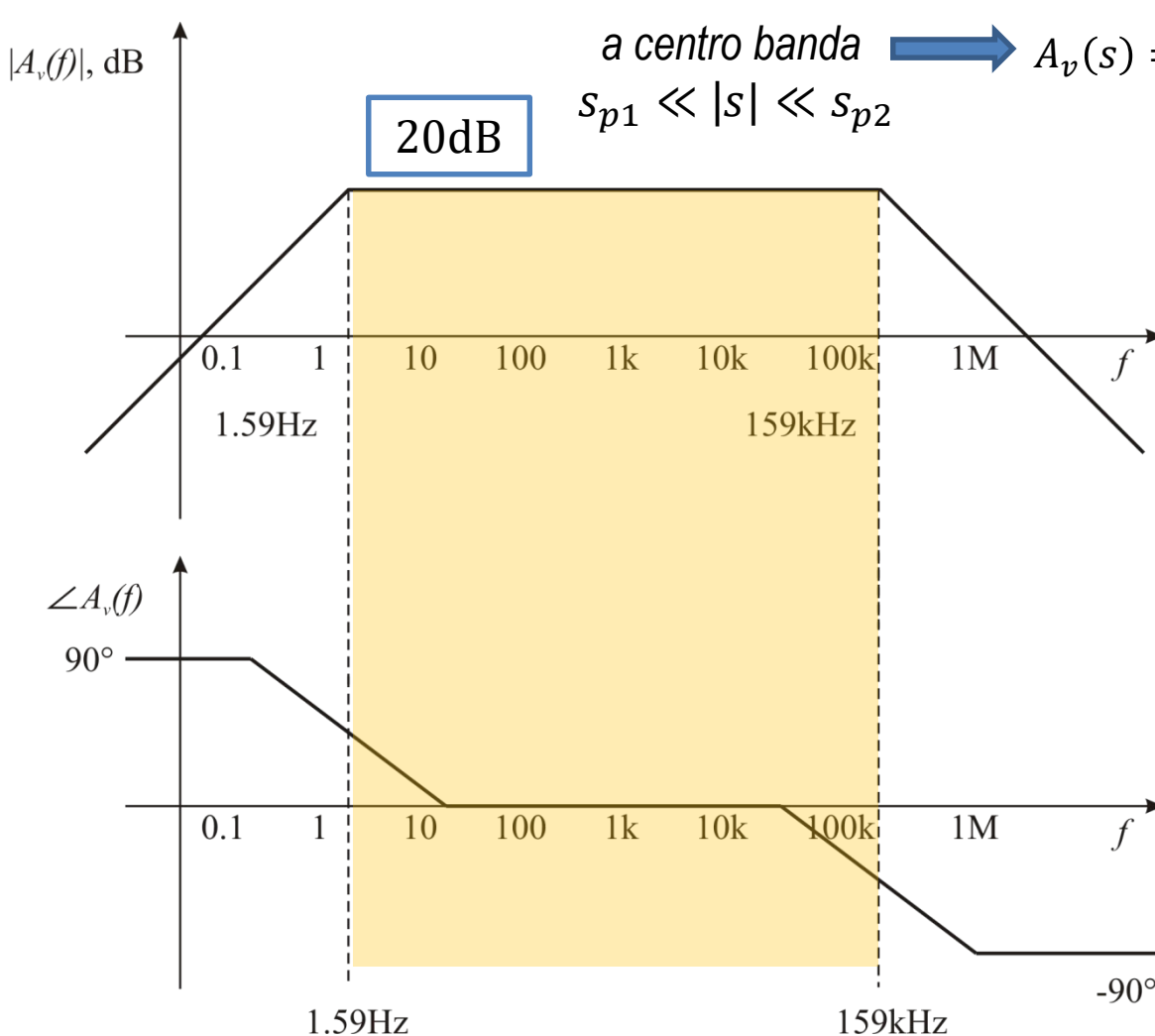
Risposta in Frequenza: Esercizio (V)



Risposta in Frequenza: Esercizio (VI)



Risposta in Frequenza: Esercizio (VII)



a centro banda
 $s_{p1} \ll |s| \ll s_{p2}$

$$A_v(s) = -\frac{A_{v0}}{s_{p1}} \underbrace{\frac{s}{1 - \frac{s}{s_{p1}}}}_{\text{per } |s| \gg s_{p1} \rightarrow -s_{p1}} \underbrace{\frac{1}{1 - \frac{s}{s_{p2}}}}_{\text{per } |s| \ll s_{p2} \rightarrow 1} \rightarrow \boxed{A_{v0}}$$

per $|s| \gg s_{p1}$

$$\rightarrow -s_{p1}$$

per $|s| \ll s_{p2}$

$$\rightarrow 1$$

Per quotare il diagramma del modulo basta conoscerne il valore per una frequenza.

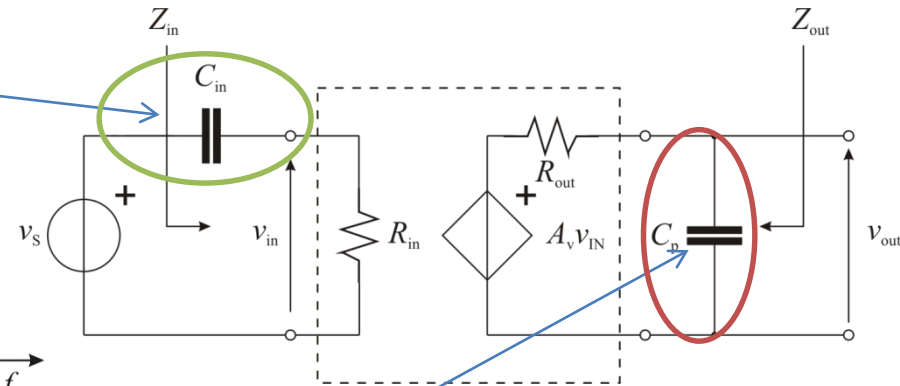
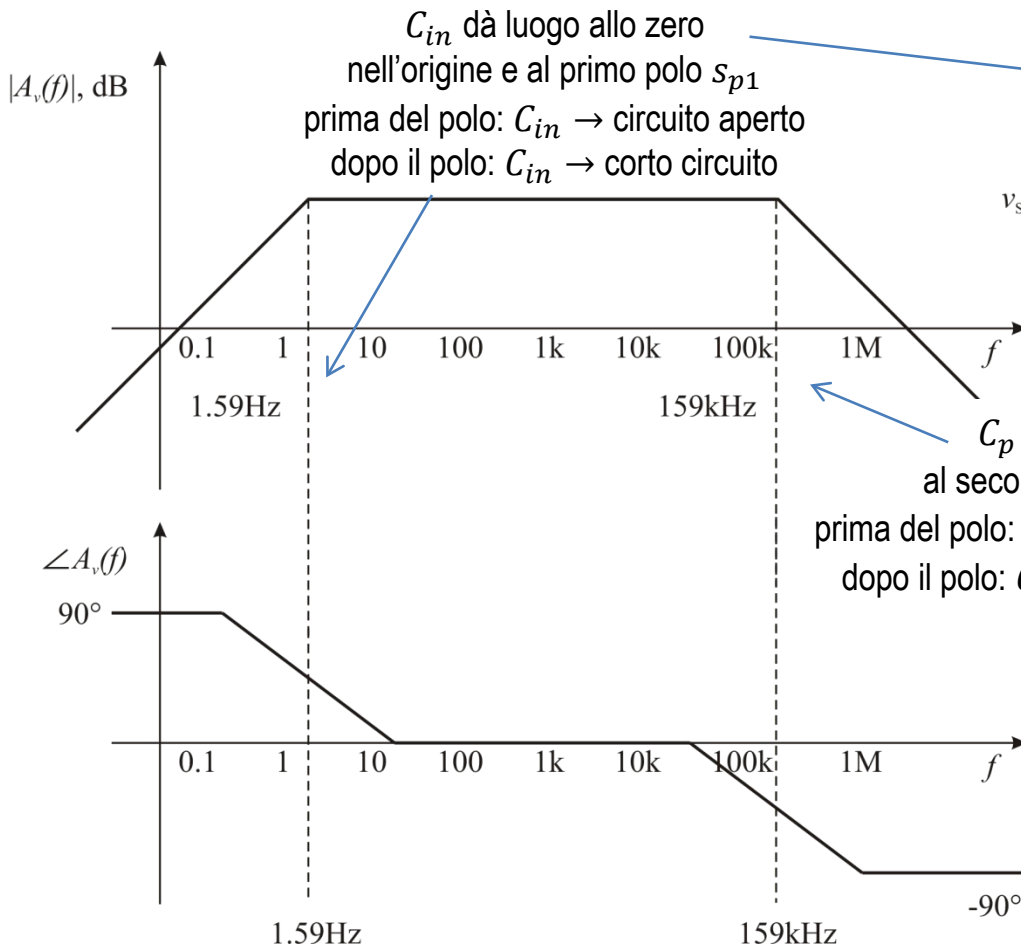
E' comodo considerare dove il diagramma è piatto: si ricava il valore dalla f.d.t. prendendo il limite per $s \rightarrow \infty$ ($s \rightarrow 0$) dei contributi di poli/zeri a frequenza superiore (inferiore) agli estremi della banda



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Risposta in Frequenza: Interpretazione Circuitale



C_p dà luogo al secondo polo s_{p2}
 prima del polo: $C_p \rightarrow$ circuito aperto
 dopo il polo: $C_p \rightarrow$ corto circuito

