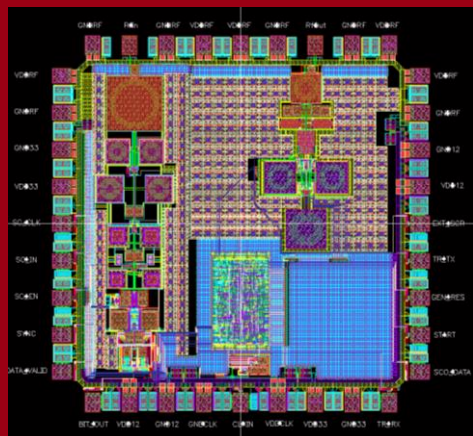


Fondamenti di Elettronica

02

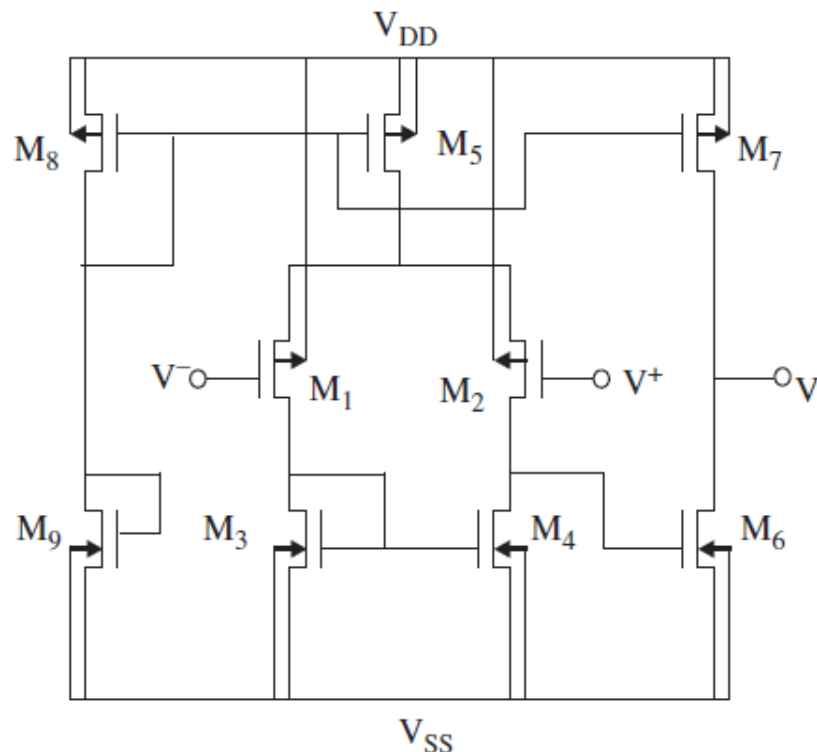
Proprietà generali degli amplificatori



Enrico Zanoni

enrico.zanoni@unipd.it

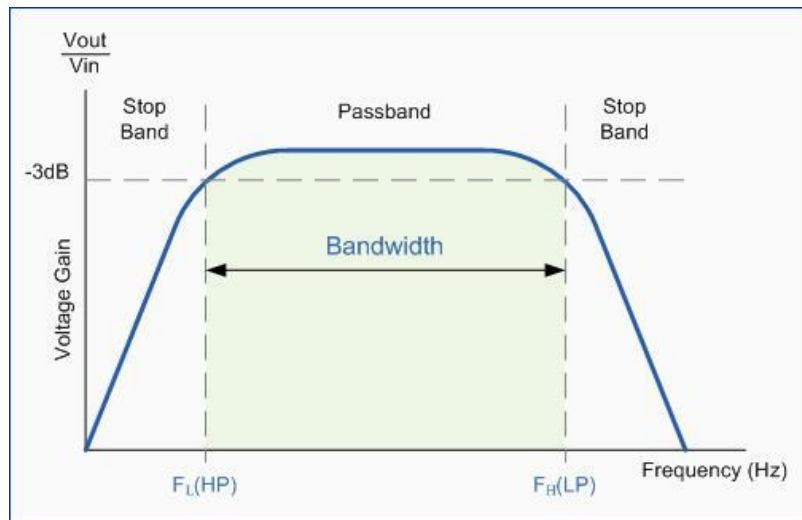
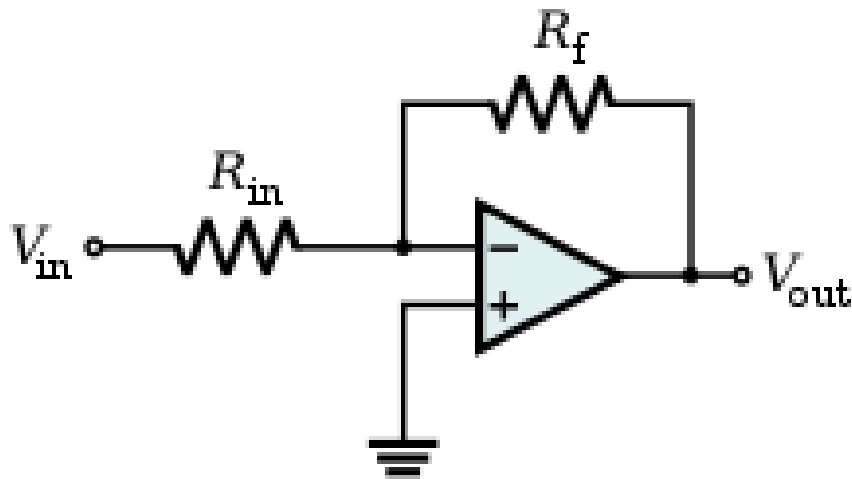
prima parte : modelli degli amplificatori



- obiettivo finale: progettare e simulare con LTSPICE un amplificatore operazionale integrato
- inizieremo analizzando le proprietà generali degli amplificatori
- immediatamente dopo definiremo un amplificatore «ideale» che chiamiamo amplificatore «operazionale» perchè permette di fare operazioni (somma, sottrazione, moltiplicazione, derivazione, integrazione...) direttamente sui segnali analogici
- per ora non ci interessa come funziona nè la sua struttura interna: lo consideriamo un «blocco» analogico con certe proprietà

