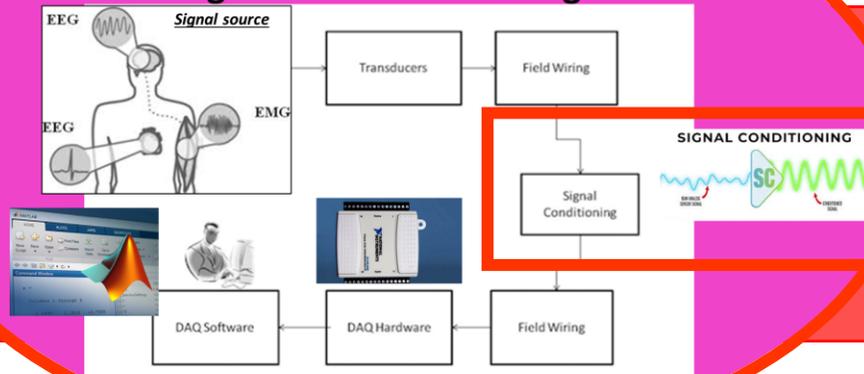


Sistemi di acquisizione dati: dalla sorgente all'analisi del segnale



LEZIONE 4:

Condizionamento dei segnali biomedici

Misure e acquisizione di dati biomedici

Sarah Tonello, PhD

Dip. Ingegneria dell'Informazione

Università di Padova

Outline

- Condizionamento del segnale

- Condizioni di non distorsione

- Amplificatore operazionale:

richiami e principali utilizzi circuitali

QUIZ 1



- Amplificatore da strumentazione

- Amplificatore di guadagno programmabile

- Amplificatore di isolamento

QUIZ 2

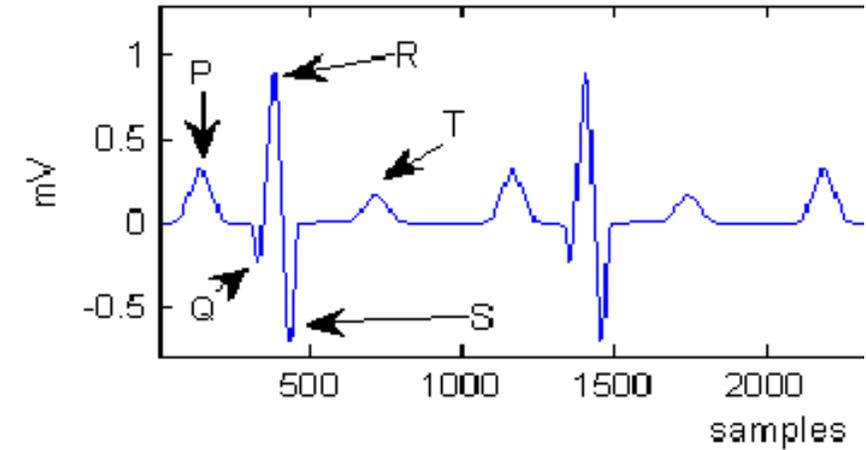
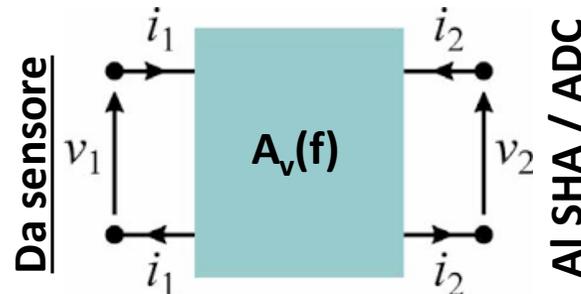
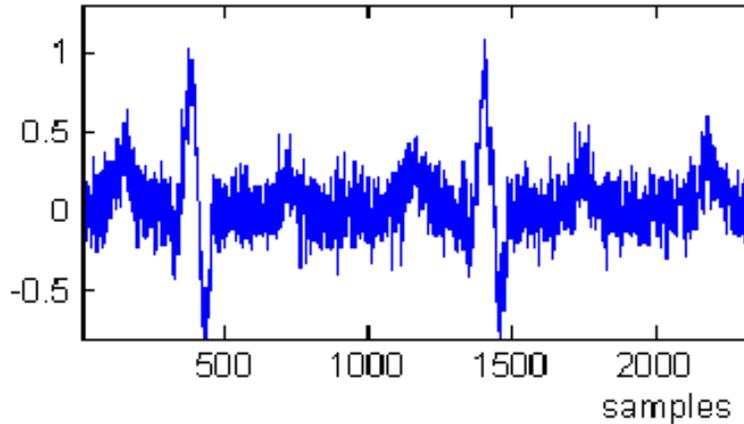


Condizionamento del segnale: generalità

SEGNALE IN USCITA DA TRASDUTTORE

CONDIZIONAMENTO DEL SEGNALE:
elaborazione preliminare del segnale per renderlo adatto ad essere trattato dal sistema di acquisizione e misura

Segnale pronto per ADC



Condizioni in cui operare:

- **Generatore di segnale e carico di caratteristiche date**: non sono considerabili parametri di progetto
- **Possibile presenza di una componente di rumore** sovrapposta al segnale utile

Modellato con doppio bipolo lineare con funzione di trasferimento data da $A_v(f)$, trasformazioni lineari ed invarianti nel tempo

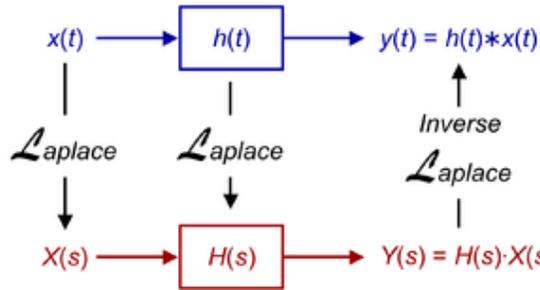
Funzioni minime da garantire:

- **Adattamento** del livello del segnale ai limiti imposti in uscita
- **Minimizzazione dell'effetto di carico** prodotto sulla sorgente di segnale
- **Realizzazione di una impedenza di uscita** adatta
- **Ottimizzazione del rapporto segnale/rumore**

Condizionamento: Condizioni di non distorsione

N.B. operazioni di condizionamento del segnale devono essere realizzate in modo da **non alterarne le caratteristiche essenziali.**

Time domain



DOMINIO NEL TEMPO

DOMINIO DELLA FREQUENZA

$$s_{out}(t) = G_0 \cdot s_{in}(t - \tau_0)$$

$$\frac{S_{out}(f)}{S_{in}(f)} = G(f) = G_0 e^{-j2\pi f \tau_0}$$

Frequency domain

→ Questo comportamento si può riassumere in due condizioni:

1.

GUADAGNO COSTANTE INDIPENDENTE DALLA FREQUENZA

- guadagno costante ed indipendente dalla frequenza (ossia: $|G(f)| = G_0$);

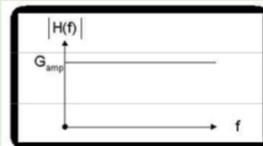


Figura 2 - Guadagno di un amplificatore ideale

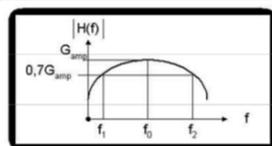


Figura 3 - Amplificatore reale

Nei dispositivi reali condizioni diverse dal caso ideale!!

$$|G(f) - G_0| \leq \Delta_G \quad \text{per:} \quad f_{min} \leq f \leq f_{MAX}$$

$$\delta_G = \frac{\Delta_G}{G_0}$$

Scostamento massimo

indica di quanto può differire al massimo il guadagno dal valore ideale (**flatness**).
N.B. fattore che può contribuire all'incertezza complessiva di una misura.

Banda passante

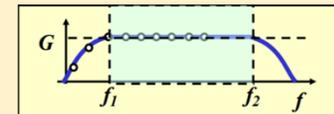
Intervallo di frequenze per cui vale la condizione di non distorsione, quindi ho un guadagno costante

In caso di filtro passa basso $f_{min} = 0$

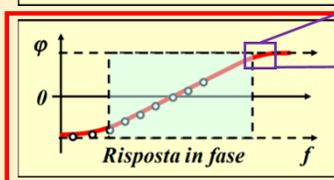
2.

FASE LINEARE PROPORZIONALE ALLA FREQUENZA

- fase lineare, ossia direttamente proporzionale alla frequenza (ossia: $\arg[G(f)] = -2\pi f \tau_0$). In alternativa, si parla di "ritardo di gruppo costante", dove con ritardo di gruppo si intende la derivata della fase rispetto alla pulsazione $\omega = 2\pi f$.



Risposta in ampiezza

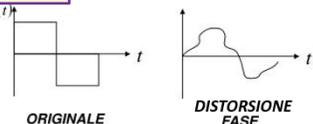


Risposta in fase

Si può dimostrare che se la fase dipende linearmente dalla frequenza (cioè se cresce o diminuisce con andamento rettilineo in funzione di f mantenendo una pendenza costante), allora il segnale di uscita viene semplicemente **traslato nel tempo** rispetto al segnale di ingresso, **senza subire distorsioni**.



E dove la fase cambia pendenza?