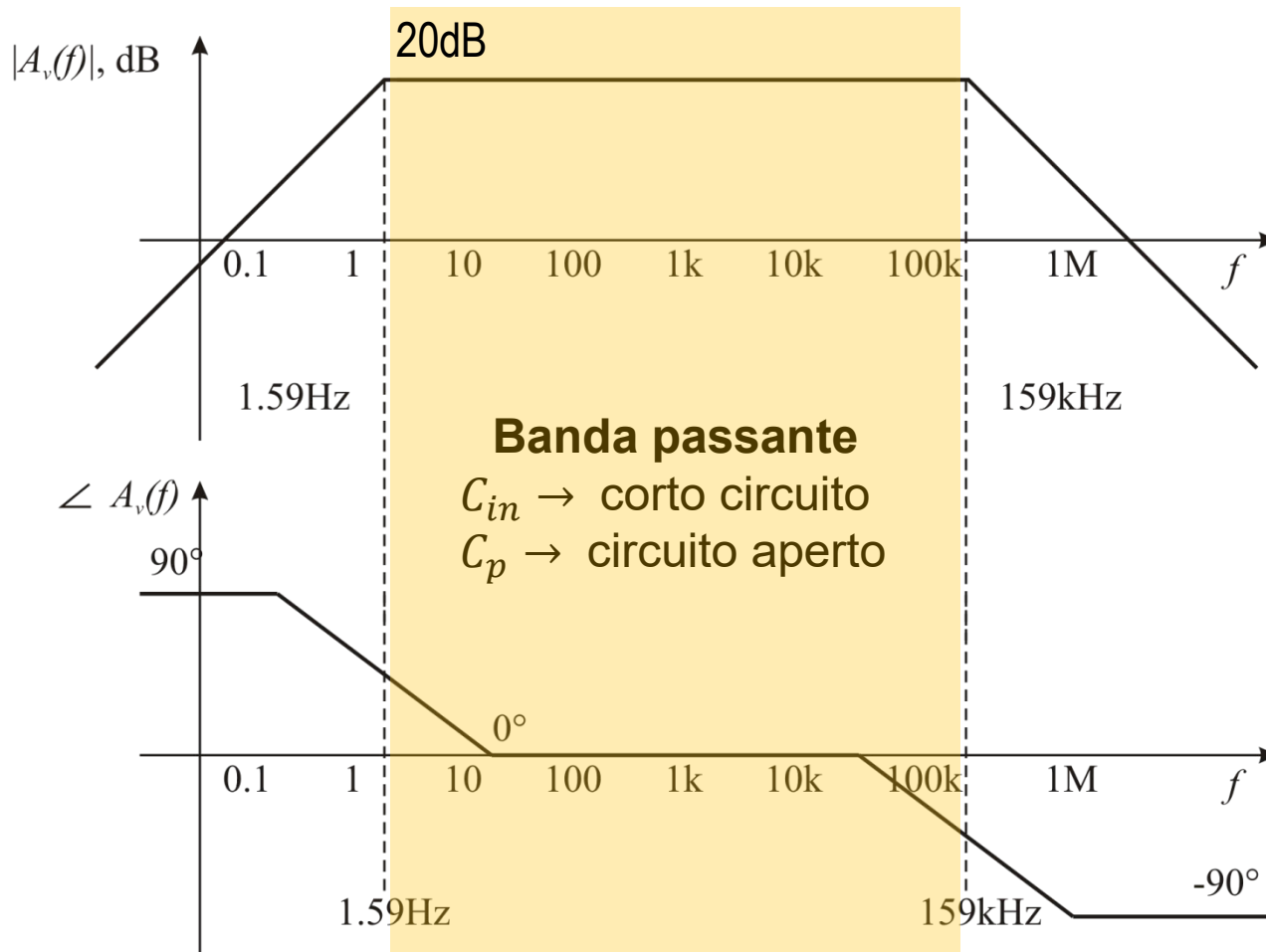
$$A_v(s) = -\frac{A_{v0}}{s_{p1}} \frac{s}{1 - \frac{s}{s_{p1}}} \frac{1}{1 - \frac{s}{s_{p2}}}$$

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi R_{in} C_{in}} = 1.59 \text{ Hz}$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi R_{out} C_p} = 159 \text{ kHz}$$



Risposta in Frequenza: Amplificazione



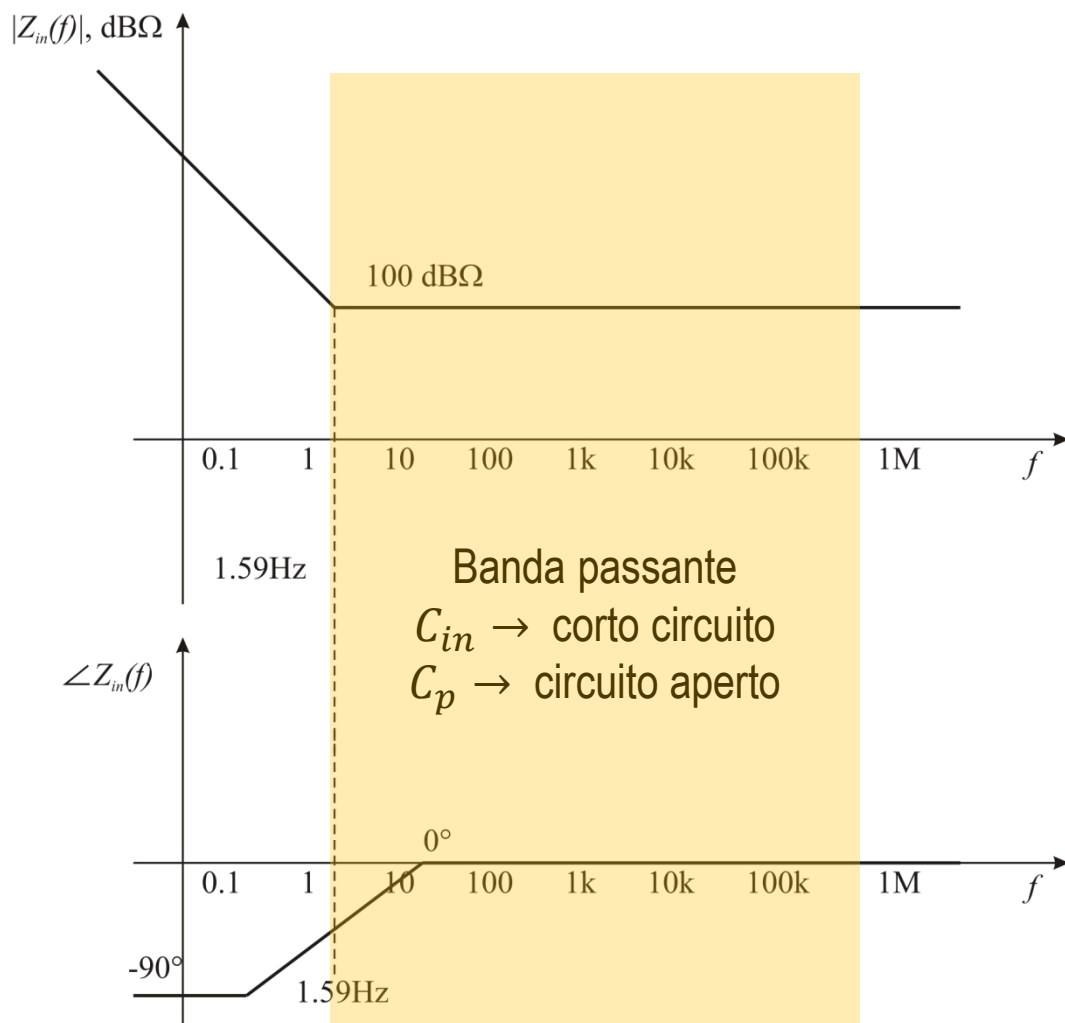
- La risposta in frequenza risente globalmente degli effetti dinamici

- In **banda passante** il comportamento dell'amplificatore è adinamico: gli elementi reattivi si comportano o come corto circuiti o come circuiti aperti.

- Le frequenze f_{c1} ed f_{c2} rappresentano gli estremi della banda (att. <3dB).



Risposta in Frequenza: Impedenza d'ingresso



L'impedenza d'ingresso risente globalmente degli effetti dinamici. A bassa frequenza \rightarrow circuito aperto.

- In **banda passante** l'impedenza d'ingresso è resistiva (R_{in})

$$Z_{in}(s) = R_{in} + \frac{1}{sC_{in}} = \frac{sRC_{in} + 1}{sC_{in}}$$

$$= \frac{k}{s} \left(1 - \frac{s}{s_{z,Zin}} \right)$$

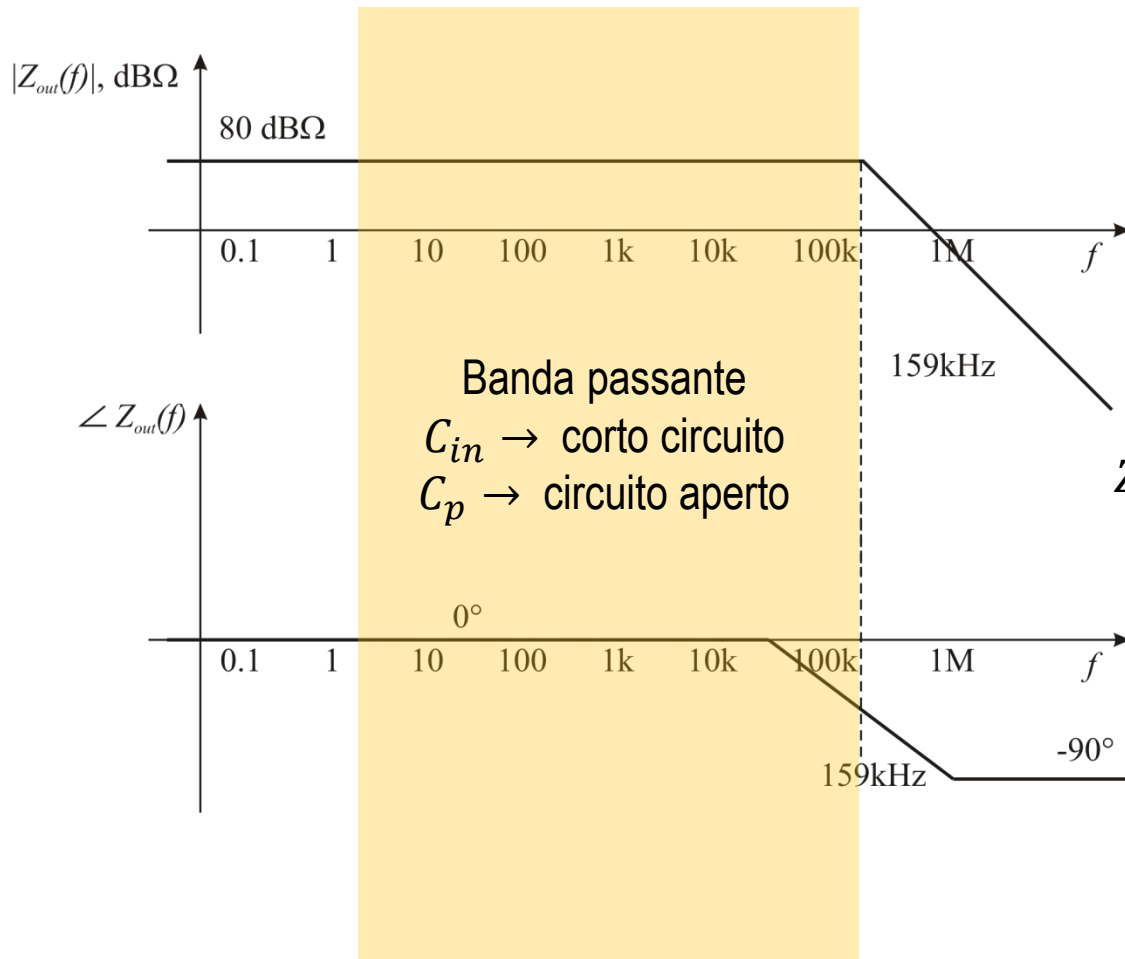
$$k = \frac{1}{C_{in}} = 10^6 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \Omega$$