Prima parte: amplificatori operazionali

I blocchi fondamentali dell'elettronica analogica. L'amplificatore operazionale

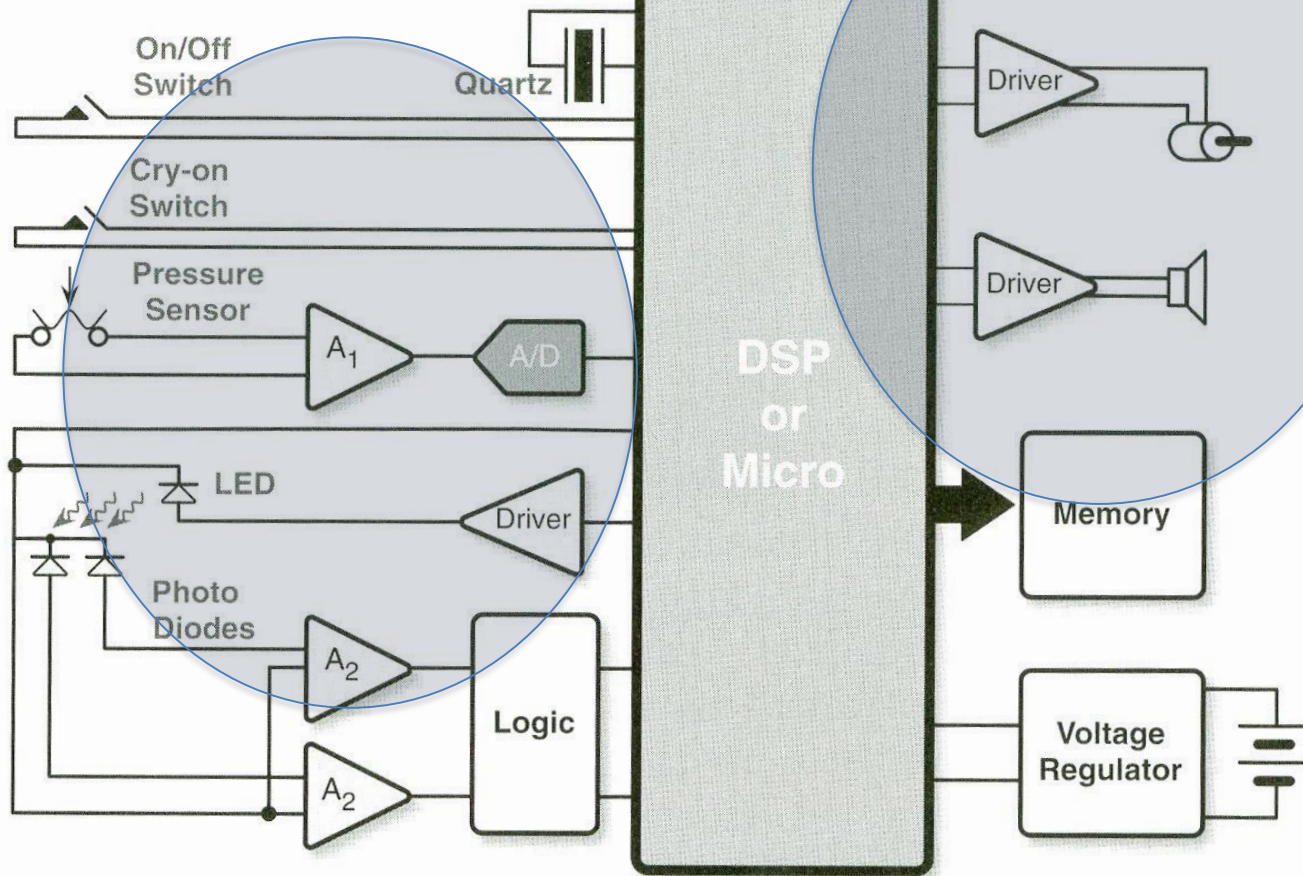


- concetti di linearità/non linearità, distorsione
- stabilizzazione delle caratteristiche grazie alla retroazione
- risposta in frequenza degli amplificatori
- efficienza
- progetto di semplici amplificatori
- realizzazione analogica delle operazioni di somma, sottrazione, derivazione, integrazione
- il simulatore circuitale SPICE

Sistema elettronico: parti analogiche e digitali

sensori

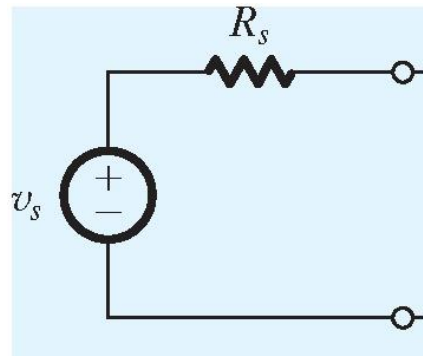
attuatori



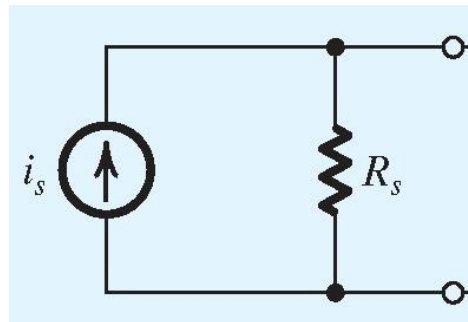
come modelliamo sensore e amplificatore ?



Sensori o *trasduttori* (trasformano una grandezza fisica in un segnale elettrico); sono modellati come generatori di tensione o di corrente. In genere il modello di un sensore comprende resistenze (R), capacità (C) e induttanze; per ora consideriamo solo gli elementi resistivi



il sensore fornisce una tensione di uscita \rightarrow equivalente di Thevenin

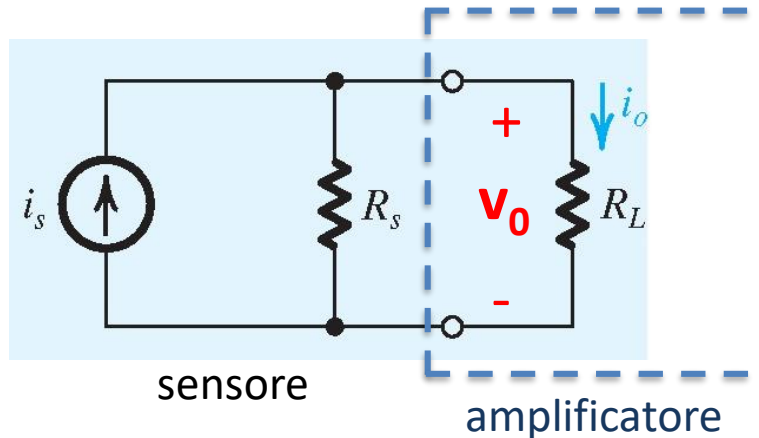


il sensore fornisce una corrente di uscita \rightarrow equivalente di Norton

La relazione tra le due rappresentazioni è data da $v_s = i_s R_s$

Effetto di carico dell'amplificatore

collegiamo un sensore con uscita in corrente all'amplificatore
(l'ingresso dell'amplificatore è modellato dalla resistenza R_L)
Quanto vale la corrente applicata all'ingresso dell'amplificatore ?



chiamiamo

i_s la corrente fornita dal sensore

i_0 la corrente che entra in R_L
... per essere **amplificata** 😊

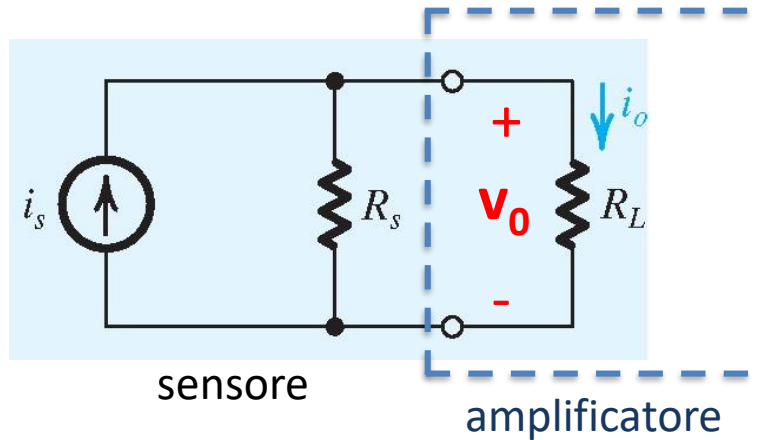
i_{Rs} la corrente che finisce nella resistenza
equivalente di Norton del sensore
... questa è **persa** ☹

$$i_0 = \frac{v_0}{R_L}; \quad i_{Rs} = \frac{v_0}{R_s}; \quad i_0 + i_{Rs} = i_s$$

$$\frac{v_0}{R_L} + \frac{v_0}{R_s} = i_s = v_0 \frac{R_s + R_L}{R_s R_L}; \quad v_0 = i_s \frac{R_s R_L}{R_s + R_L}$$