- guadagno costante ed indipendente dalla frequenza (ossia: $|G(f)| = G_0$);

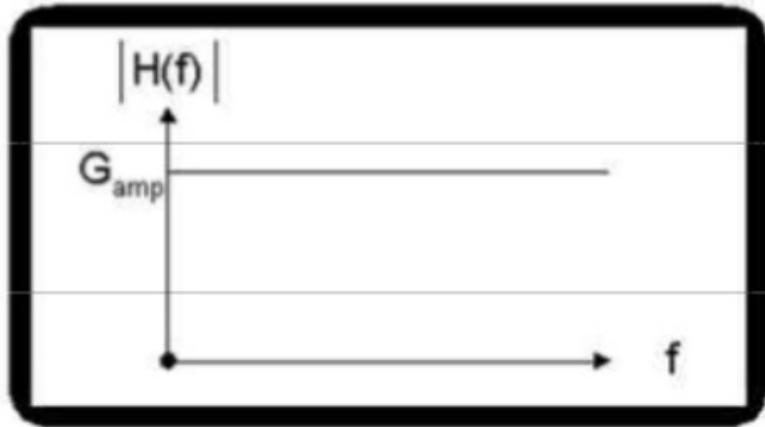


Figura 2 - Guadagno di un amplificatore ideale

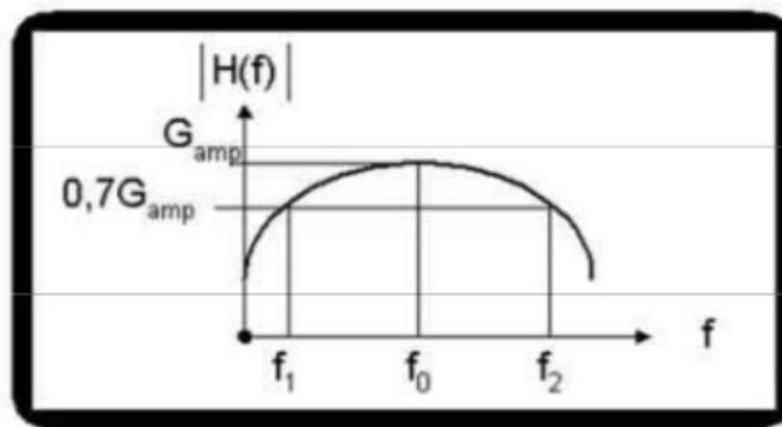


Figura 3 - Amplificatore reale

Nei dispositivi reali
condizioni diverse dal
caso ideale!!

$$|G(f) - G_0| \leq \Delta_G$$

per: $f_{min} \leq f \leq f_{MAX}$

$$\delta_G = \frac{\Delta_G}{G_0}$$

**Scostamento
massimo**

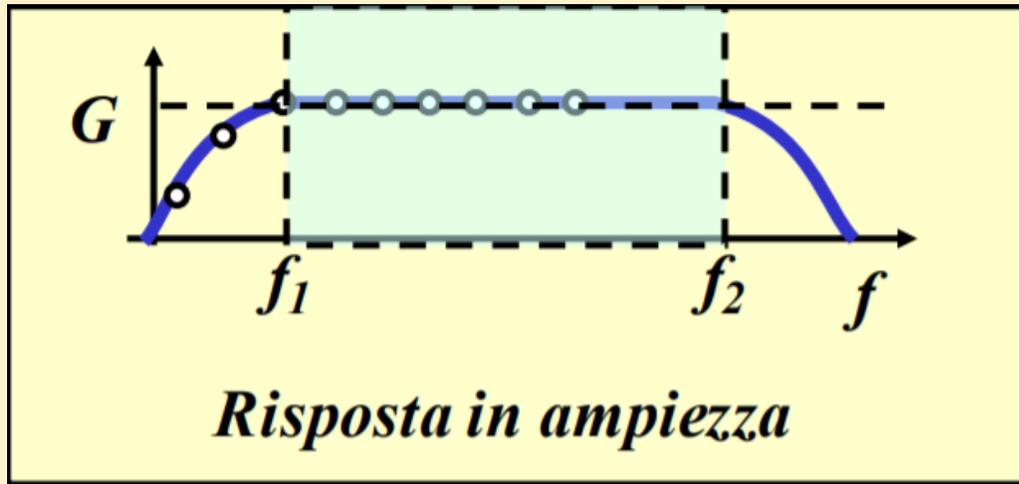
indica di quanto può differire al massimo il guadagno dal valore ideale (**flatness**).
N.B. fattore che può contribuire all'incertezza complessiva di una misura.

Banda passante

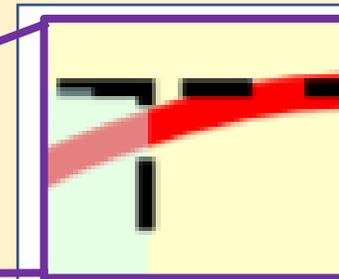
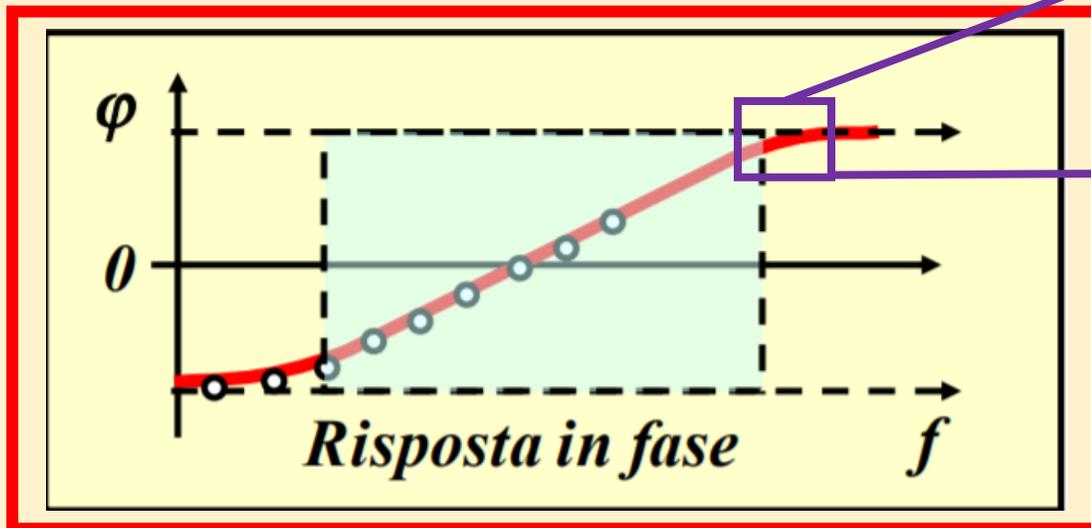
Intervallo di frequenze per cui vale la condizione di non distorsione, quindi ho un guadagno costante

In caso di filtro passa basso $f_{min} = 0$

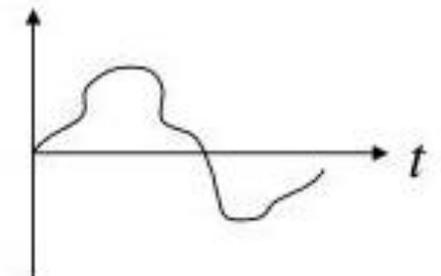
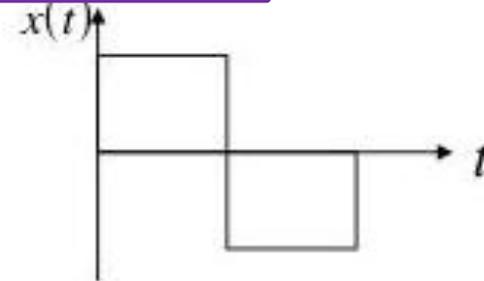
- **fase lineare**, ossia direttamente proporzionale alla frequenza (ossia: $\arg[G(f)] = -2\pi f\tau_0$). In alternativa, si parla di “ritardo di gruppo costante”, dove con **ritardo di gruppo** si intende la derivata della fase rispetto alla pulsazione $\omega = 2\pi f$.



Si può dimostrare che **se la fase dipende linearmente dalla frequenza** (cioè se cresce o diminuisce con andamento rettilineo in funzione di f mantenendo una pendenza costante), allora il **segnale di uscita viene semplicemente traslato nel tempo** rispetto al segnale di ingresso, senza subire distorsioni.



E dove la fase cambia pendenza?