$$s_{z,Zin} = s_{p1} = -\frac{1}{R_{in}C_{in}} = -10 \text{ rad/s}$$

$$f_{z,Zin} = f_{p1} = \frac{1}{2\pi R_{in}C_{in}} = 1.59 \text{ Hz}$$



Risposta in Frequenza: Impedenza d'uscita



- L'impedenza d'uscita risente globalmente degli effetti dinamici. Ad alta frequenza \rightarrow la capacità parassita cortocircuita l'uscita.

- In **banda passante** l'impedenza d'uscita è resistiva (R_{out})

$$Z_{out}(s) = R_{out} \parallel \frac{1}{sC_p} = \frac{R_{out}}{1 + sC_p R_{out}} = \frac{k}{\left(1 - \frac{s}{s_{p,Zout}}\right)}$$

$$k = R_{out} = 10 \text{ k}\Omega$$

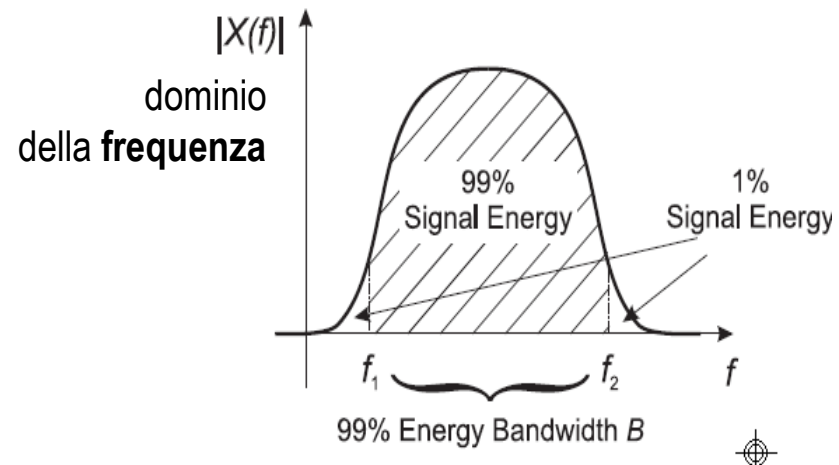
$$s_{p,Zout} = s_{p2} = -\frac{1}{R_{out}C_p} = -10^6 \text{ rad/s}$$

$$f_{p,Zout} = \frac{1}{2\pi R_{out}C_p} = 159 \text{ kHz}$$

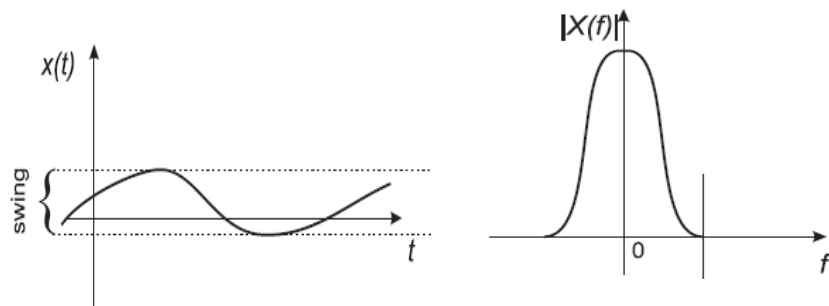


Limitazione di Banda (I)

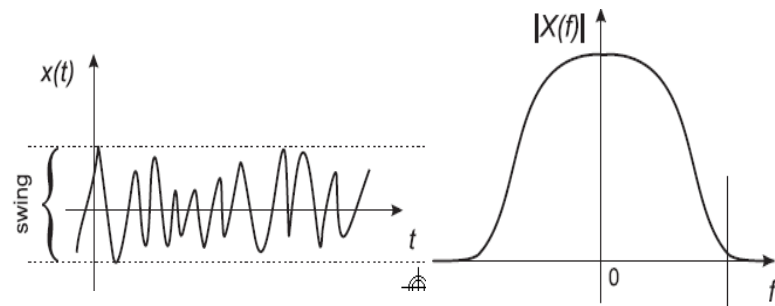
- La **banda** di un segnale è l'intervallo di frequenze in cui lo spettro del segnale è *significativo* (ad es: in cui è concentrato il 99% dell'energia).
- La banda così definita, per i segnali fisici, è sempre **limitata**.



Banda Stretta: variazioni 'lente'
Poca informazione



Banda Larga: variazioni 'rapide'
Molta informazione

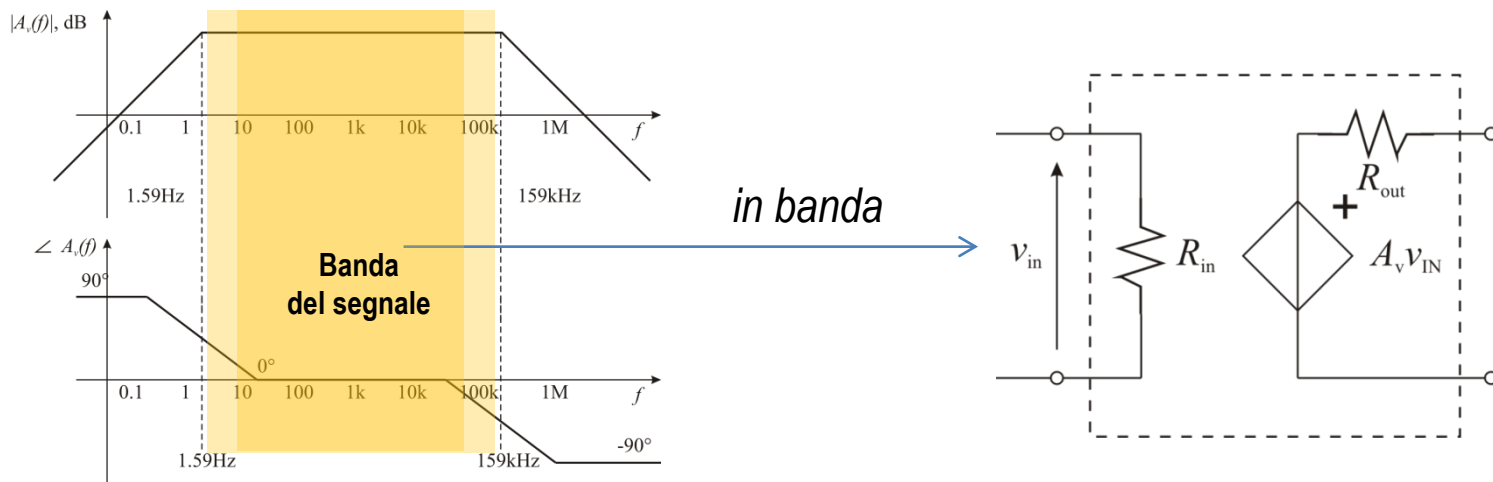


POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Limitazione di Banda (II)

- In un intervallo di frequenze, detto **banda dell'amplificatore** (che normalmente coincide con la banda dei segnali per cui è progettato), l'amplificazione e le impedenze sono reali e costanti in frequenza.
- La banda del segnale deve essere inclusa nella banda dell'amplificatore
- *Per segnali in banda*, si può considerare l'amplificatore come un blocco adinamico: gli elementi reattivi si comportano come *corto circuiti* o *circuiti aperti*, a seconda dei casi.

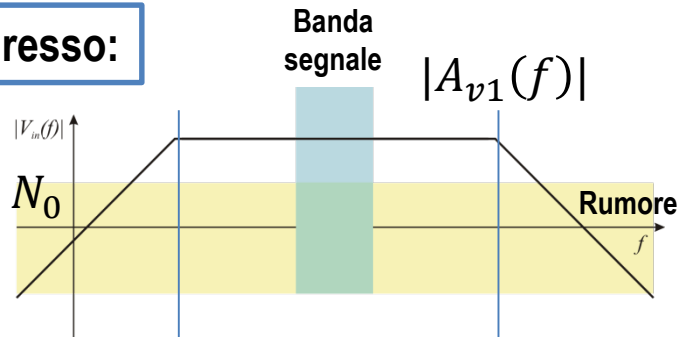


Limitazione di Banda (III)

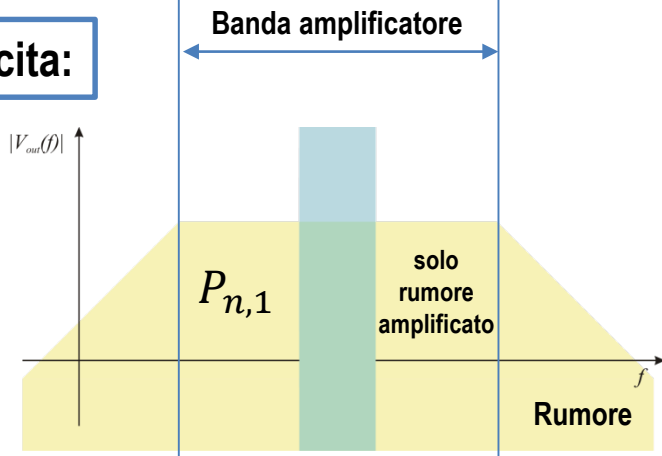
- Non è opportuno che la banda dell'ampl. sia molto più ampia di quella del segnale: si amplifica solo più rumore: si spreca energia e, per le non-linearità, questo rumore può corrompere il segnale utile.