equivalente alle due
resistenze in parallelo

Effetto di carico dell'amplificatore: ingresso in corrente



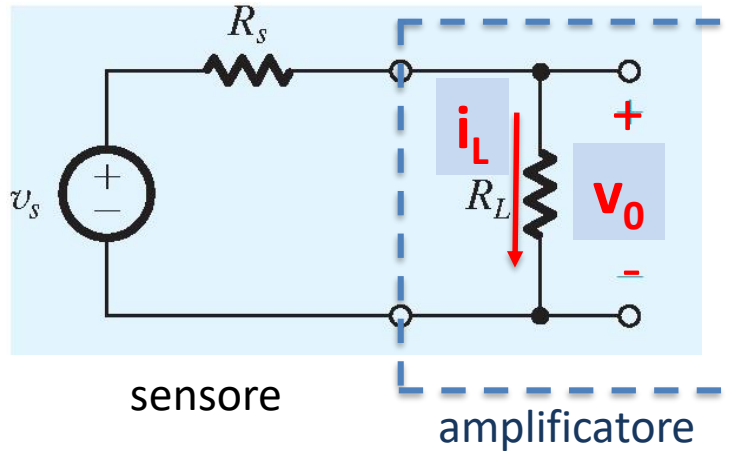
$$i_0 = \frac{v_0}{R_L}; \quad i_{Rs} = \frac{v_0}{R_s}; \quad i_0 + i_{Rs} = i_s$$

$$v_0 = i_s \frac{R_s R_L}{R_s + R_L} \Rightarrow i_0 = \frac{v_0}{R_L} = i_s \frac{R_s}{R_s + R_L} = i_s \frac{1}{1 + \frac{R_L}{R_s}}$$

partitore di corrente

Per fare in modo che il segnale di corrente applicato all'amplificatore non venga attenuato deve essere $R_L/R_s \ll 1$

Effetto di carico dell'amplificatore: ingresso in tensione



$$v_o = i_L R_L; \quad i_{R_S} = \frac{v_s - v_o}{R_S}; \quad i_L + i_{R_S} = i_s$$

$$i_L = \frac{v_s}{R_S + R_L} \Rightarrow v_o = v_s \frac{R_L}{R_S + R_L} = v_s \frac{1}{1 + \frac{R_S}{R_L}}$$

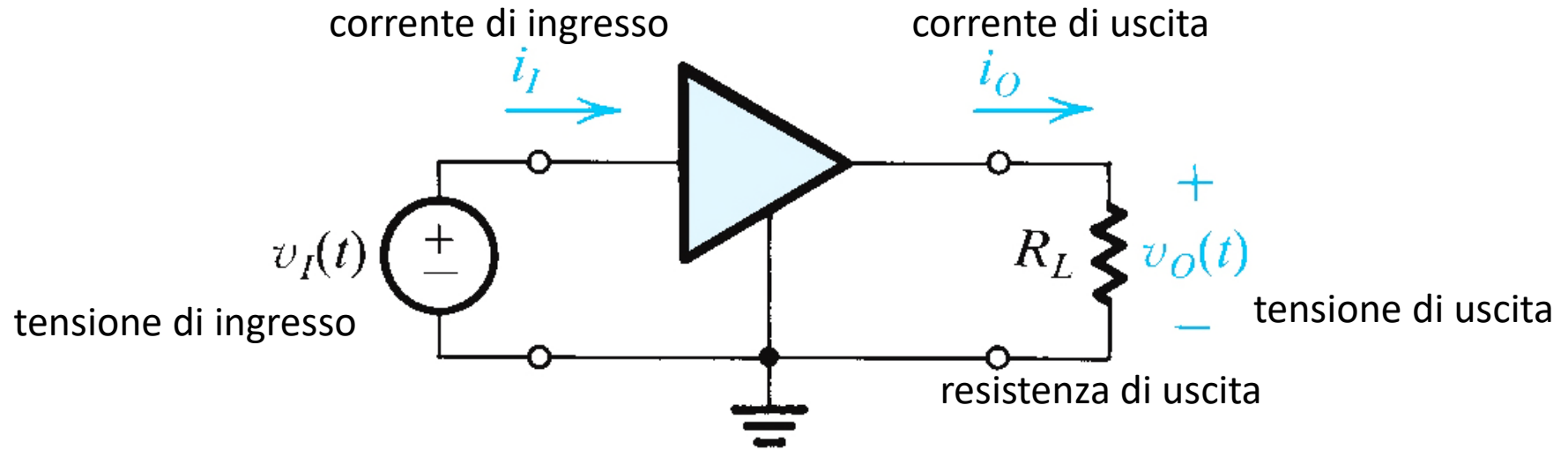
partitore di tensione

Per fare in modo che il segnale di tensione applicato all'amplificatore non venga attenuato deve essere $R_S/R_L \ll 1$ (disuguaglianza opposta rispetto all'amplificatore di corrente)

Amplificazione del segnale

- Linearità : la relazione tra il segnale di uscita $v_o(t)$ e il segnale di ingresso $v_i(t)$ è data da $v_o(t) = Av_i(t)$, dove A è l'amplificazione, costante.
- In questo modo il segnale di uscita è una replica esatta, di maggiore ampiezza, del segnale di ingresso.
- Se invece la relazione tra $v_o(t)$ e $v_i(t)$ contiene potenze di $v_i(t)$ di ordine superiore si parla di «DISTORSIONE NON LINEARE»
- A è il «guadagno» dell'amplificatore
- guadagno = una delle specifiche di progetto; in generale non basta un singolo amplificatore per soddisfare tutte le specifiche → si usano più amplificatori in cascata «AMPLIFICATORI MULTISTADIO»
- L'amplificatore all'ingresso = «preamplificatore»
- L'amplificatore all'uscita = amplificatore di potenza

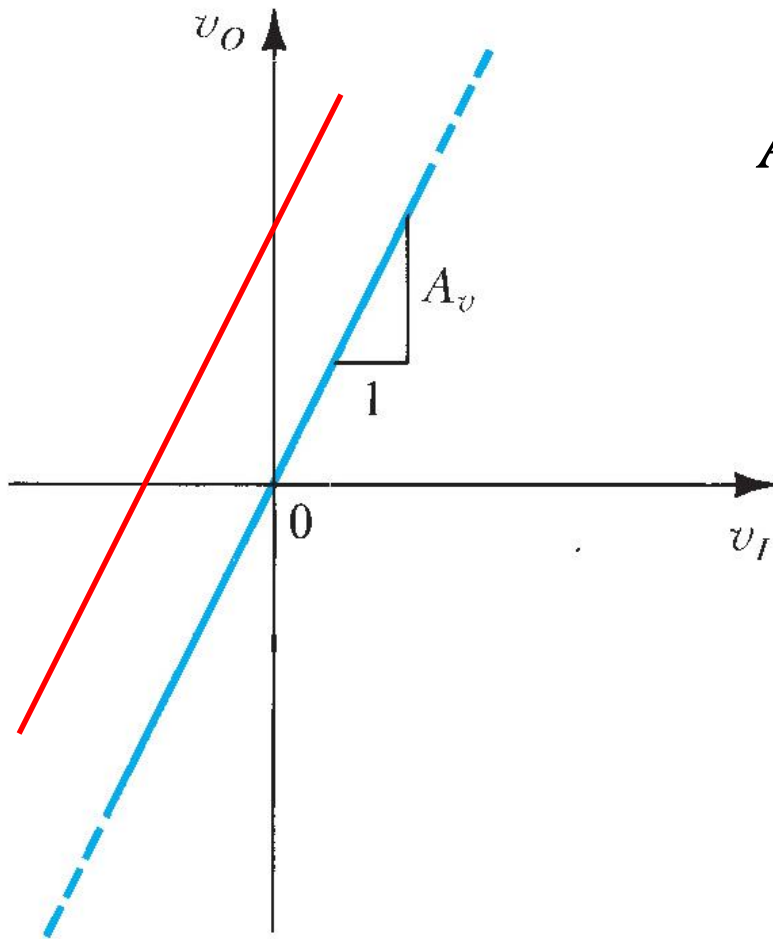
Amplificatore di tensione (definizioni)



«**massa**» = il nodo che
poniamo alla **tensione di riferimento = 0 V**
rispetto al quale sono definite tutte le
altre tensioni

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} \quad \text{guadagno in tensione}$$

Caratteristica di trasferimento dell'amplificatore



$$A_V = \frac{v_o}{v_i} \quad \text{guadagno in tensione}$$

nota bene : abbiamo implicitamente assunto che per $v_i = 0$ V, sia $v_o = 0$ V.