ORIGINALE

DISTORSIONE FASE

Outline

➤ Condizionamento del segnale

➤ Condizioni di non distorsione

➤ Amplificatore operazionale:
richiami e principali utilizzi circuitali

QUIZ 1



➤ Amplificatore da strumentazione

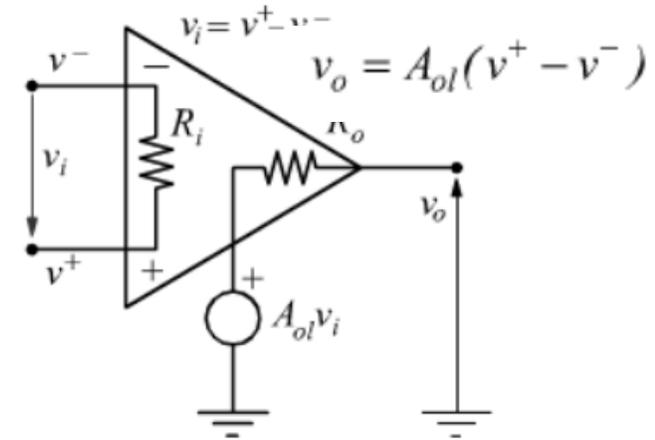
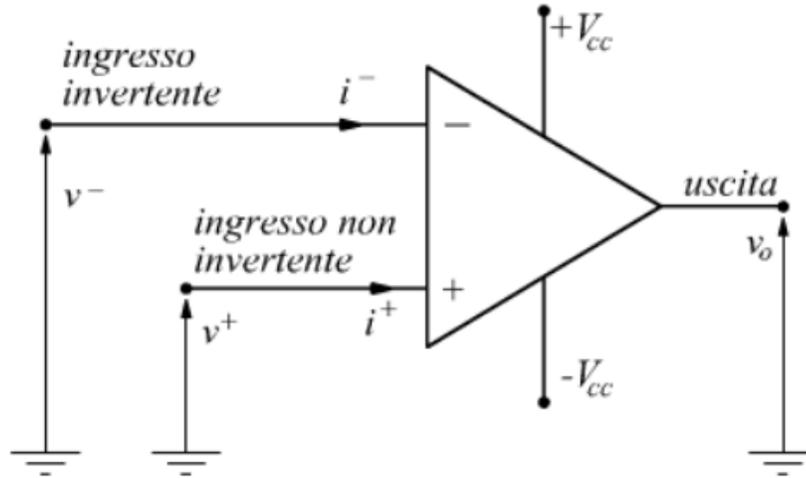
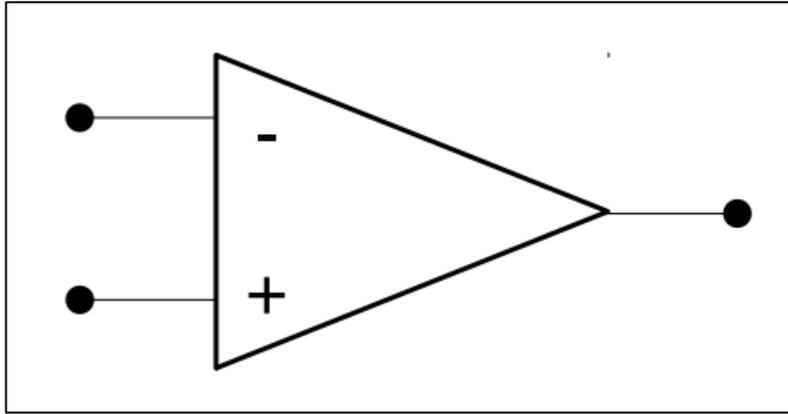
➤ Amplificatore di guadagno programmabile

➤ Amplificatore di isolamento

QUIZ 2



Amplificatori operazionale: richiami di elettronica



→ Uno dei principali **componenti attivi**, poichè **introduce guadagno** e spesso utilizzato in varie configurazioni ad anello chiuso **per compiere operazioni** sui segnali in ingresso.

→ **CARATTERISTICHE PRINCIPALI:**

- **amplificazione infinita** (in pratica molto grande, maggiore di 10^5)
- **impedenza di ingresso infinita (R_i)** (dell'ordine di $10^8 \Omega$)
- **impedenza di uscita nulla (R_o)** (in pratica dell'ordine di qualche Ω)

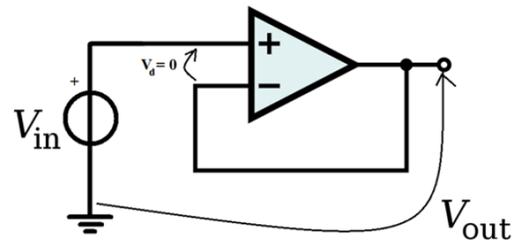
Parametro	simbolo	ideale	reale
Guadagno	A_{ol}	∞	$\approx 10^6$
Resistenza di uscita	R_o	0	75Ω
Resistenza di ingresso	R_i	∞	$2M\Omega$
Larghezza di banda	BW	∞	1MHz

Da queste si possono dedurre due importanti approssimazioni:

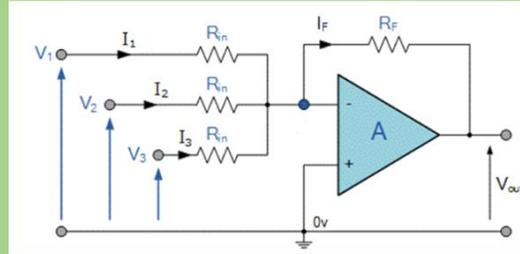
- la **corrente assorbita dai due ingressi si considera nulla**, poichè l'impedenza di ingresso è infinita;
- la **tensione all'ingresso invertente coincide con quella all'ingresso non invertente**, perchè la tensione di uscita ha valore finito e l'amplificazione si è supposta infinita.

Amplificatori operazionali: circuiti più utilizzati

SEPARAZIONE O ADATTAMENTO DI IMPEDENZA

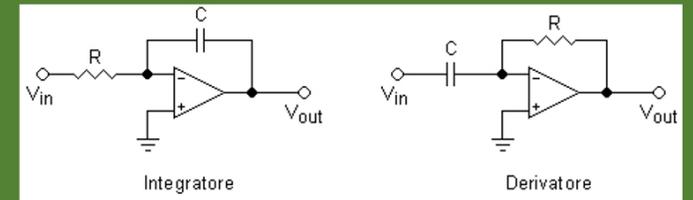


SOMMA DI PIÙ TENSIONI



$$-V_{out} = \left[\frac{R_F}{R_{in}} V_1 + \frac{R_F}{R_{in}} V_2 + \frac{R_F}{R_{in}} V_3 \right]$$

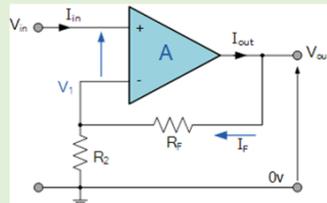
INTEGRALI E DERIVATE DI TENSIONI



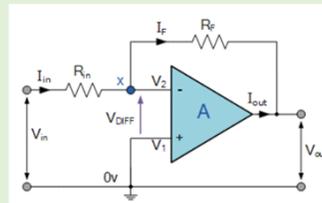
$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

MOLTIPLICAZIONE DI UN SEGNALE PER UNA COSTANTE

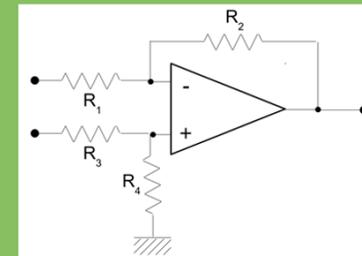


$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_F}{R_2}$$



$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} \times V_{in}$$

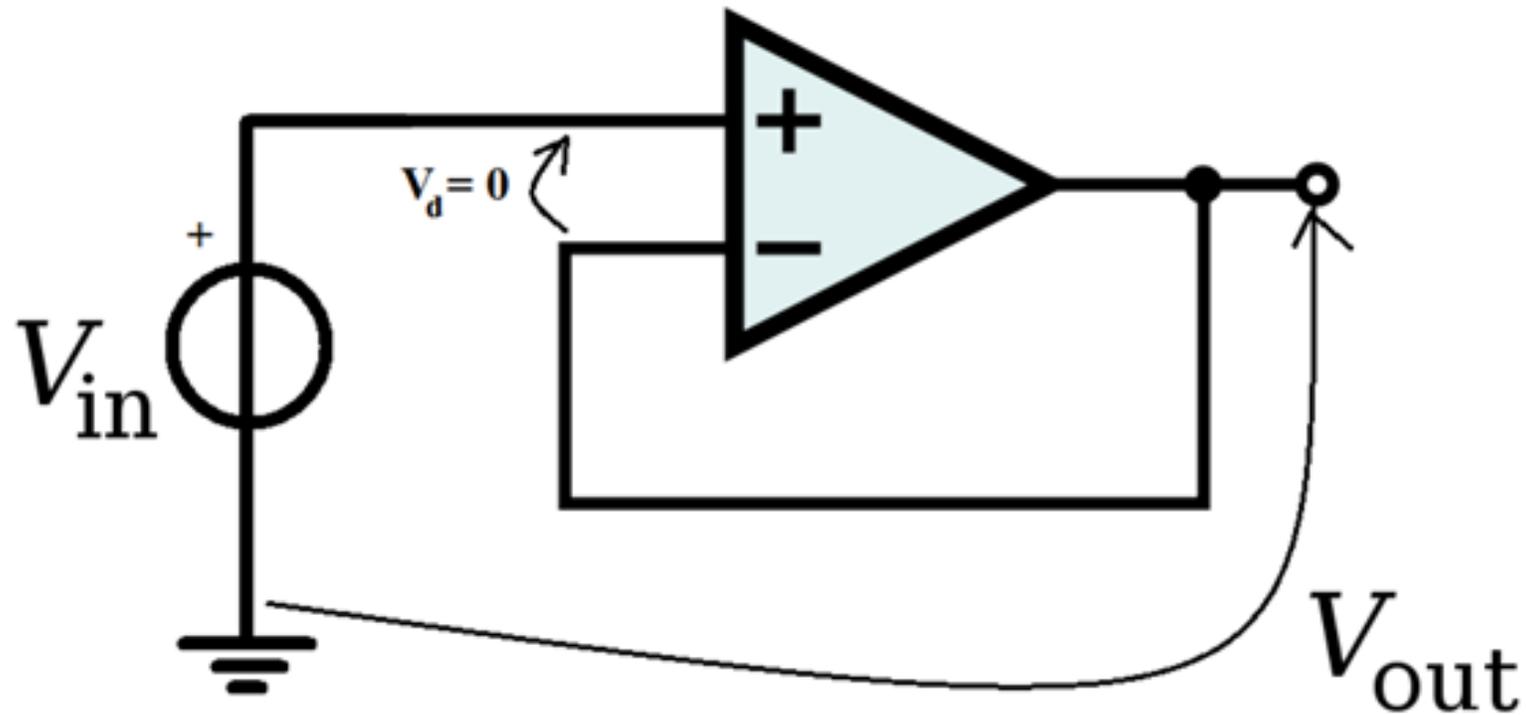
DIFFERENZA DI DUE TENSIONI



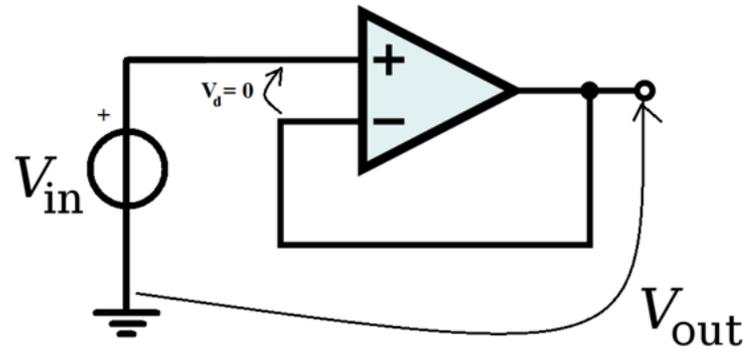
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$v_u = \frac{R_1}{R_2} (v_{i2} - v_{i1})$$