Banda amplificatore \gg Banda segnale

Ingresso:



Uscita:



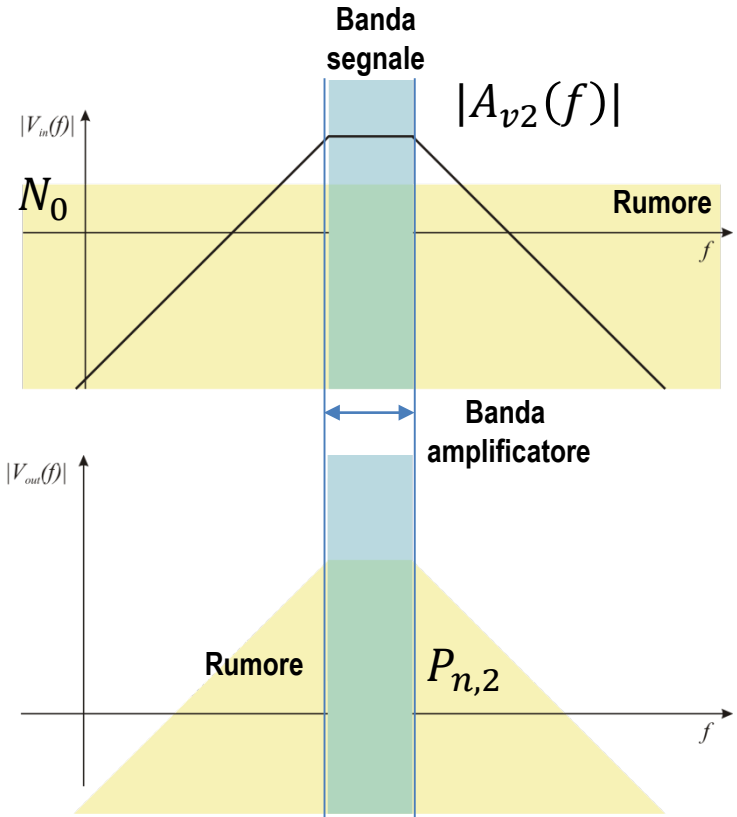
$$P_n = \int N_0 |A_v(f)|^2 df$$

Potenza di rumore

Il segnale è amplificato
allo stesso modo

$$P_{n,1} \gg P_{n,2}$$

Banda amplificatore \cong Banda segnale



POLITECNICO
DI TORINO

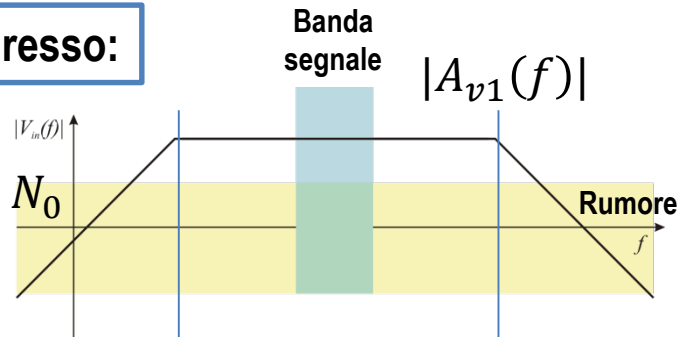
DET
Department of Electronics and Telecommunications

Limitazione di Banda (III)

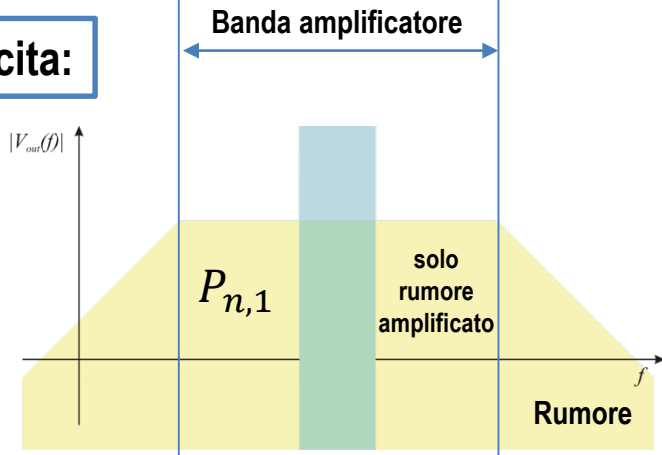
- Per evitare di amplificare rumore fuori banda, è opportuno **limitare la banda** di un amplificatore.
- Allo scopo si introducono condensatori (più in generale filtri) in ingresso e/o in uscita.

Banda amplificatore \gg Banda segnale

Ingresso:



Uscita:



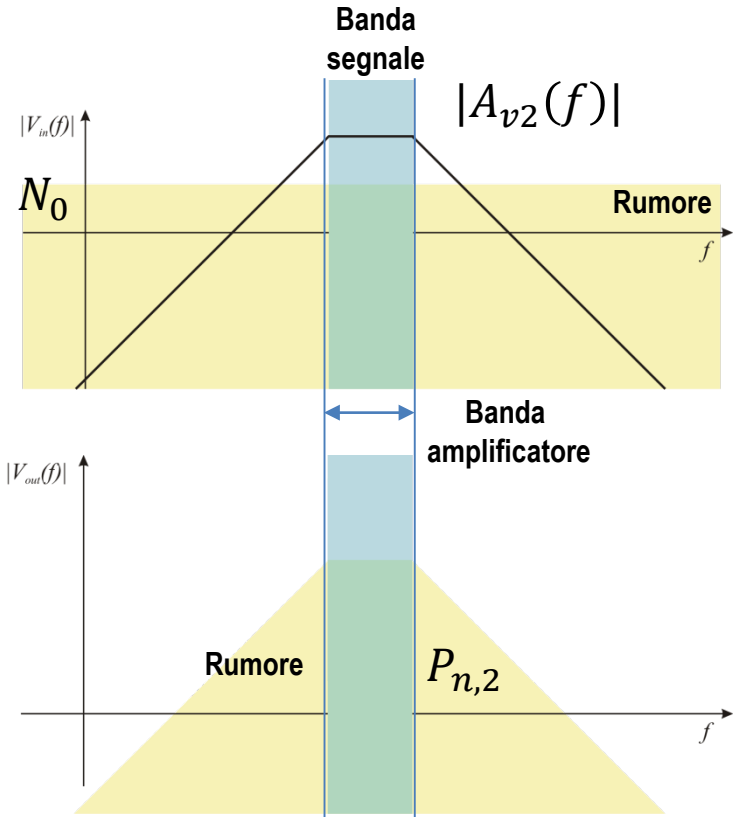
$$P_n = \int N_0 |A_v(f)|^2 df$$

Potenza di rumore

Il segnale è amplificato allo stesso modo

$$P_{n,1} \gg P_{n,2}$$

Banda amplificatore \cong Banda segnale



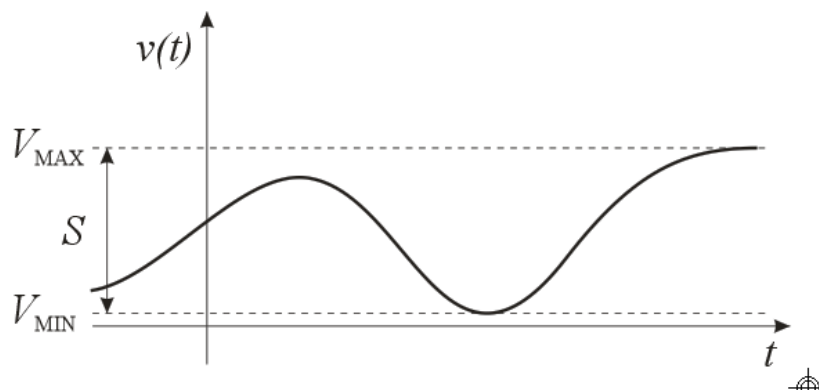
POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

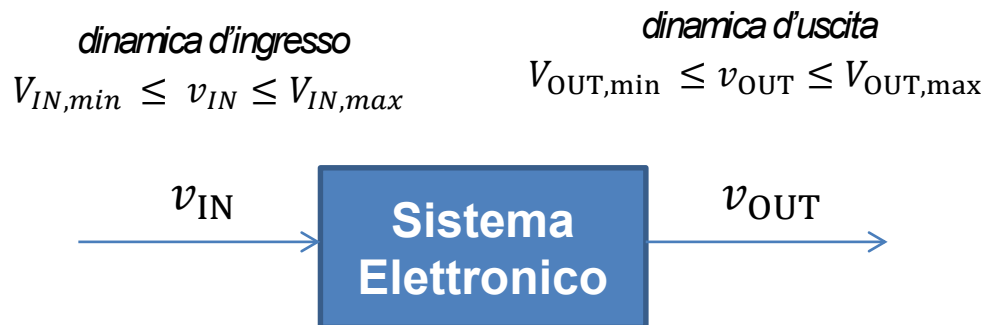
Limitazioni di Dinamica (I)

- L'intervallo dei valori che un segnale può assumere prende in nome di ***dinamica*** (inglese: *swing*). Ad es.: in figura $S=[V_{\text{MIN}}, V_{\text{MAX}}]$.
- I sistemi elettronici possono elaborare segnali in ingresso entro una certa dinamica (*dinamica d'ingresso*) e forniscono segnali in uscita entro una certa dinamica (*dinamica d'uscita*)

Dinamica di un segnale



Dinamica di ingresso e di uscita di un sistema



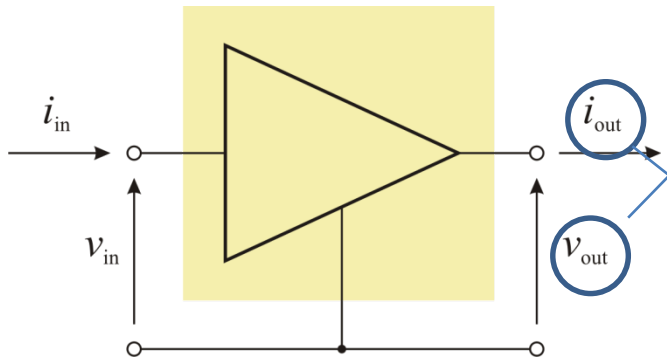
La dinamica del segnale deve essere compatibile con la dinamica del sistema

Limitazioni di Dinamica (II)

- La dinamica della tensione e della corrente alla porta di uscita di un amplificatore reale sono entrambe *limitate*.