In generale però la tensione di uscita potrebbe avere una componente continua (=indipendente dal segnale di ingresso, $v_o = A_v * v_i + V_{DC}$)

Guadagno in potenza

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} \quad \text{guadagno in tensione [V/V]}$$

$$A_I = \frac{i_o}{i_i} \quad \text{guadagno in corrente [A/A]}$$

$$A_P = \frac{\text{potenza sul carico } P_L}{\text{potenza in ingresso } P_i} = \frac{v_o}{v_i} \frac{i_o}{i_i} = A_V A_I \quad [W/W]$$

I guadagni espressi come rapporti di grandezze omogenee si possono esprimere in decibel [dB].

$$\text{Guadagno [dB]} = 20 \log_{10} |A| \quad (\text{per corrente o tensione})$$

$$\text{Guadagno [dB]} = 10 \log_{10} |A_P| \quad (\text{per la potenza})$$

$P = V^2/R = I^2 R$ La potenza dipende dal quadrato di V o I \rightarrow

$$A_{\text{PdB}} = 10 \log_{10} |A_P|$$

Guadagno in valore assoluto e in dB

Valore del guadagno negativo → tra uscita e ingresso c'è una differenza di fase di 180°. Il segnale di uscita ha il segno opposto rispetto a quello di ingresso.

Valore del guadagno inferiore a 1 → il circuito ATTENUA il segnale (anziché amplificarlo). In questo caso il guadagno in DECIBEL è NEGATIVO.

Guadagno [dB] = $20 \log_{10} |A|$ (per corrente o tensione)

$$100\text{dB} \rightarrow |A| = 10^5$$

$$20\text{dB} \rightarrow |A| = 10$$

$$10\text{dB} \rightarrow |A| = 3.162$$

$$1\text{dB} \rightarrow |A| = 1.122$$

$$|A| = 1000; A_{\text{dB}} = 60\text{dB}$$

$$|A| = 100; A_{\text{dB}} = 40\text{dB}$$

$$|A| = 10; A_{\text{dB}} = 20\text{dB}$$

$$|A| = 1; A_{\text{dB}} = 0\text{dB}$$

dB = 20*log del rapporto di grandezze omogenee. (10* per le potenze)

proprietà dei logaritmi →
guadagno totale in dB =
somma dei guadagni parziali in dB

Il dBm è invece un'unità di misura della potenza:

$$dB_m = 10 \log_{10} \frac{P}{1\text{mW}}$$

Sorgenti di radiazione elettromagnetica (potenza in dBm)

Power level	Power	Notes
420 dBm	1×10^{39} W	Cygnus A, the most powerful known source of radio waves
296 dBm	3.846×10^{26} W	Total power output of the Sun
80 dBm	100 kW	Typical transmission power of FM radio station with 50-kilometre (31 mi) range
60 dBm	1000 W	Typical combined radiated RF power of microwave oven elements
55 dBm	~300 W	Typical single-channel RF output power of a Ku-band geostationary satellite
50 dBm	100 W	Typical total thermal radiation emitted by a human body, peak at 31.5 THz (9.5 μ m)
40 dBm	10 W	Typical maximal output RF power from a ham radio HF transceiver
37 dBm	5 W	Typical PLC transmission power
36 dBm	4 W	Typical maximal output RF power from a handheld ham radio VHF/UHF transceiver
36 dBm	4 W	Typical maximal output power for a citizens band radio station (27 MHz) in many countries
33 dBm	2 W	Maximal output from a UMTS/3G mobile phone (Power class 1 mobiles)
33 dBm	2 W	Maximal output from a GSM850/900 mobile phone
30 dBm	1W	DCS or GSM 1,800/1,900 MHz mobile phone. Also, maximal power allowed by the FCC for American amateur radio licensees to fly radio-controlled aircraft or operate RC models of any other type on the amateur radio bands in the US.

From Wikipedia <https://en.wikipedia.org/wiki/DBm> (unchecked)

Cygnus - A



Sorgenti di radiazione elettromagnetica (potenza in dBm)

Power level	Power	Notes
27 dBm	500 mW	Typical cellular phone transmission power Maximal output from a UMTS/3G mobile phone (Power class 2 mobiles)
24 dBm	251 mW	Maximal output from a UMTS/3G mobile phone (Power class 3 mobiles)
		1,880–1,900 MHz DECT (250 mW per 1,728 kHz channel). Wireless LAN IEEE 802.11a (20 MHz-wide channels) in the 5 GHz subbands
23 dBm	200 mW	IEEE 802.11a wireless LAN in 5 GHz subband (20-40 Mhz wide channels)
21 dBm	125 mW	Maximal output from a UMTS/3G mobile phone (Power class 4 mobiles)
20 dBm	100 mW	IEEE 802.11b/g wireless LAN 20 MHz-wide channels in the 2.4 GHz Wi-Fi/ISM band (5 mW/MHz). Bluetooth Class 1 radio. Maximal output power from unlicensed AM transmitter per U.S. FCC rules 15.219 ^[7]
15 dBm	32 mW	Typical wireless LAN transmission power in laptops
10 dBm	10 mW	
7 dBm	5.0 mW	Common power level required to test the automatic gain control circuitry in an AM receiver
4 dBm	2.5 mW	Bluetooth Class 2 radio, 10 m range
0 dBm	1.0 mW	Bluetooth standard (Class 3) radio, 1 m range

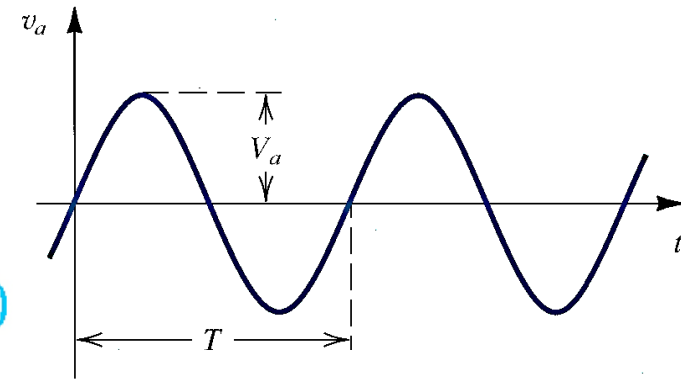
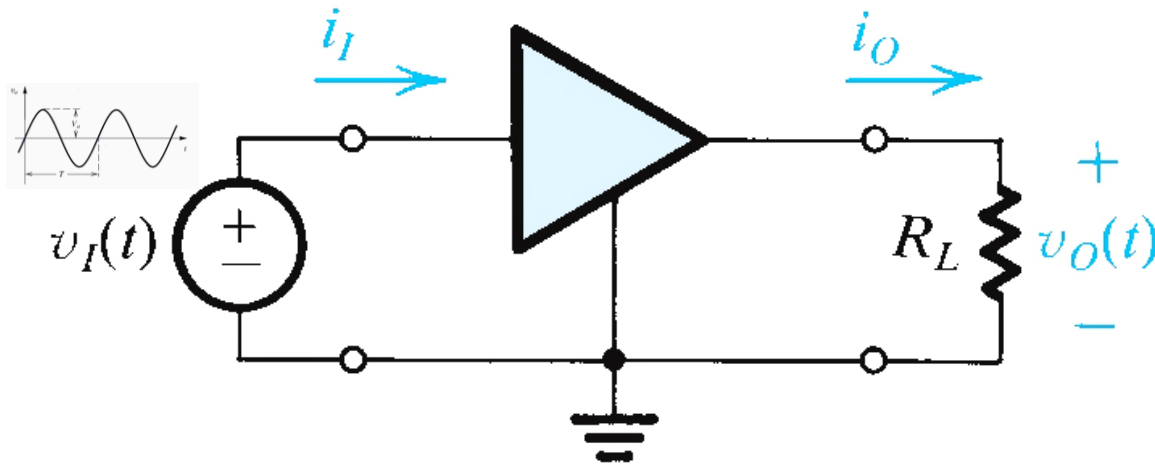
From Wikipedia <https://en.wikipedia.org/wiki/DBm> (unchecked)