SEPARAZIONE O ADATTAMENTO DI IMPEDENZA



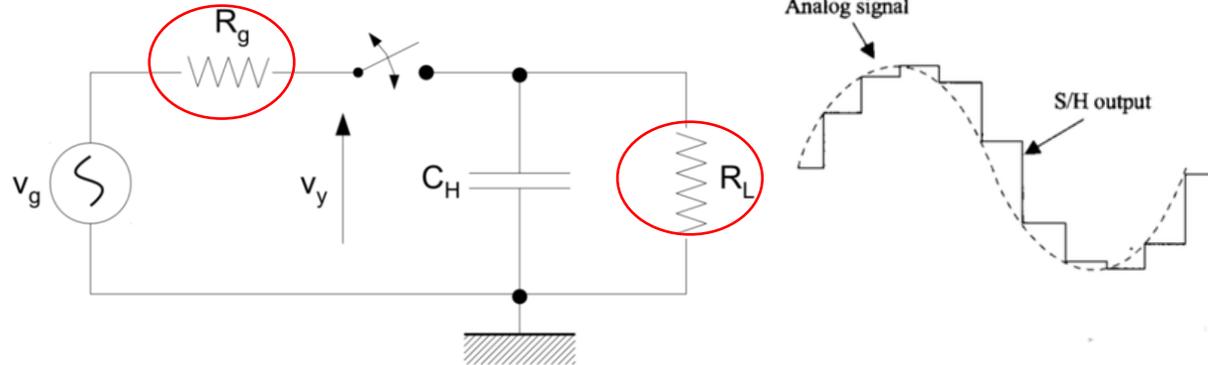
SEPARAZIONE O ADATTAMENTO DI IMPEDENZA



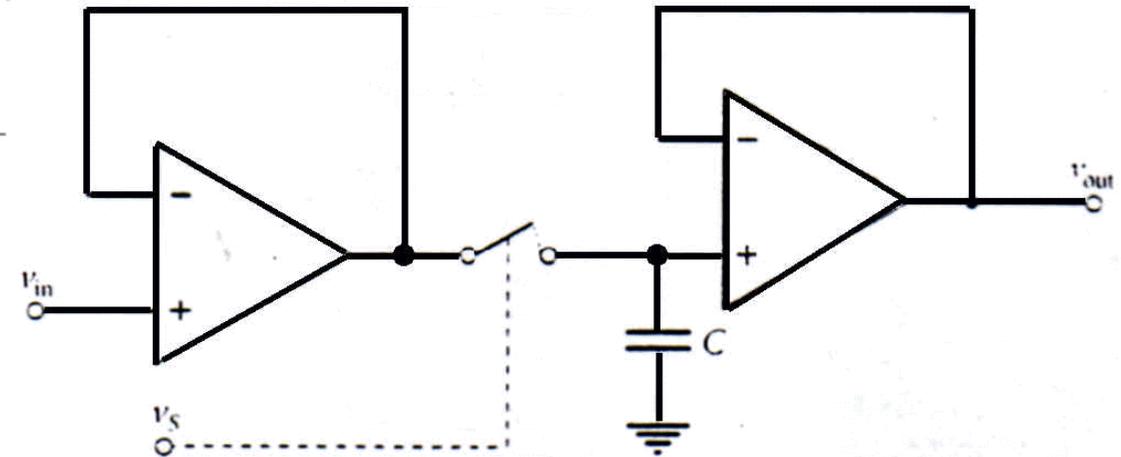
- Si possono realizzare amplificatori con **guadagno di tensione unitario** che, sfruttando le proprietà di **elevata impedenza di ingresso e bassa impedenza di uscita** di un operazionale, **permettono di evitare un carico eccessivo sulla sorgente di segnale e, se necessario, realizzano un adattamento di impedenza verso l'uscita.**
- A seconda dell'impiego che se ne fa, questi circuiti sono variamente chiamati **separatori, (buffer, oppure amplificatori di corrente, o driver)**

Esempio utile per sistemi di acquisizione: **Circuito di un Sample and Hold**

Dalla teoria...



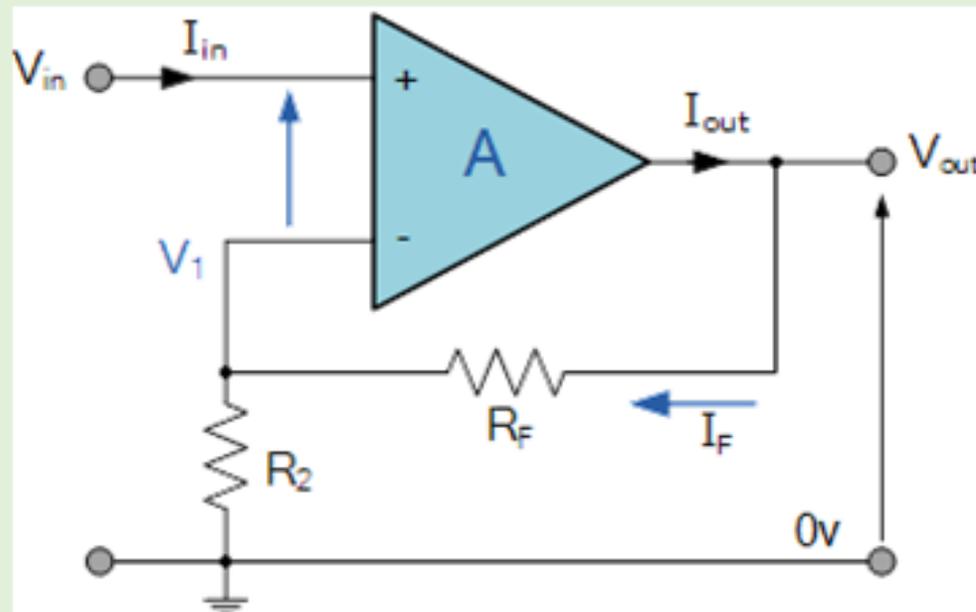
...in pratica



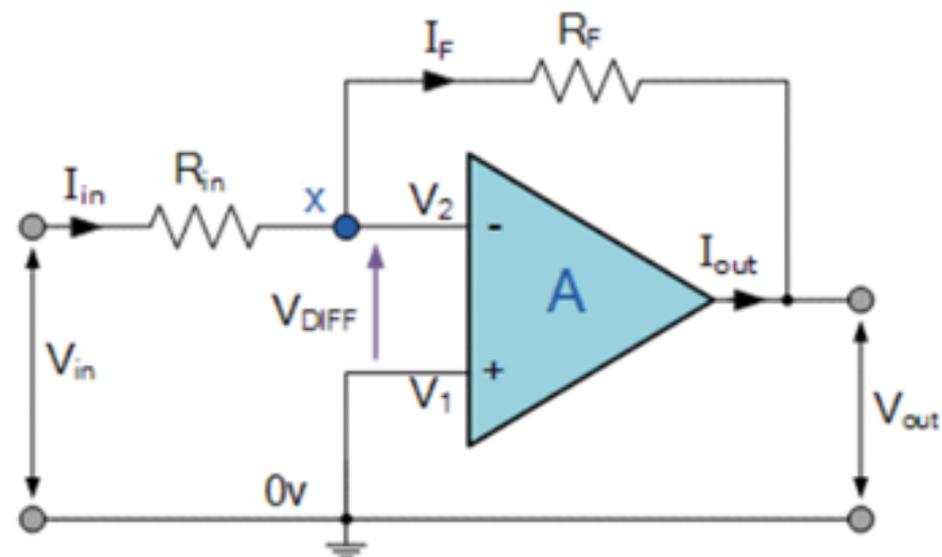
L'AMPLIFICATORE DI INGRESSO → ridurre la resistenza di sorgente R_g vista dal condensatore quando l'interruttore è chiuso, rendendo **più breve il tempo di carica**.