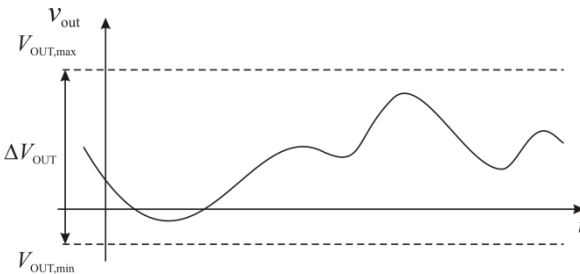
Per tutti gli amplificatori, le limitazioni di dinamica riguardano sia la grandezza a cui è associata l'informazione:

- Ampl. di tensione e di transresistenza: v_{out}
 - Ampl. di corrente e di transconduttanza: i_{out}
- sia l'altra grandezza d'uscita, cioè:
- Ampl. di tensione e di transresistenza: i_{out}
 - Ampl. di corrente e di transconduttanza: v_{out}



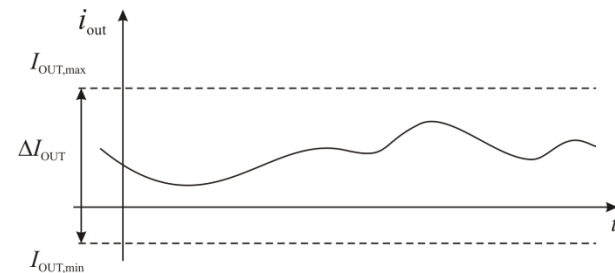
Dinamica della tensione d'uscita

$$V_{out,min} < v_{out}(t) < V_{out,max}$$



Dinamica della corrente d'uscita

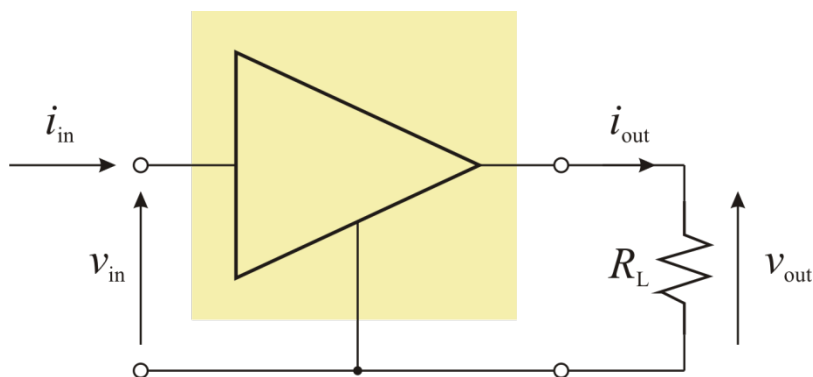
$$I_{out,min} < i_{out}(t) < I_{out,max}$$



Limitazioni di Dinamica (III)

- La dinamica della grandezza d'uscita a cui non è associata informazione limita il **carico** che può essere pilotato dall'amplificatore (e la potenza che questo può erogare alla porta d'uscita...)
- A parità di carico, può comportare una limitazione più stringente sulla dinamica d'uscita del segnale utile.

Amplificatore di
Tensione
 $v_{out}(t) = A_v v_{in}(t)$



In linearità $i_{out}(t) = \frac{v_{out}(t)}{R_L}$

Se il segnale d'uscita copre tutta la dinamica

$$\frac{V_{out,min}}{R_L} < i_{out} < \frac{V_{out,max}}{R_L}$$

dal momento che però deve essere anche

$$I_{out,min} < i_{out}(t) < I_{out,max}$$

- L'uscita può essere pilotata a piena dinamica solo se $\left\{ \begin{array}{l} \frac{V_{out,max}}{R_L} < I_{out,max} \\ \frac{V_{out,min}}{R_L} > I_{out,min} \end{array} \right. \rightarrow R_L > \max \left\{ \frac{V_{out,max}}{I_{out,max}}, \frac{V_{out,min}}{I_{out,min}} \right\}$

- Se la precedente condizione non è rispettata, l'estremo superiore (inferiore) della dinamica d'uscita in tensione è ridotto a $R_L I_{out,max}$ (a $R_L I_{out,min}$)



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

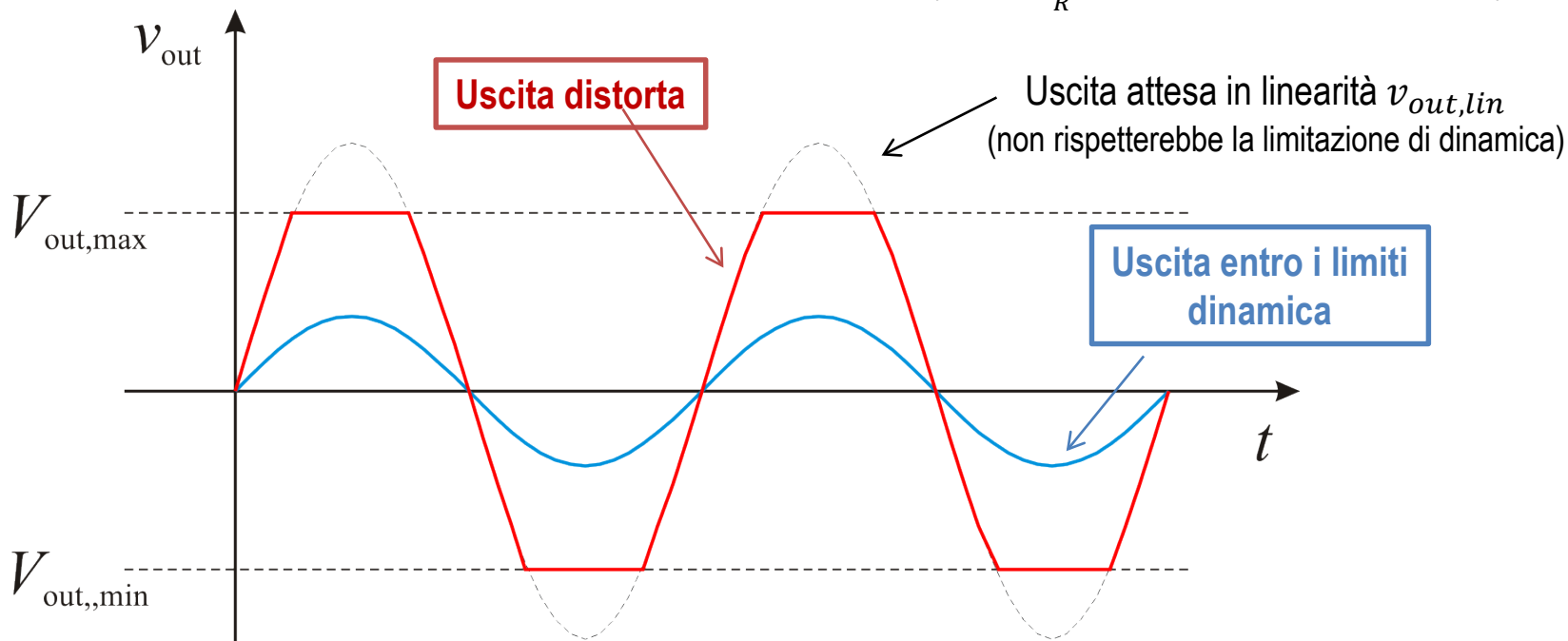
Limitazioni di Dinamica (IV)

- Se le limitazioni di dinamica non sono rispettate, l'uscita è fortemente distorta: tipicamente la tensione e la corrente saturano ai valori estremi (*clipping*).

$$v_{out} = \begin{cases} V_{out,min} & v_{out,lin} < V_{out,min} \\ v_{out,lin} & V_{out,min} < v_{out,lin} < V_{out,max} \\ V_{out,max} & v_{out,lin} > V_{out,max} \end{cases} \quad i_{out} = \begin{cases} I_{out,min} & i_{out,lin} < I_{out,min} \\ i_{out,lin} & I_{out,min} < i_{out,lin} < I_{out,max} \\ I_{out,max} & i_{out,lin} > I_{out,max} \end{cases}$$

$v_{out,lin}$: tensione d'uscita attesa se l'amplificatore fosse lineare (ad es: $A_v v_{in}$ per un ampl. di V)

$i_{out,lin}$: corrente d'uscita attesa se l'amplificatore fosse lineare (ad es: $\frac{A_v v_{in}}{R}$ per un ampl. di V con carico R)



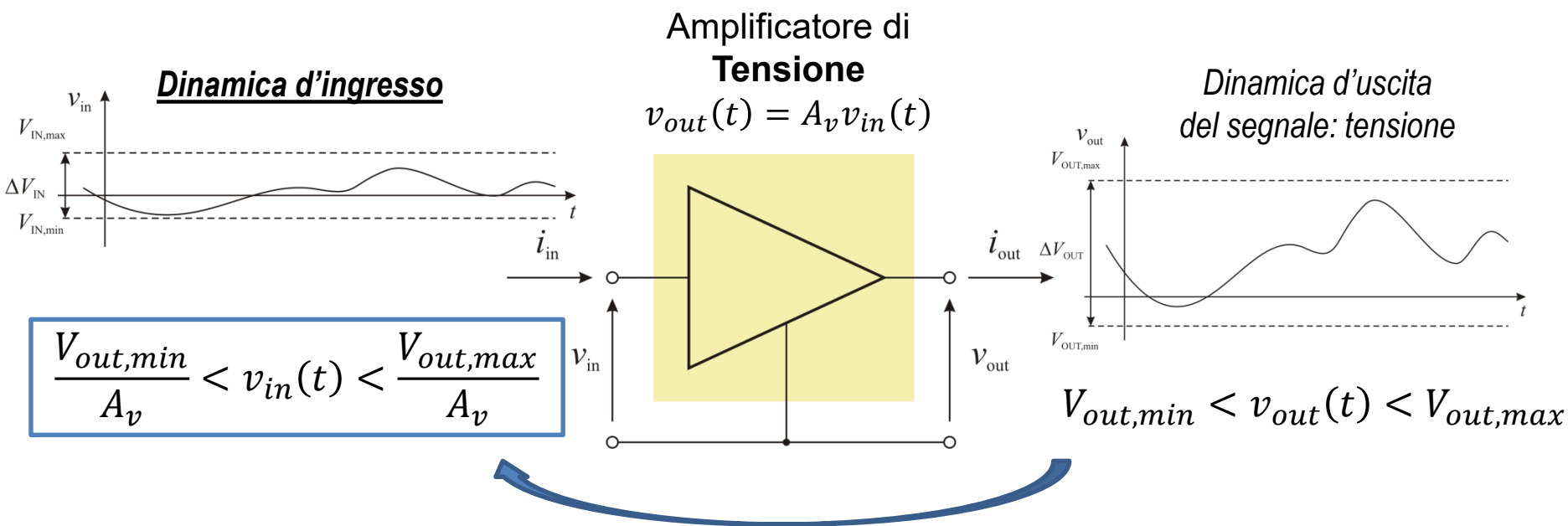
Limitazioni di Dinamica (V)