Sorgenti di radiazione elettromagnetica (potenza in dBm)

Power level	Power	Notes
-10 dBm	100 μ W	Maximal received signal power of wireless network (802.11 variants)
-13 dBm	50.12 μ W	Dial Tone for the Precise Tone Plan found on public switched telephone networks in North America
-60 dBm	1.0 nW	The Earth receives one nanowatt per square metre from a magnitude +3.5 star
-73 dBm	50.12 picoW	"S9" signal strength, a strong signal, on the S meter of a typical ham or shortwave radio receiver
-80 dBm	10 pW	
-100 dBm	0.1 pW	Minimal received signal power of wireless network (802.11 variants)
-111 dBm	8 fW = $8 \cdot 10^{-15}$ W	Thermal noise floor for commercial GPS single-channel signal bandwidth (2 MHz)
-127.5 dBm	0.178 fW	Typical received signal power from a GPS satellite
-174 dBm	0.004 attoW = $0.004 \cdot 10^{-18}$ W	Thermal noise floor for 1 Hz bandwidth at room temperature (20 °C)
-192.5 dBm	0.056 zeptoW = $56 \text{ yoctoW} = 56 \cdot 10^{-24}$ W	Thermal noise floor for 1 Hz bandwidth in outer space (4 kelvins)
$-\infty$ dBm	0 W	Zero power is not well-expressed in dBm (value is negative infinity)

From Wikipedia <https://en.wikipedia.org/wiki/DBm> (unchecked)

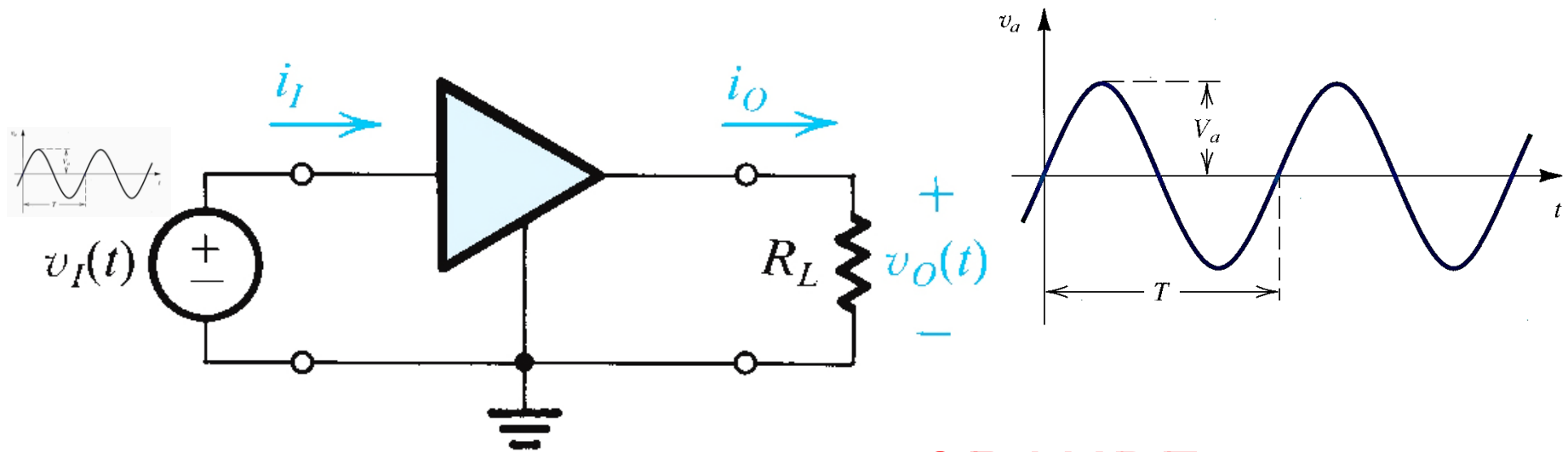
Amplificatore lineare



segnale di tensione sinusoidale
di ampiezza V_a e frequenza
 $f = 1/T$ [Hz].
La pulsazione o frequenza angolare
è $\omega = 2\pi f$ [rad/s]

tutto lineare !
ma è tutto qui ???