L'AMPLIFICATORE DI USCITA → aumenta la resistenza di carico R_L vista dal SHA, **allungando il tempo di scarica**

MOLTIPLICAZIONE DI UN SEGNALE PER UNA COSTANTE

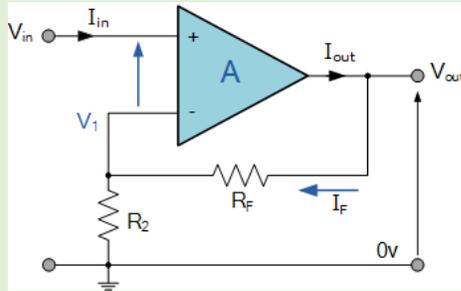


$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_F}{R_2}$$

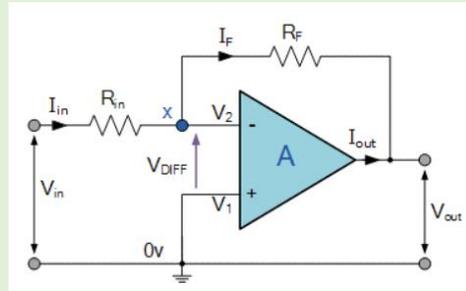


$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} \times V_{in}$$

MOLTIPLICAZIONE DI UN SEGNALE PER UNA COSTANTE



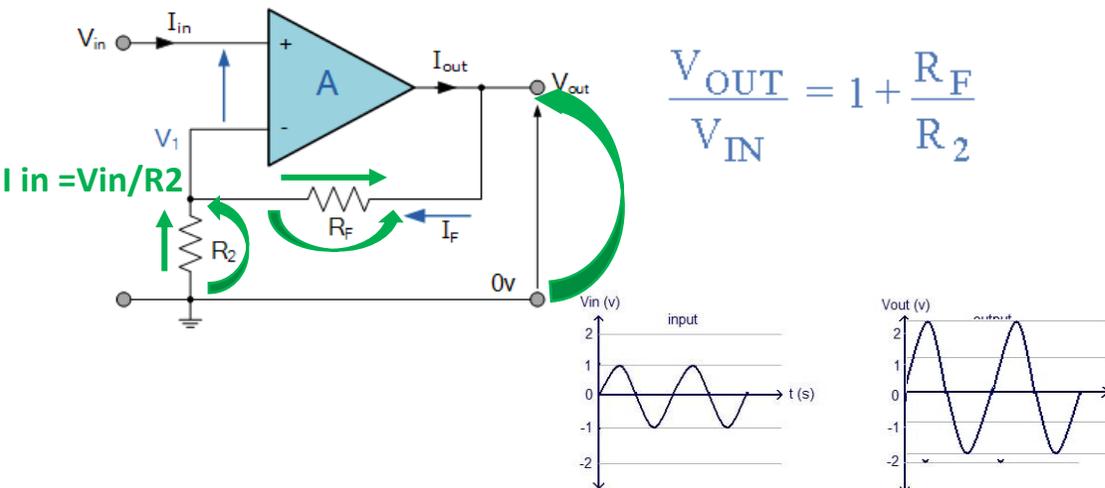
$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_F}{R_2}$$



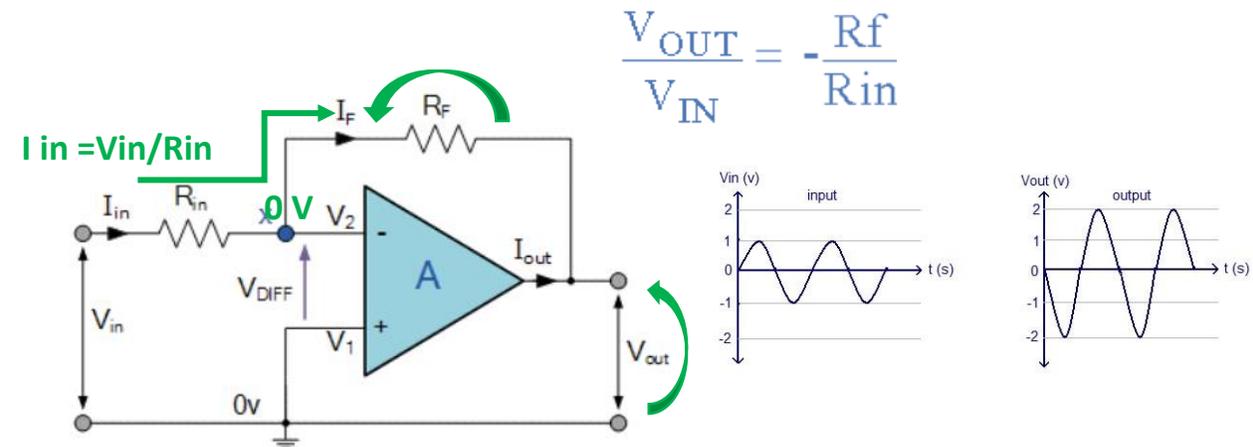
$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} \times V_{in}$$

- Il guadagno di tensione dell'amplificatore deve essere pari alla costante desiderata ed è **imposto scegliendo opportunamente i valori delle resistenze che formano la rete di retroazione dell'operazionale.**
- L'accuratezza dell'operazione **dipende dall'incertezza con cui si possono determinare i valori di rapporto tra resistenze**, che determinano appunto il guadagno;

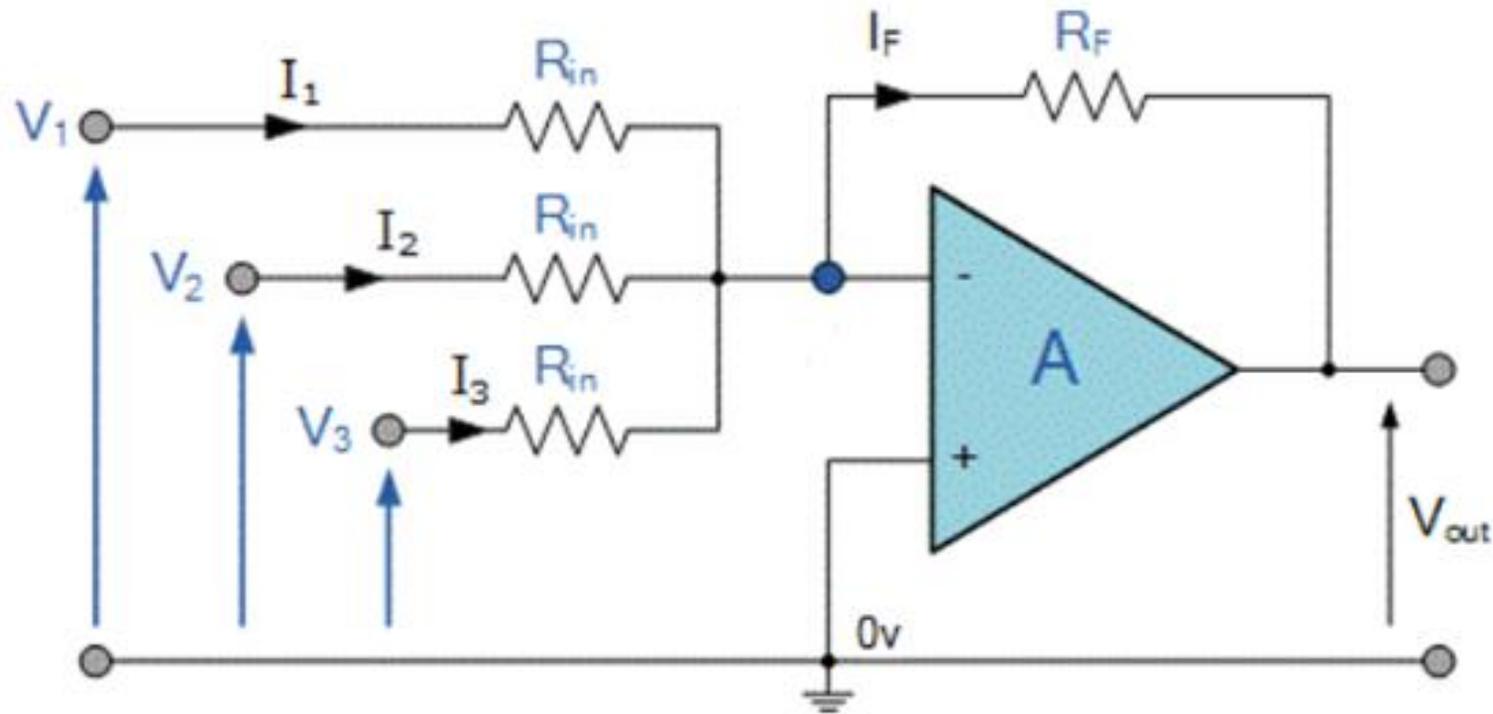
Configurazione non invertente



Configurazione invertente

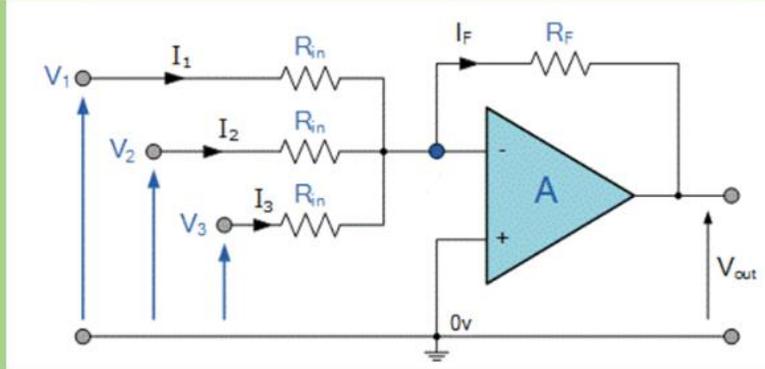


SOMMA DI PIÙ TENSIONI

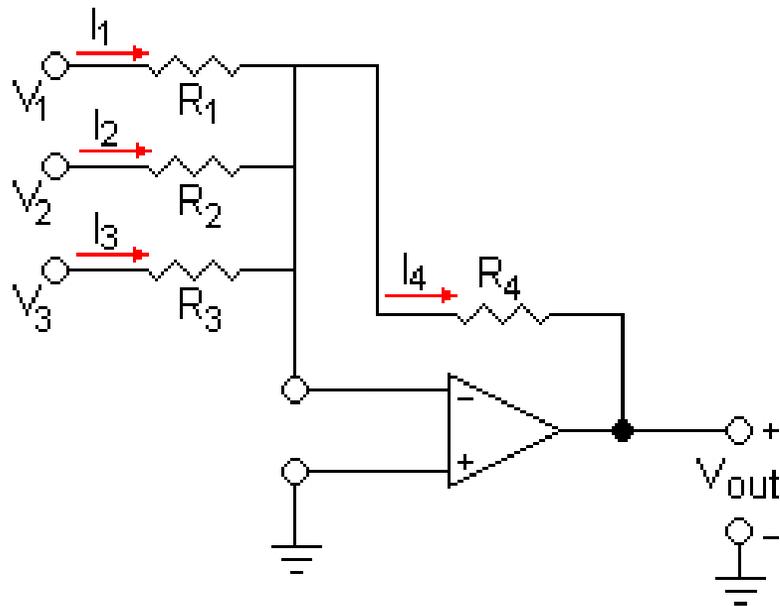


$$-V_{out} = \left[\frac{R_F}{R_{in}} V_1 + \frac{R_F}{R_{in}} V_2 + \frac{R_F}{R_{in}} V_3 \right]$$