- Anche la **dinamica d'ingresso di un amplificatore è limitata**.
- La dinamica d'ingresso è legata alla dinamica d'uscita per il segnale utile:

$$y = Ax \wedge y \in (Y_{min}, Y_{max}) \rightarrow$$

$$x \in \left(\frac{Y_{min}}{A}, \frac{Y_{max}}{A} \right), \quad A > 0$$

$$x \in \left(\frac{Y_{max}}{A}, \frac{Y_{min}}{A} \right), \quad A < 0$$



Limitazioni di Dinamica (VI)

- la dinamica d'ingresso di tutti gli amplificatori è limitata

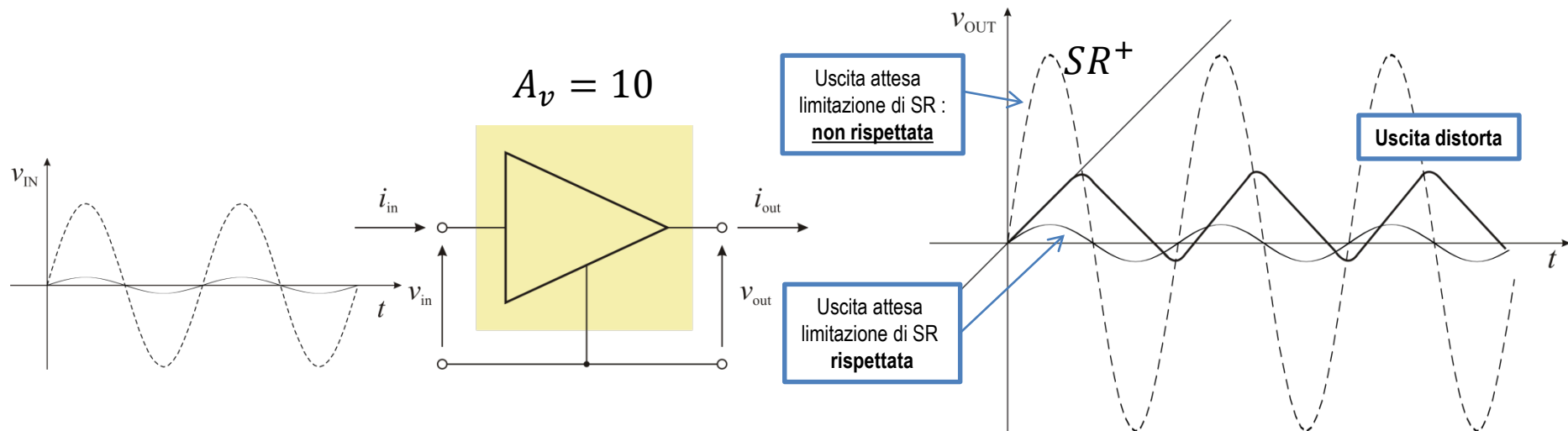
<p>Amplificatore di Tensione</p> $V_{out,min} < v_{out}(t) < V_{out,max},$ $v_{out}(t) = A_v v_{in}(t)$ <p>↓</p> $\frac{V_{out,min}}{A_v} < v_{in}(t) < \frac{V_{out,max}}{A_v}$	<p>Amplificatore di Transconduttanza</p> $I_{out,min} < i_{out}(t) < I_{out,max},$ $i_{out}(t) = g_m v_{in}(t)$ <p>↓</p> $\frac{I_{out,min}}{g_m} < v_{in}(t) < \frac{I_{out,max}}{g_m}$
<p>Amplificatore di Transresistenza</p> $V_{out,min} < v_{out}(t) < V_{out,max},$ $v_{out}(t) = R_m i_{in}(t)$ <p>↓</p> $\frac{V_{out,min}}{R_m} < i_{in}(t) < \frac{V_{out,max}}{R_m}$	<p>Amplificatore di Corrente</p> $I_{out,min} < i_{out}(t) < I_{out,max},$ $i_{out}(t) = A_i i_{in}(t)$ <p>↓</p> $\frac{I_{out,min}}{A_i} < i_{in}(t) < \frac{I_{out,max}}{A_i}$



Limitazione di Slew Rate

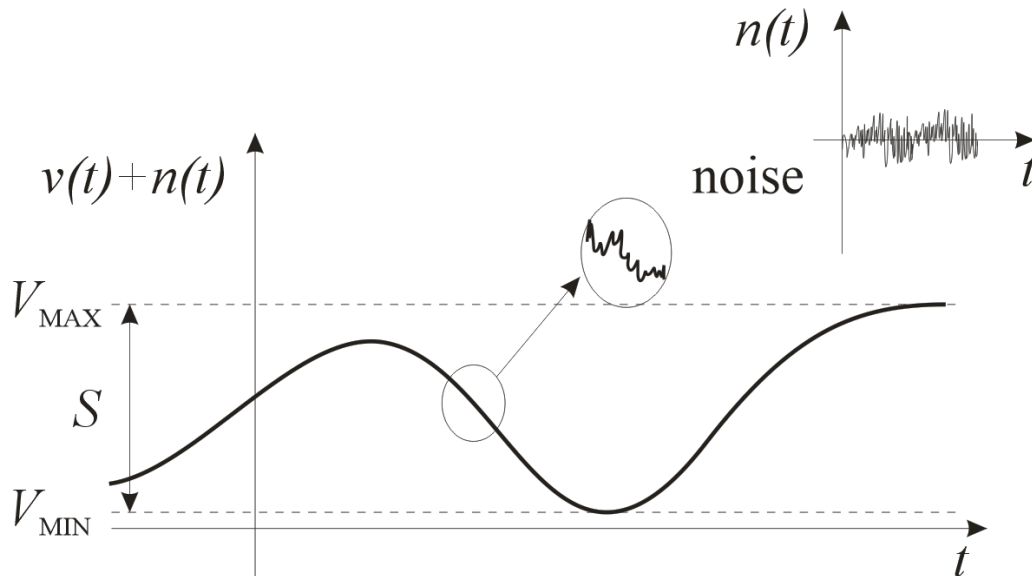
- Gli amplificatori presentano anche una limitazione *sulla derivata temporale* della tensione d'uscita → **limitazione di slew rate**. In altre parole, la tensione d'uscita non può variare (crescere/decrescere) troppo rapidamente.
- Se il segnale in ingresso è tale da richiedere (in condizioni ideali) variazioni della tensione d'uscita che eccedono questo limite, il segnale in uscita viene distorto.
- E' una limitazione nonlineare dinamica che riduce la dinamica utile a frequenza elevata.

$$SR^- < \frac{dv_{out}}{dt} < SR^+$$



Rumore (I)

- Ai segnali elettrici è sovrapposto **rumore**, variazioni a cui non è associata informazione.
- Oltre al rumore legato all'agitazione termica, ai segnali sono sovrapposti disturbi generati da altri apparati → **interferenze** (problemi di Compatibilità Elettromagnetica, EMC)
- Il rumore fuori dalla banda del segnale utile può e deve essere filtrato.
- Il rumore nella banda del segnale non può essere soppresso in un circuito analogico
- Ci occuperemo ora del rumore in banda (→ condizioni adinamiche) per un amplificatore.



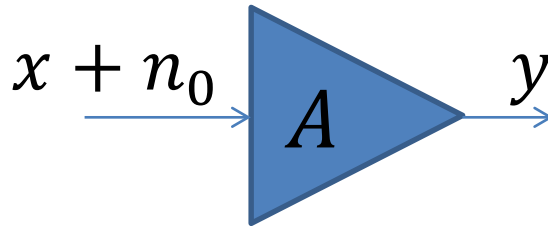
Il Rapporto Segnale/Rumore
(Signal-to-Noise Ratio, *SNR*)
esprime il rapporto tra la potenza
di segnale e di rumore su un
carico dato.

$$SNR = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} = \frac{\overline{v^2}}{\overline{n^2}}$$



Rumore (II)

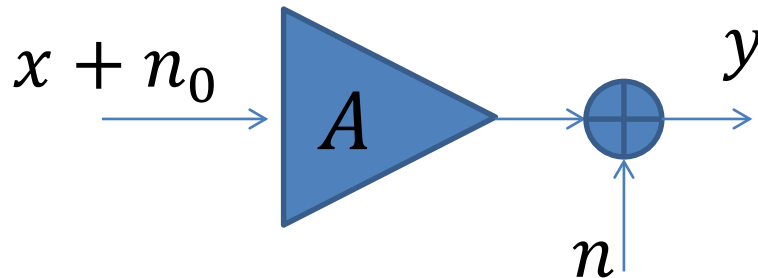
x : segnale
 n_0 : rumore



$$y = \underset{\text{segnale}}{Ax} + \underset{\text{rumore}}{An_0}$$

$$SNR_{out} = \frac{A^2 \overline{x^2}}{A^2 \overline{n_0^2}} = \frac{\overline{x^2}}{\overline{n_0^2}} = SNR_{in}$$

- In un **amplificatore ideale** il rapporto segnale-rumore del segnale in uscita è uguale a quello del segnale in ingresso (comunque *mai maggiore!*)