Amplificatore lineare

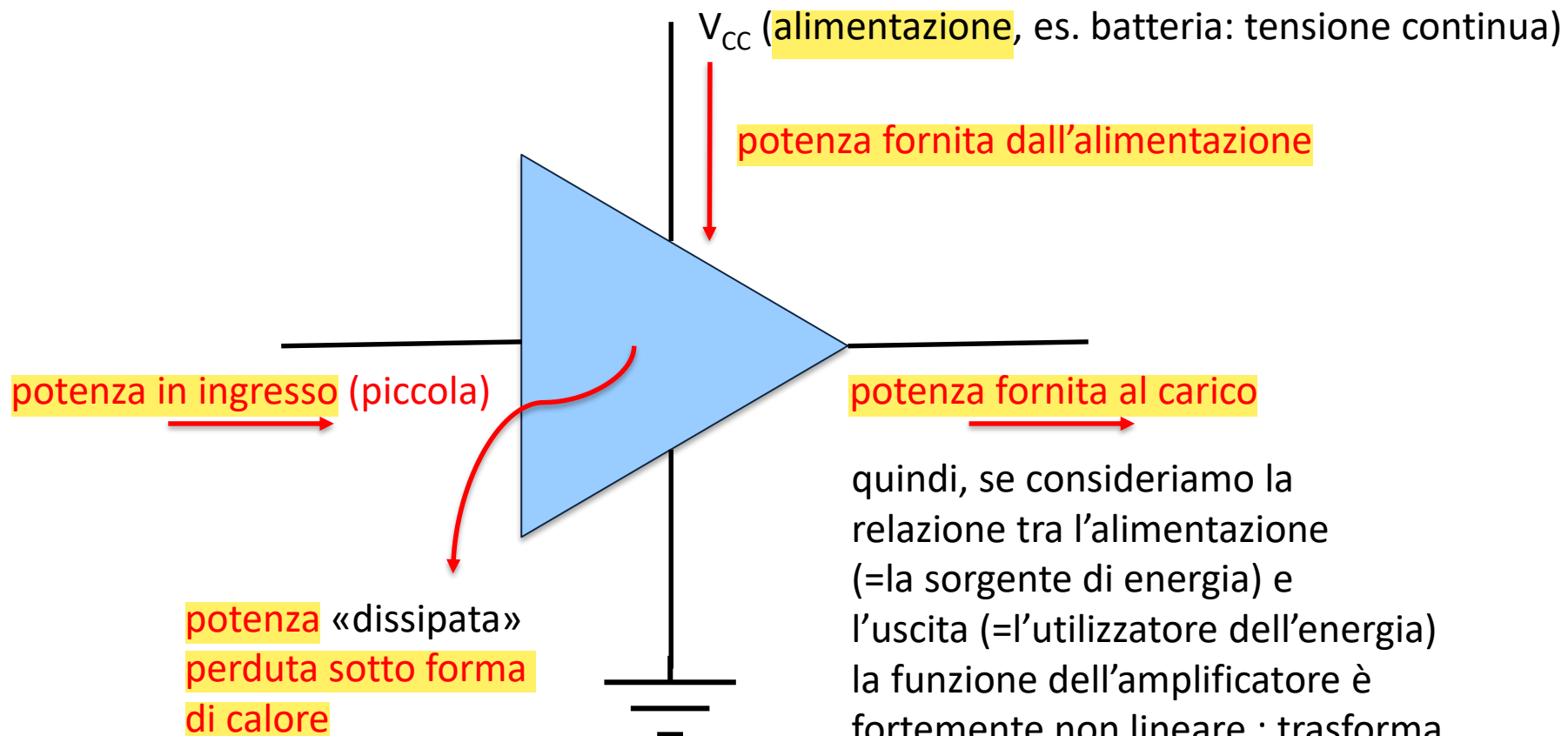


potenza del segnale di ingresso
piccola o trascurabile

GRANDE potenza
del segnale di uscita

è necessario fornire energia all'amplificatore

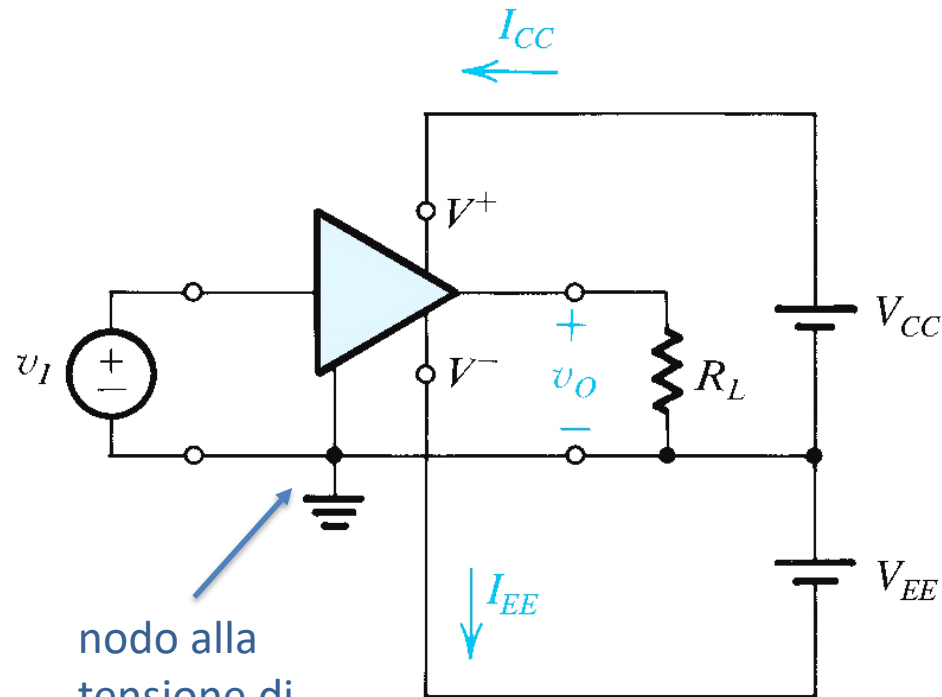
Amplificatore e alimentazione



L'efficienza di un
amplificatore è
inferiore al 100% !

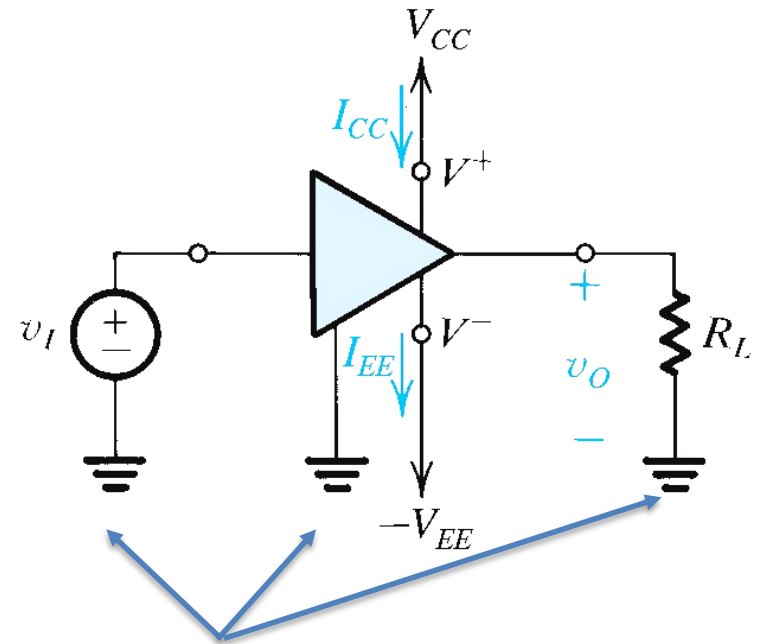
quindi, se consideriamo la
relazione tra l'alimentazione
(=la sorgente di energia) e
l'uscita (=l'utilizzatore dell'energia)
la funzione dell'amplificatore è
fortemente non lineare : trasforma
una tensione continua nel
segnale di uscita (variabile nel tempo
con una certa forma d'onda)

amplificatore con alimentazione duale



nodo alla
tensione di
riferimento
 $V = 0\text{ V}$
«massa»

alimentazione duale:
ci sono sia una tensione
positiva (V_{CC}) che una
negativa (V_{EE}) rispetto
a massa

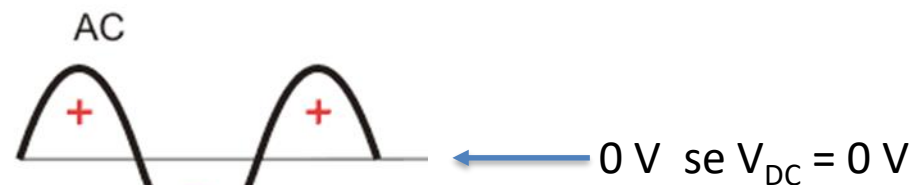
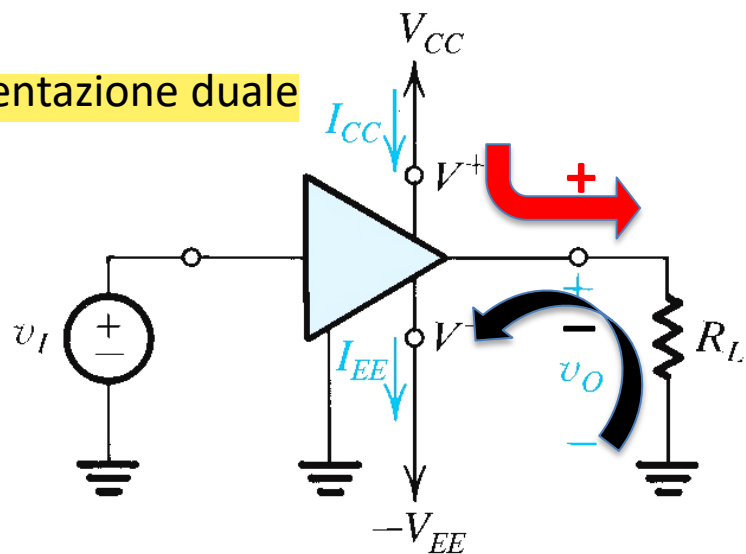