SOMMA DI PIÙ TENSIONI



$$-V_{out} = \left[\frac{R_F V_1}{R_{in}} + \frac{R_F V_2}{R_{in}} + \frac{R_F V_3}{R_{in}} \right]$$



- Può essere facilmente ottenuta realizzando un circuito sommatore. Il numero di ingressi è **normalmente pari a due, o al massimo a tre**, per evitare gli effetti della non idealità dell'operazionale, che si fanno sentire maggiormente quando il numero di ingressi è elevato.
- Tenendo presente che la corrente assorbita dall'amplificatore è nulla, si ricava che l'uscita è la somma pesata delle tensioni di ingresso: il peso da assegnare a **ciascun ingresso viene determinato scegliendo opportunamente le resistenze nei rami di ingresso, nonché la resistenza nel ramo di interazione.**

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 \quad \Rightarrow \quad \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} = -\frac{V_{out}}{R_4}$$

$$V_{out} = - \left(\frac{V_1 R_4}{R_1} + \frac{V_2 R_4}{R_2} + \frac{V_3 R_4}{R_3} \right)$$

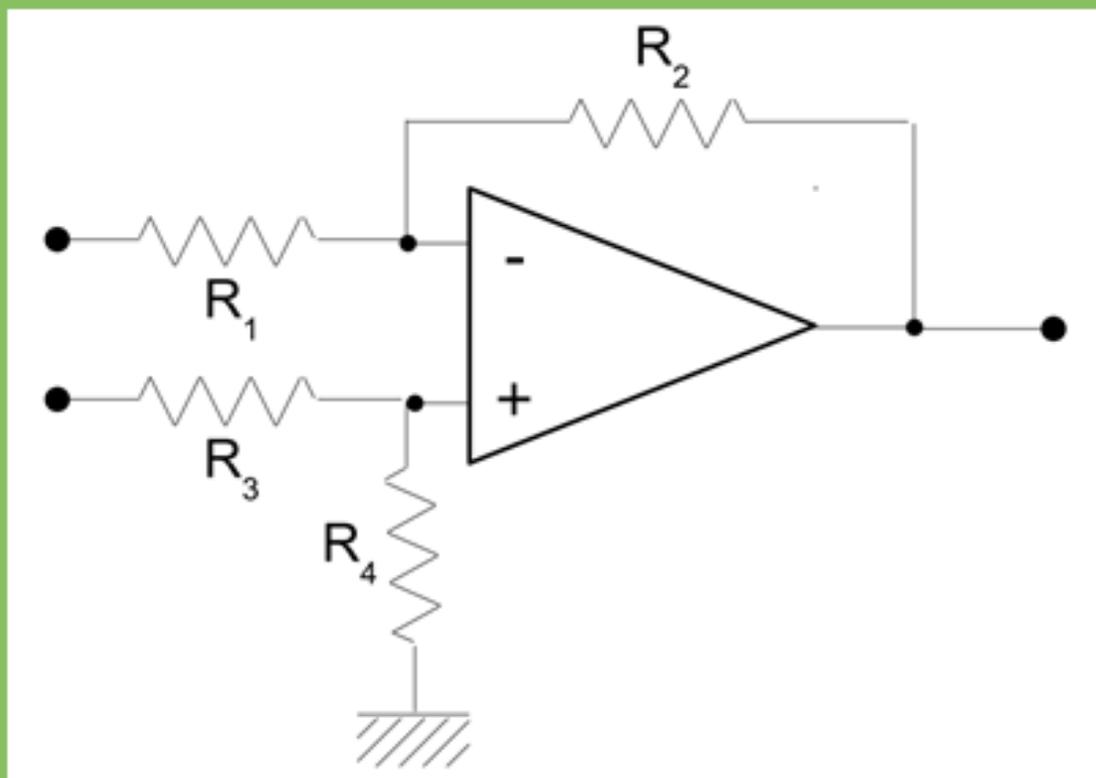
Se le resistenze sono uguali:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

allora abbiamo

$$V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_3)$$

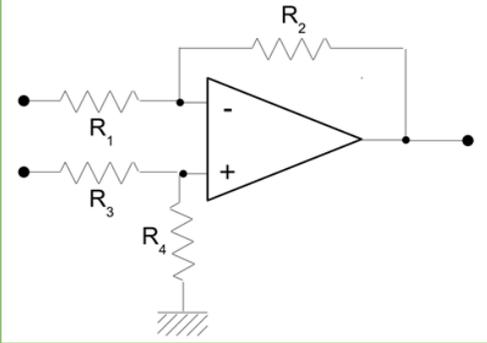
DIFFERENZA DI DUE TENSIONI



$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$v_u = \frac{R_1}{R_2} (v_{i2} - v_{i1})$$

DIFFERENZA DI DUE TENSIONI



$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$v_u = \frac{R_1}{R_2} (v_{i2} - v_{i1})$$

- Combinando resistenze e amplificatori operazionali è possibile costruire circuiti attivi particolarmente utili per l'acquisizione e amplificazione di segnali, la cui uscita sia **proporzionale alla differenza delle tensioni entranti ai due ingressi differenziali**

CONFIGURAZIONE CON UN SINGOLO OP AMP

Per il principio di sovrapposizione degli effetti...

Consideriamo $V_1 = 0$

$$V'_{out} = -V_2 \cdot \frac{R_3}{R_2}$$

Consideriamo $V_2 = 0$

$$V''_{out} = V_1 \cdot \frac{R_4}{R_1 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) = V_1 \cdot \frac{R_4}{R_1 + R_4} \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_2}$$

$V_{out} = V_1 + V_2$

$$V_{out} = V_1 \cdot \frac{R_4}{R_1 + R_4} \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_2} - V_2 \cdot \frac{R_3}{R_2}$$

che nel caso in cui si abbia

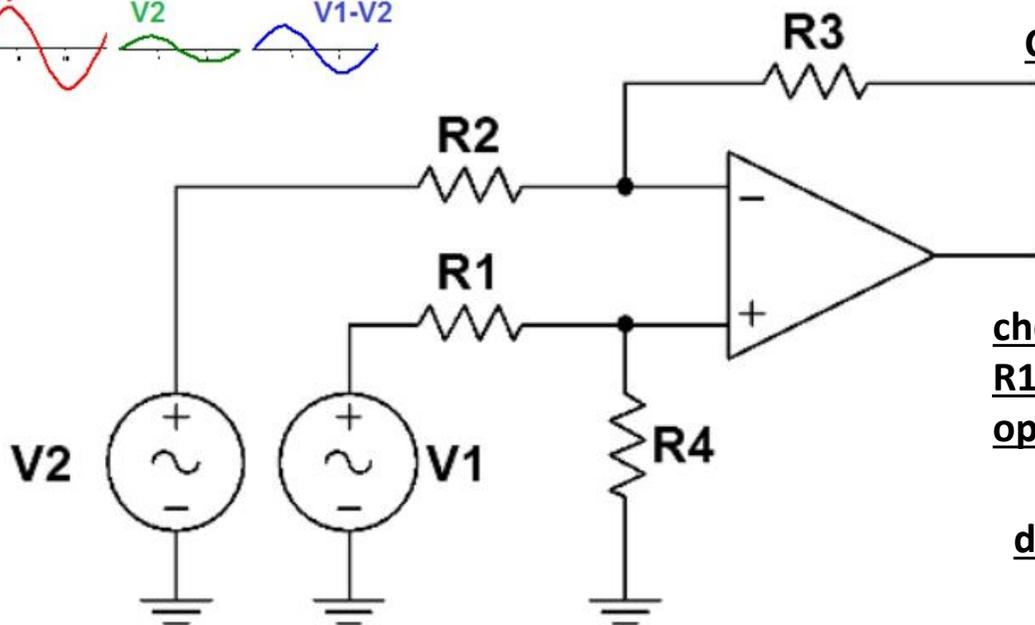
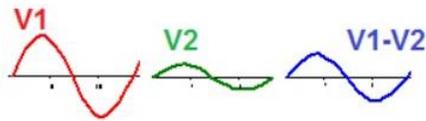
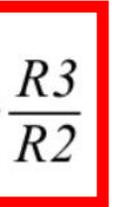
$R_1 = R_2$ e $R_4 = R_3$