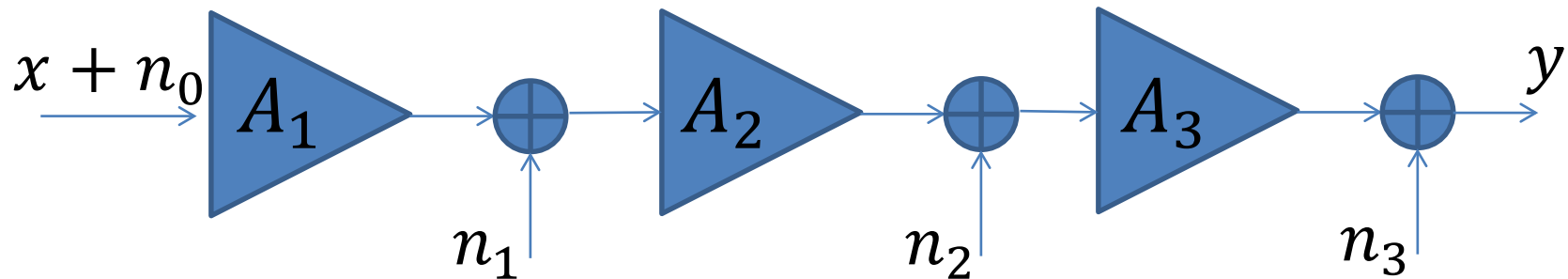
$$y = \underset{\text{segnale}}{Ax} + \underbrace{An_0 + n}_{\text{rumore}}$$

$$SNR_{out} = \frac{A^2 \overline{x^2}}{A^2 \overline{n_0^2} + \overline{n^2}} = \frac{\overline{x^2}}{\overline{n_0^2} + \overline{n^2}/A^2} < SNR_{in}$$

- Un **amplificatore reale** amplifica il rumore in ingresso ed aggiunge rumore: il rapporto segnale-rumore del segnale in uscita è **più basso** di quello del segnale in ingresso.

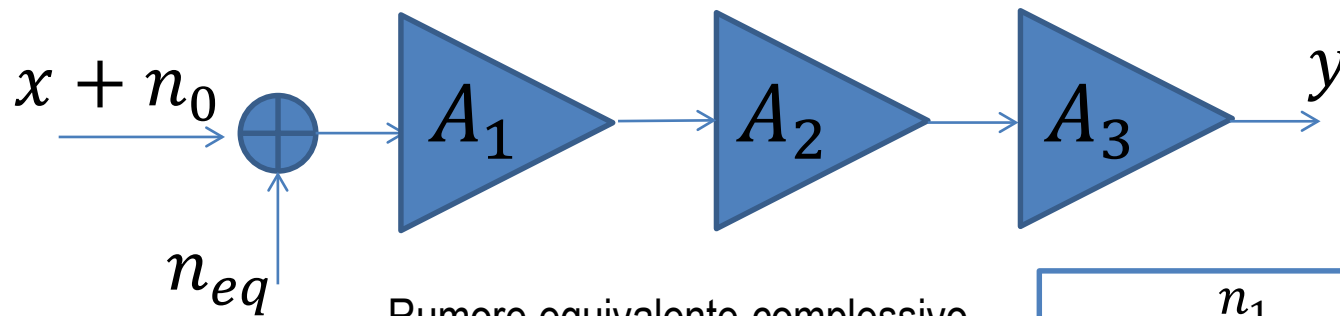


Rumore (III)



Per più stadi amplificatori collegati in cascata:

$$\begin{aligned} y &= A_3(A_2(A_1(x + n_0) + n_1) + n_2) + n_3 \\ &= \underbrace{A_1A_2A_3x}_{\text{segnale}} + \underbrace{A_1A_2A_3n_0 + A_2A_3n_1 + A_3n_2 + n_3}_{\text{rumore}} \end{aligned}$$

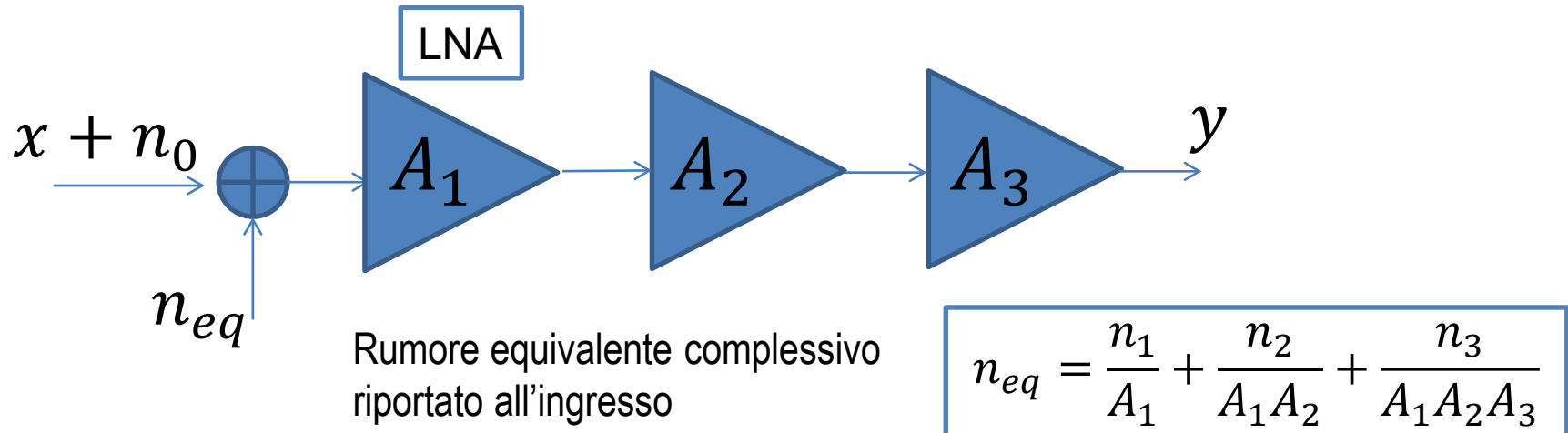


Rumore equivalente complessivo
riportato all'ingresso

$$n_{eq} = \frac{n_1}{A_1} + \frac{n_2}{A_1A_2} + \frac{n_3}{A_1A_2A_3}$$



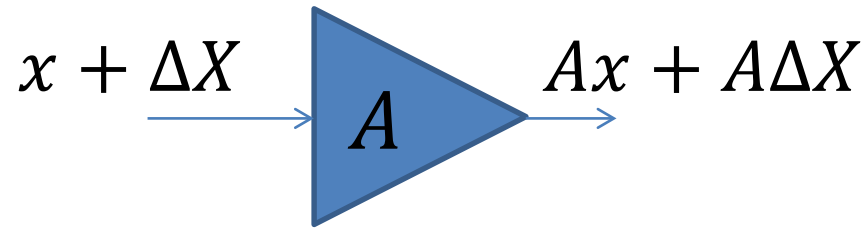
Rumore (IV)



- Per più stadi connessi in cascata, il contributo di uno stadio al rumore complessivo riportato all'ingresso è diviso per la relativa amplificazione e per quella di tutti gli stadi che lo precedono.
- Se $A_1, A_2, A_3 \gg 1$ solo il contributo del **primo stadio** è critico.
- Per ridurre il rumore totale è necessario che il rumore introdotto dal primo stadio sia il più basso possibile (e l'amplificazione sia sufficiente).
- Il primo stadio di una catena di amplificatori è il più critico per il rumore ed è detto per questo **Amplificatore a basso rumore** (ingl. **Low Noise Amplifier, LNA**).



Offset e Tolleranze di Fabbricazione



- Oltre al rumore, gli amplificatori presentano anche un errore in continua (offset) dovuto principalmente alle tolleranze di fabbricazione che inducono variazioni del punto di funzionamento a riposo

→ **errore di offset** (in uscita: $A\Delta X$, riportato in ingresso: ΔX)

- Particolarmente critico negli amplificatori per segnali continui o variabili molto lentamente.

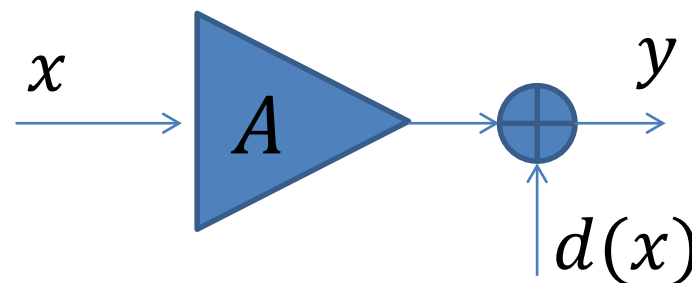
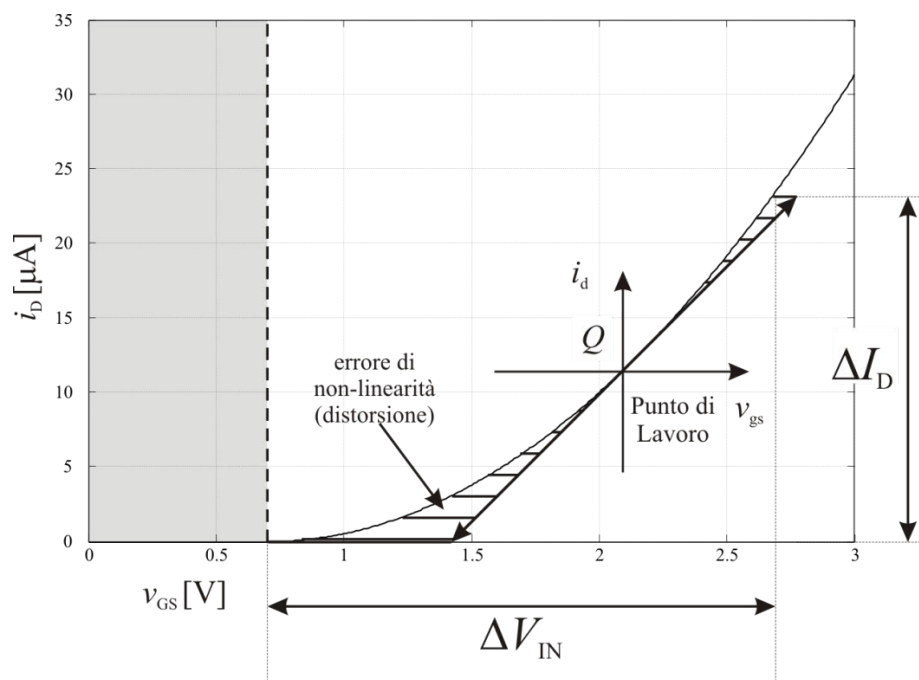
- Al di là dell'errore di offset, tutte le grandezze caratteristiche di un amplificatore sono affette da tolleranze. Negli stadi amplificatori basati su transistori introdotti fin qui, le tolleranze di fabbricazione possono essere dell'ordine di $\pm 20\%$ su tutti i parametri ($A_v, A_i, g_m, R_m, R_{in}, R_{out} \dots$) e spesso questo non è accettabile ☹ ☹

E' possibile ottenere amplificatori molto più precisi utilizzando il **principio della retroazione negativa**, che introdurremo tra poco parlando degli **amplificatori operazionali**.