questi tre nodi coincidono
col nodo di massa

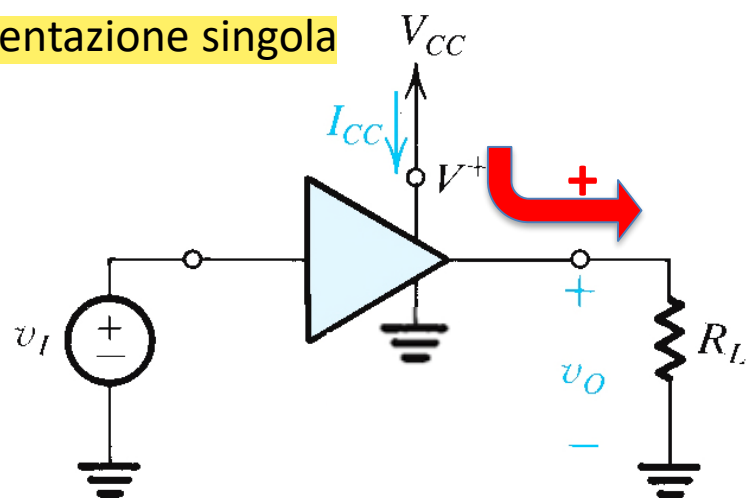
di massa ce n'è una sola !!!
anche se ne disegniamo tre

Alimentazione e forma del segnale

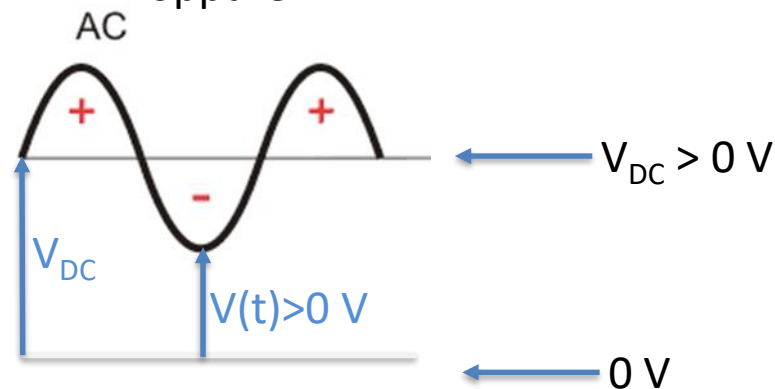
alimentazione duale



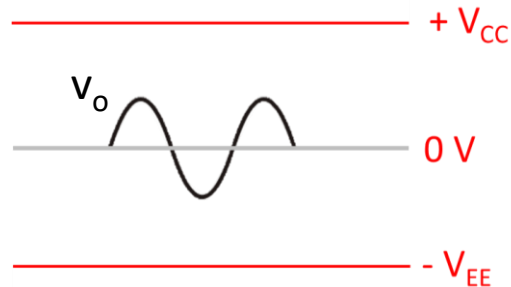
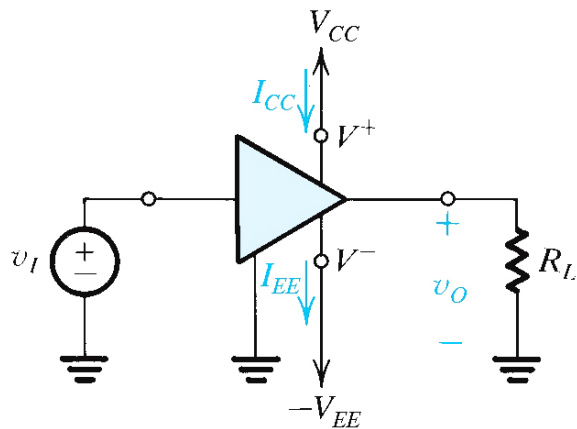
alimentazione singola



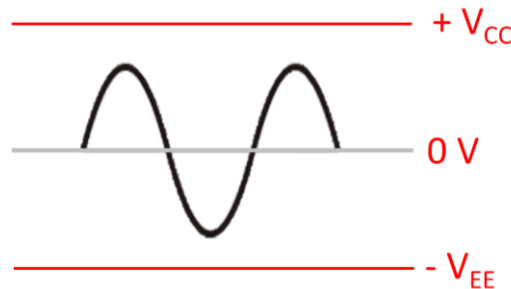
oppure:



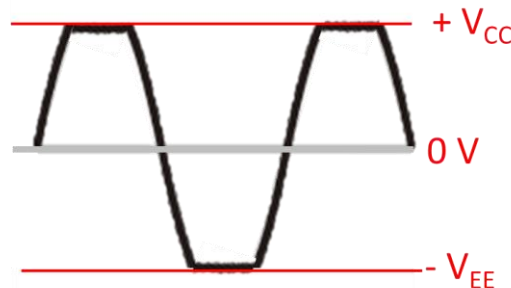
Distorsione da «clipping» o «saturazione» dell'amplificatore



forma d'onda della
tensione di uscita
all'aumentare della
tensione di ingresso



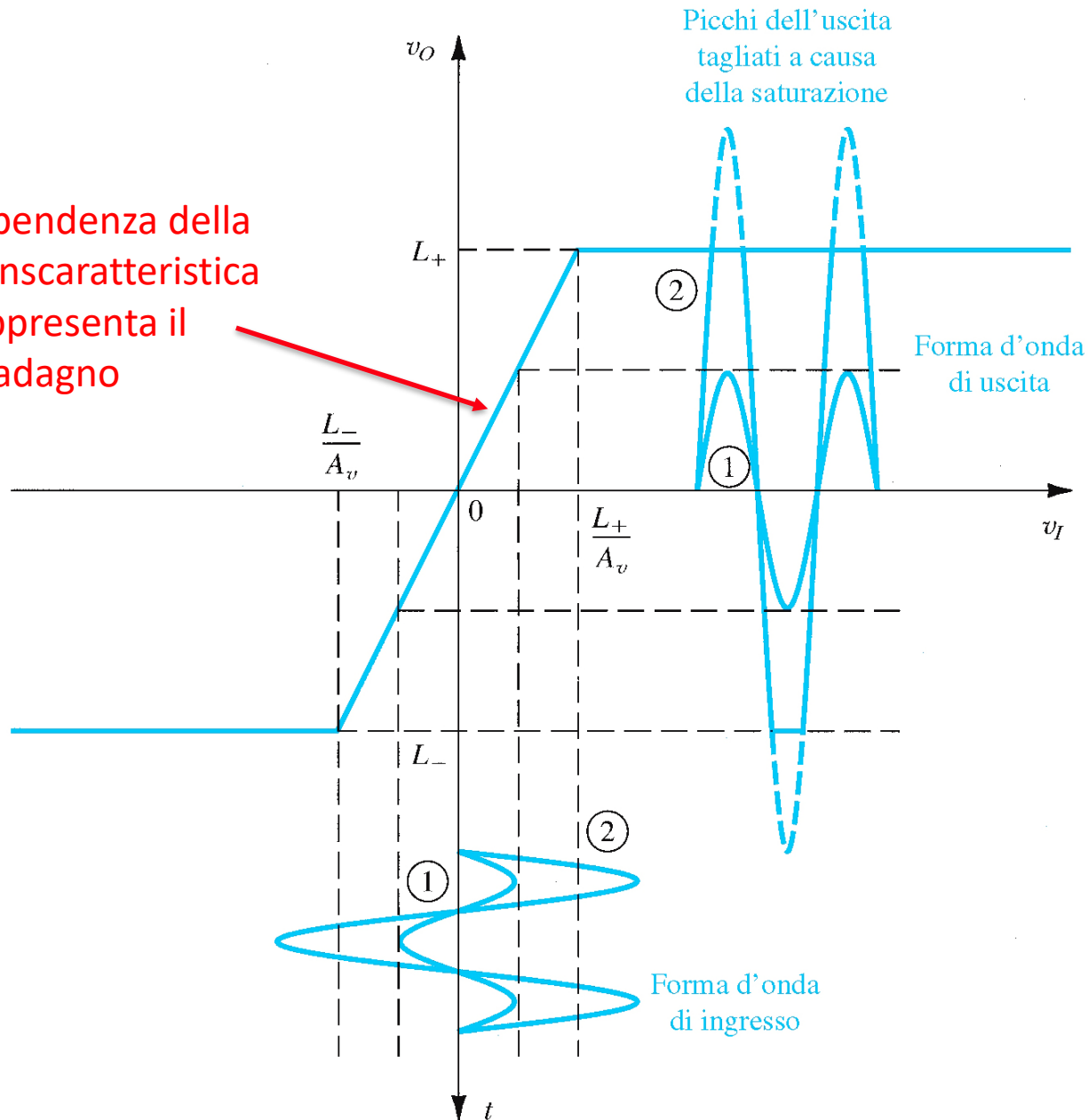
v_o segue v_i in proporzione
al guadagno : $V_o = A_v i$