oppure più semplicemente si bilancino i rapporti $R_2/R_3 = R_1/R_4$

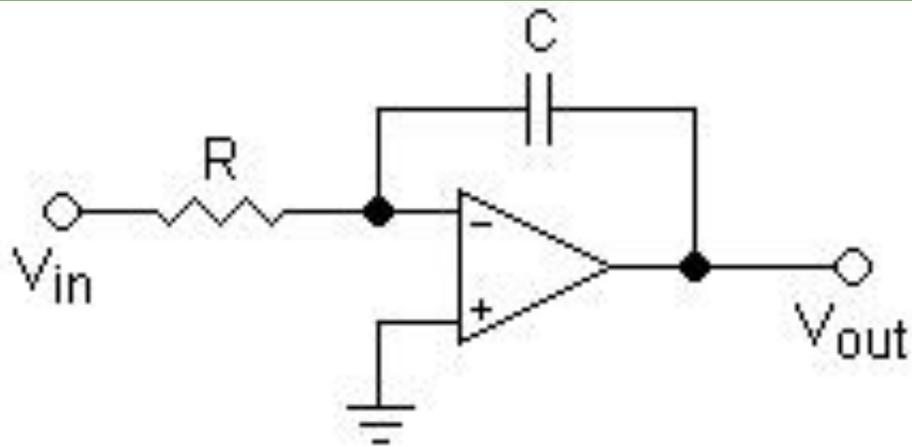
diventa

$$V_{out} = V_1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_2} - V_2 \cdot \frac{R_3}{R_2} = (V_1 - V_2) \cdot \frac{R_3}{R_2}$$

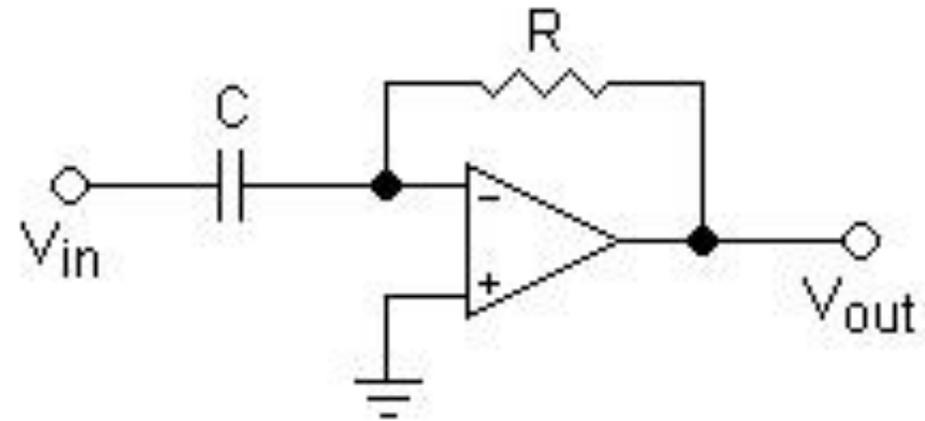
**GUADAGNO
DIFFERENZIALE**



INTEGRALI E DERIVATE DI TENSIONI



Integratore

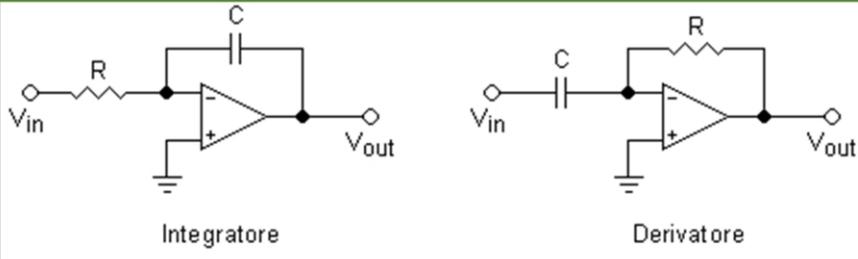


Derivatore

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

INTEGRALI E DERIVATE DI TENSIONI



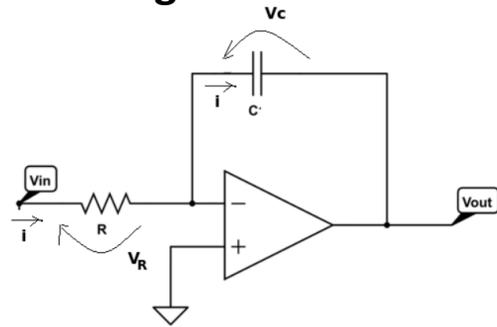
$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

- Combinando resistenze, condensatori e amplificatori operazionali è possibile costruire circuiti attivi particolarmente utili per l'estrazione di parametri utili di segnali, **la cui uscita sia proporzionale:**

- all'integrale della tensione entrante
- alla derivata della tensione entrante

Integratore ideale



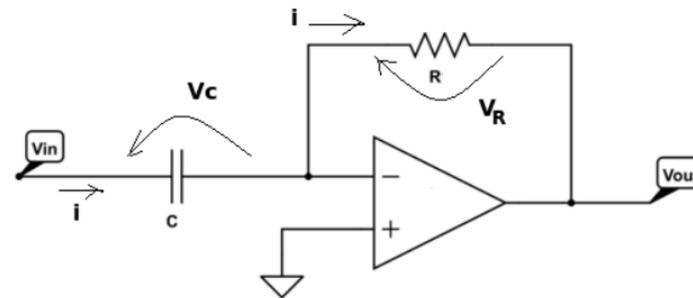
$$V_R = V_{in}$$

$$i = V_R/R = V_{in}/R$$

$$V_C = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt = \frac{1}{C} \int \frac{V_{in}}{R} dt = \frac{1}{RC} \int V_{in} dt$$

$$V_{out} = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt$$

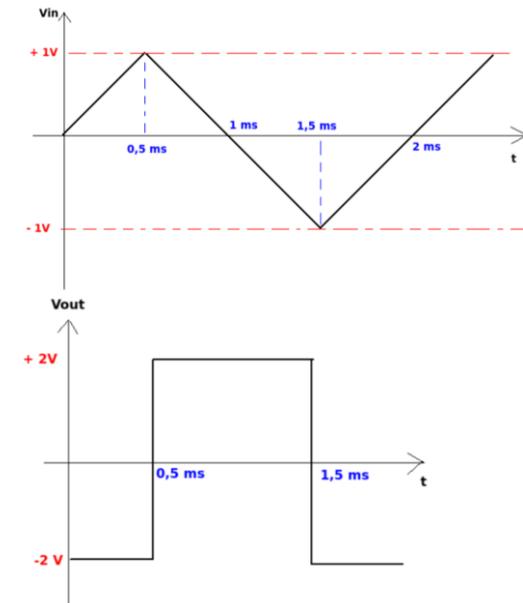
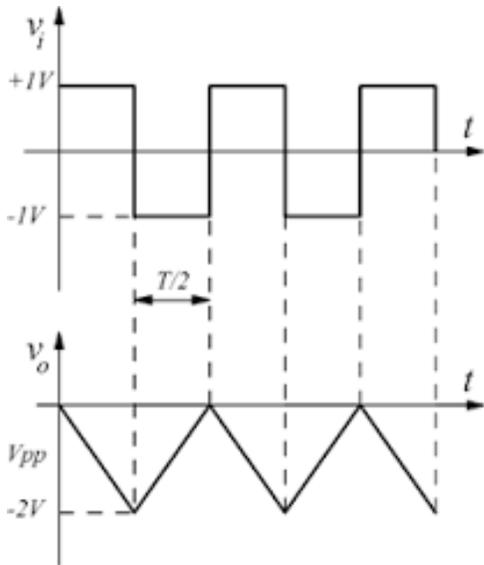
Derivatore ideale



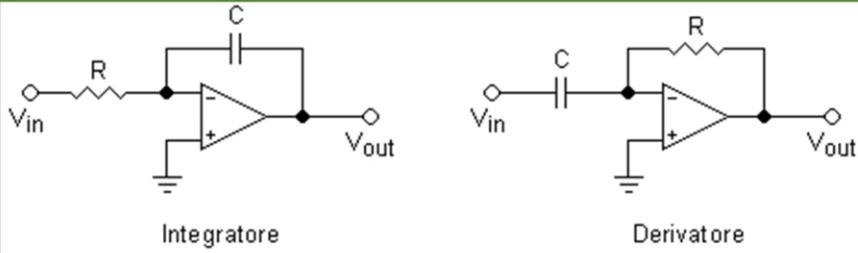
$$V_C = V_{in}$$

$$i = C v'_C = C V'_{in}$$

$$V_{out} = -R \times i = -RC V'_{in}$$



INTEGRALI E DERIVATE DI TENSIONI



$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

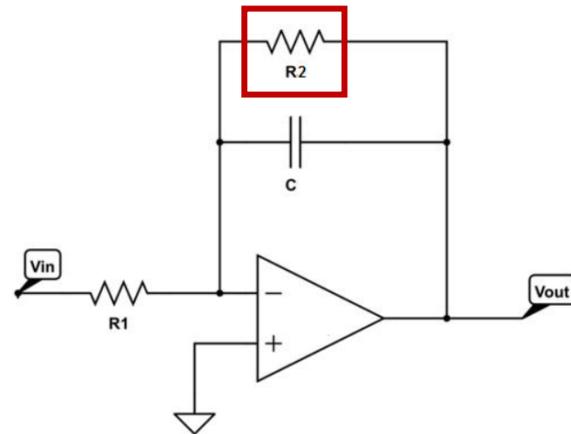
$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