Distorsione non-lineare (I)

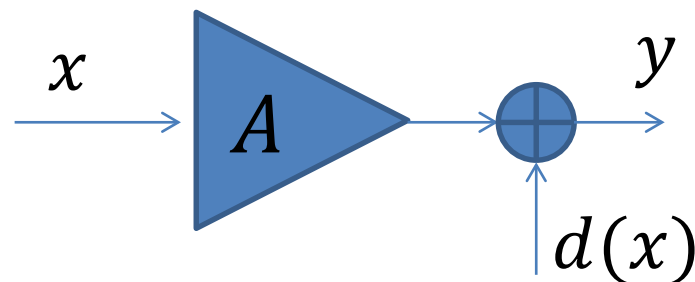
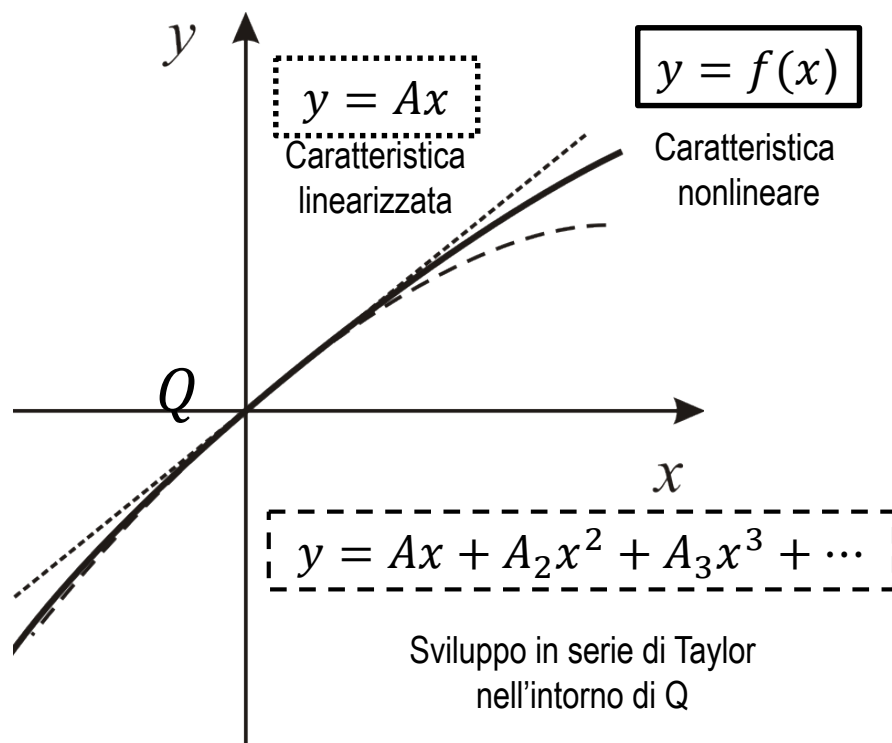
- Anche quando le limitazioni di dinamica sono rispettate, la caratteristica ingresso-uscita di un amplificatore reale non è esattamente lineare (vedi limitazioni dell'analisi di piccolo segnale)
- La non-linearità residua dà luogo ad un errore deterministico detto **distorsione non-lineare**, funzione del segnale d'ingresso e tanto maggiore quanto maggiore è l'ampiezza del segnale



Errore dovuto alla non-linearità (distorsione)

Distorsione non-lineare (II)

- Per studiare la distorsione in condizioni dinamiche e per segnali di ampiezza (relativamente) ridotta, è possibile approssimare la relazione ingresso-uscita con uno sviluppo in serie di Taylor di ordine >1 nell'intorno del punto di lavoro \rightarrow non-linearità polinomiale.
- L'approccio è generalizzabile al caso dinamico (serie di Volterra, non trattato in questo corso)



$$y = \underbrace{Ax}_{\text{Amplificazione lineare}} + \underbrace{A_2x^2 + A_3x^3 + \dots}_{\text{Errore } d(x) \text{ dovuto alla non-linearità}}$$

Distorsione non-lineare (III)

- Effetti della non-linearità polinomiale per ingressi sinusoidali:

$$y = Ax + A_2x^2 + A_3x^3 + \dots$$

- **Ingresso sinusoidale:** $x = X_0 \sin(\omega_0 t)$

- **Termine lineare:** uscita $y_1 = AX_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)$

l'uscita è ancora una senoide alla stessa frequenza ω_0 dell'ingresso (sistema adinamico $\rightarrow \varphi=0$)

- **Termine quadratico:**

$$y_2 = A_2x^2 = A_2X_0^2 \sin^2(\omega_0 t) = \frac{A_2X_0^2}{2} [1 - \cos(2\omega_0 t)]$$

errore in componente a
continua **frequenza doppia $2\omega_0$**

- **Termine cubico:**

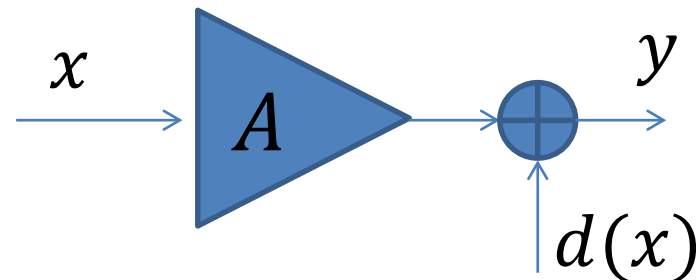
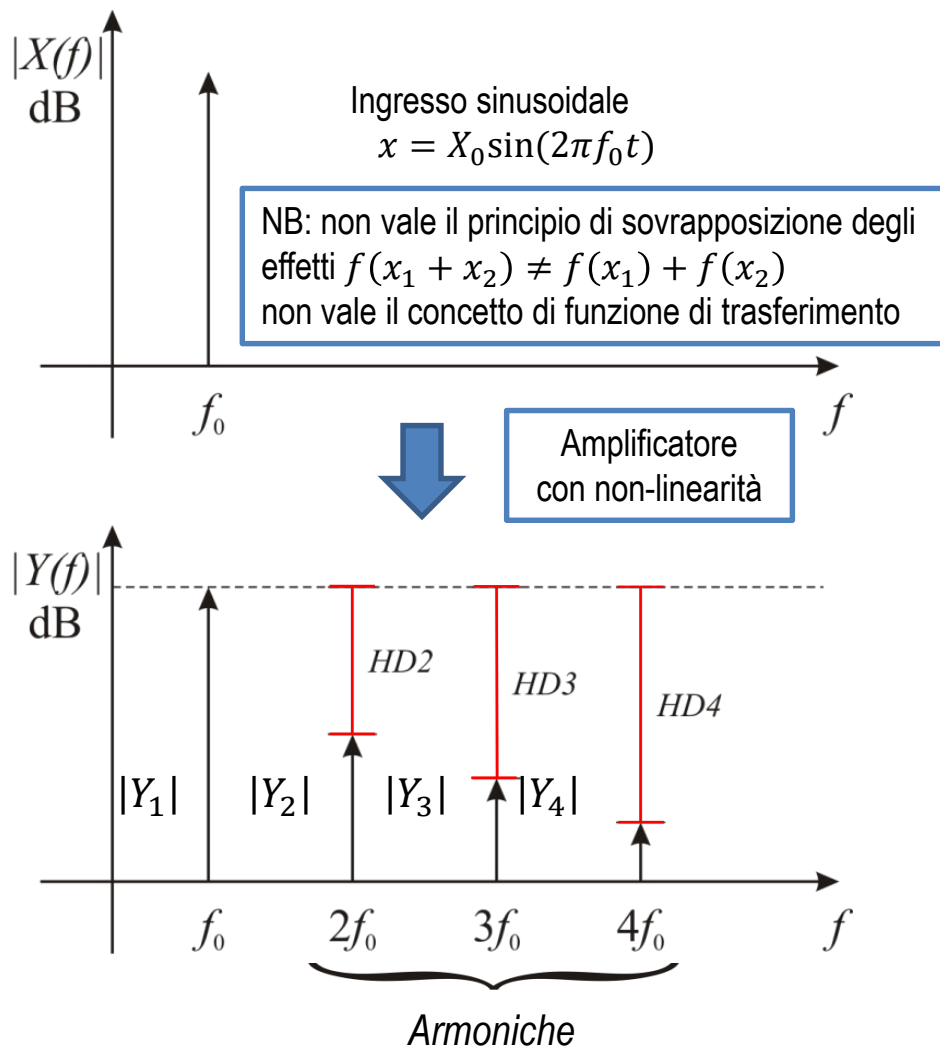
$$y_3 = A_3x^3 = A_3X_0^3 \sin^3(\omega_0 t) = \frac{A_3X_0^3}{4} [3 \sin(\omega_0 t) - \sin(3\omega_0 t)]$$

errore alla componente a
frequenza del **frequenza tripla $3\omega_0$**
segnale

- In generale, nonlinearity polinomiale di **ordine n** dà luogo ad errore a **frequenza $n\omega_0$**



Distorsione non-lineare nel dominio della frequenza



- Per ingresso sinusoidale monocromatico
 $x = X_0 \sin(2\pi f_0 t)$

Nell'uscita, a causa della non linearità, compaiono componenti spettrali alle **armoniche** nf_0 della frequenza in ingresso \rightarrow *distorsione armonica*.

Distorsione armonica di ordine n

$$HD_n = \left| \frac{Y_n}{Y_1} \right|_{dB}$$

Distorsione armonica totale

$$THD = \left| \frac{\sum_{n=2}^{+\infty} Y_n^2}{Y_1^2} \right|_{dB}$$