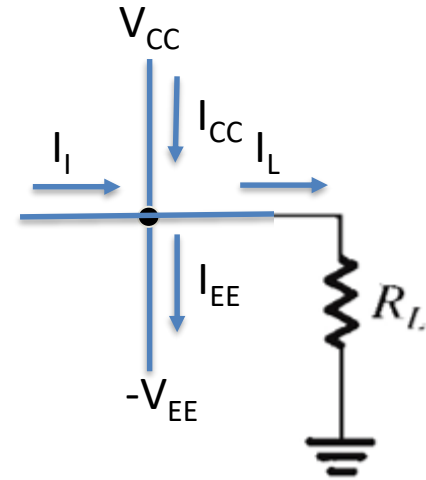
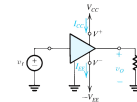
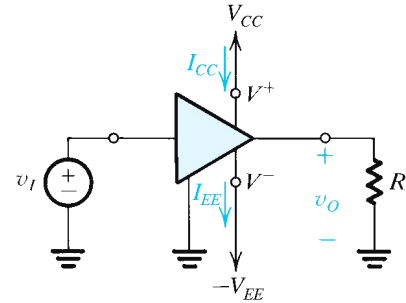
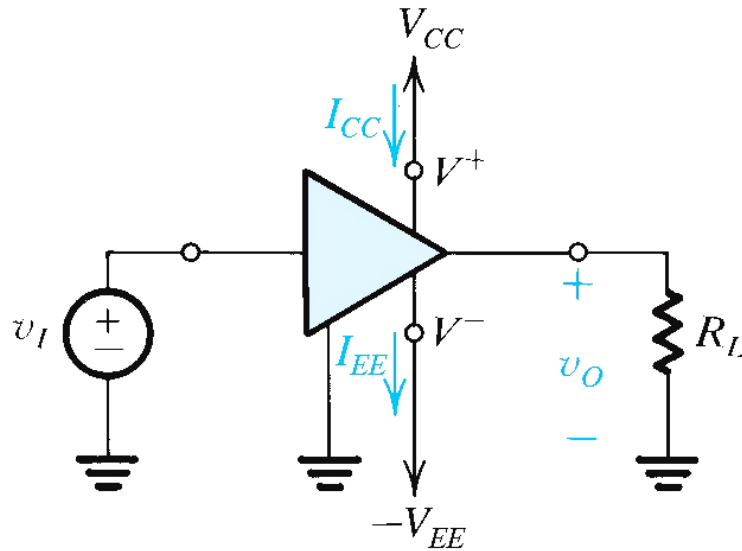
la tensione di uscita non può
superare il valore delle tensioni
di alimentazione e
quindi satura a valori in modulo
leggermente inferiori a $+V_{CC}$ e $-V_{EE}$
quando il segnale di
ingresso è troppo ampio.
«DISTORSIONE DA CLIPPING»

Transcaratteristica : v_o in funzione di v_i

la pendenza della
transcaratteristica
rappresenta il
guadagno



Efficienza di un amplificatore



- $P_{DC} = V_{CC} I_{CC} + V_{EE} I_{EE}$
- $P_{DC} + P_i = P_L + P_{dissipata}$

$$I_{CC} + I_i = I_{EE} + I_L$$

EFFICIENZA O RENDIMENTO DI UN AMPLIFICATORE

$$\eta = \frac{P_L}{P_{DC}} \%$$

Amplificatore con alimentazione duale $\pm 10\text{ V}$

Questo amplificatore fornisce una tensione di uscita sinusoidale di 9 V di picco con 1 V di picco di tensione di ingresso, con un carico di $R_L = 1\text{ k}\Omega$

L'assorbimento di corrente DC da ciascuna delle due alimentazioni è 9.5 mA

La corrente di ingresso è sinusoidale con un picco pari a 0.1 mA

Calcolare A_V , A_I , A_P , P_{DC} , $P_{dissipata}$, η

- $A_V = v_o/v_i = 9\text{ [V/V]} \rightarrow 20\log 9 = 19.1\text{ dB}$;
- $i_o = v_o/R_L = 9/1\text{k} = 9\text{ mA}$; $A_I = i_o/i_i = 9/0.1 = 90\text{ [A/A]} \rightarrow 20\log 90 = 39.1\text{ dB}$
- Le potenze di uscita e di ingresso sono rispettivamente
- $P_L = v_{oRMS} i_{oRMS} = \frac{9V}{\sqrt{2}} \frac{9mA}{\sqrt{2}} = 40.5\text{ mW}$
- $P_i = v_{iRMS} i_{iRMS} = \frac{1V}{\sqrt{2}} \frac{0.1mA}{\sqrt{2}} = 0.05\text{ mW}$

Amplificatore con alimentazione duale $\pm 10\text{ V}$

- $A_p = P_L / P_i = 40.5 / 0.05 = 810 \text{ [W/W]} \rightarrow 10 \log 810 = 29.1 \text{ dB}$
- $A_p = A_v * A_i \rightarrow 10 \log A_p = 10 \log A_v + 10 \log A_i = (1/2)A_{v\text{dB}} + (1/2)A_{i\text{dB}} =$
• $= (1/2)(39.1 + 19.1) = 58.2/2 = 29.1 \text{ dB}$
- $P_{DC} = V_{CC} I_{CC} + V_{EE} I_{EE} = 10 \text{ V} * 9.5 \text{ mA} + 10 \text{ V} * 9.5 \text{ mA} = 190 \text{ mW}$
- $P_{\text{dissipata}} = P_{DC} + P_i - P_L = 190 + 0.05 - 40.5 \text{ mW} = 149.55 \text{ mW}$
- Efficienza $\eta = P_L / P_{DC} = 40.5 / 190 \% = 21.3\%$

Amplificazione e linearità

Modelli per la sorgente (Thevenin, Norton)

Guadagni di tensione e corrente, guadagni in dB

Misura di potenza in dBm

Alimentazione singola e duale

Guadagno di potenza, efficienza di un amplificatore

Distorsione da clipping