- Combinando resistenze, condensatori e amplificatori operazionali è possibile costruire circuiti attivi particolarmente utili per l'estrazione di parametri utili di segnali, **la cui uscita sia proporzionale:**

- all'integrale della tensione entrante
- alla derivata della tensione entrante

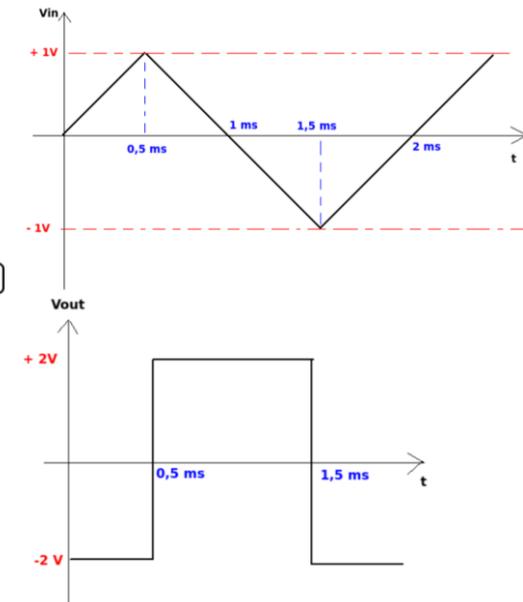
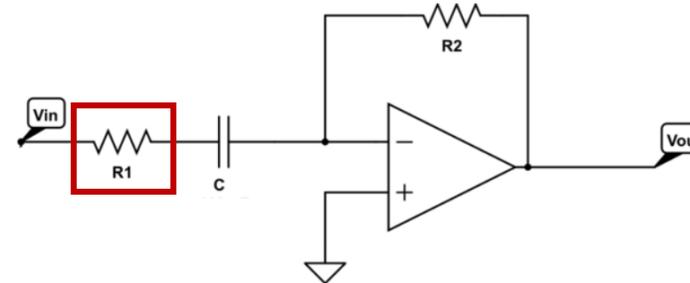
N.B. Per rendere questi circuiti funzionanti nella realtà, evitando che l'opamp saturi in condizioni di valori estremi della derivata del segnale, è necessario aggiungere una resistenza in parallelo alla capacità per integratore e in serie per il derivatore!

Integratore reale

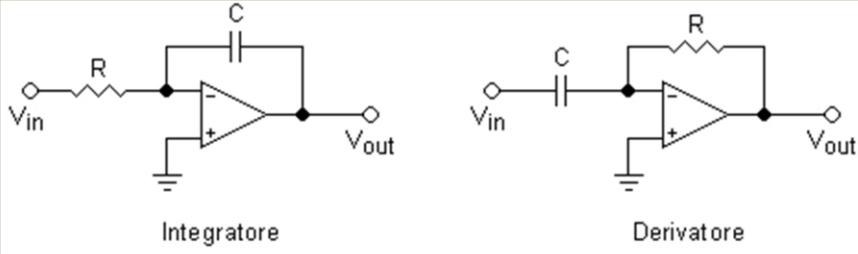


Tali resistenze permettono di **fissare un valore massimo del guadagno** ($-R_2/R_1$) in caso di continua (per integratore) e di elevatissime frequenze (per derivatore), evitando la saturazione degli operazionali in **tali condizioni estreme**.

Derivatore reale



INTEGRALI E DERIVATE DI TENSIONI



$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

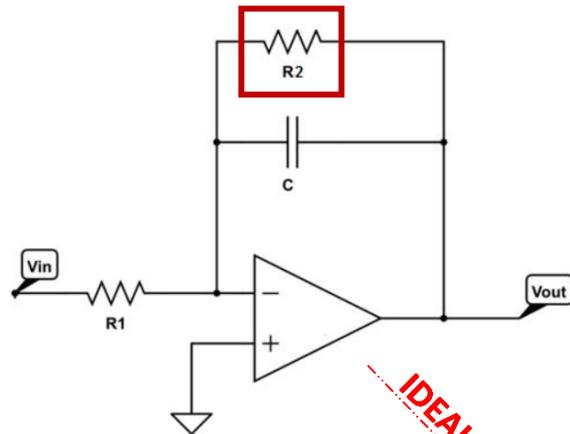
$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

- Combinando resistenze, condensatori e amplificatori operazionali è possibile costruire circuiti attivi particolarmente utili per l'estrazione di parametri utili di segnali, **la cui uscita sia proporzionale:**

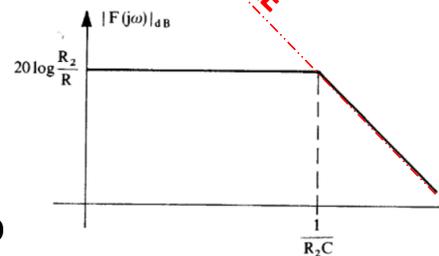
- all'integrale della tensione entrante
- alla derivata della tensione entrante

N.B. Per rendere questi circuiti funzionanti nella realtà, evitando che l'opamp saturi in condizioni di valori estremi della derivata del segnale, è necessario aggiungere una resistenza in parallelo alla capacità per integratore e in serie per il derivatore!

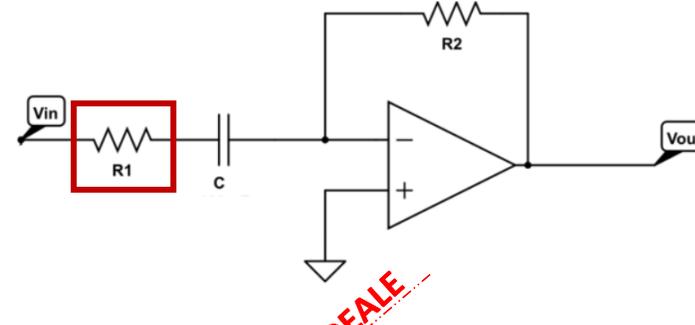
Integratore reale



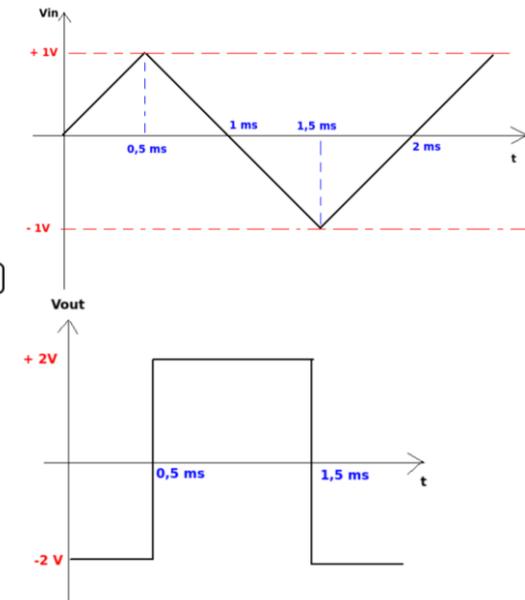
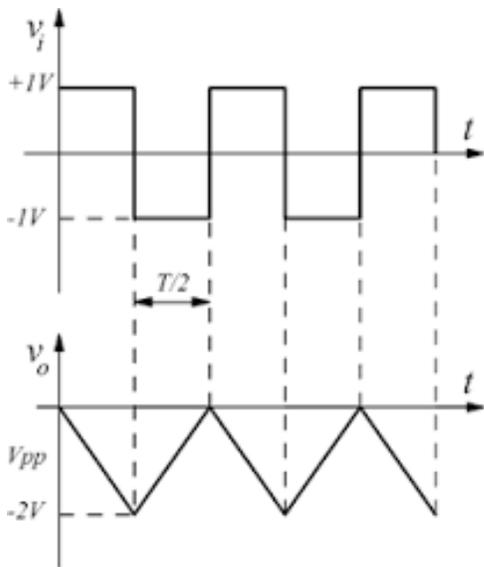
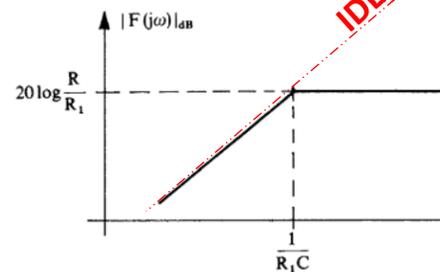
→ Si comporta da **filtro passa basso**



Derivatore reale



→ Si comporta da **filtro passa alto**



Outline

- Condizionamento del segnale
- Condizioni di non distorsione
- Amplificatore operazionale:
richiami e principali utilizzi circuitali

QUIZ 1

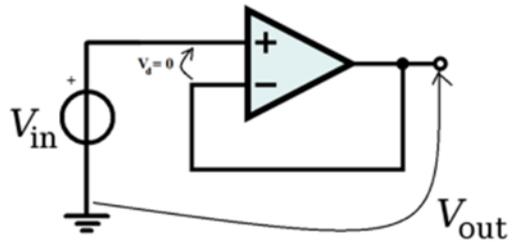


- Amplificatore da strumentazione
- Amplificatore di guadagno programmabile
- Amplificatore di isolamento

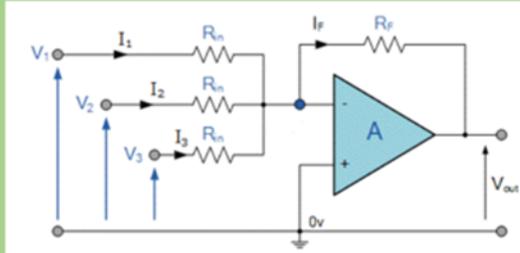
QUIZ 2



**SEPARAZIONE O
ADATTAMENTO DI IMPEDENZA**

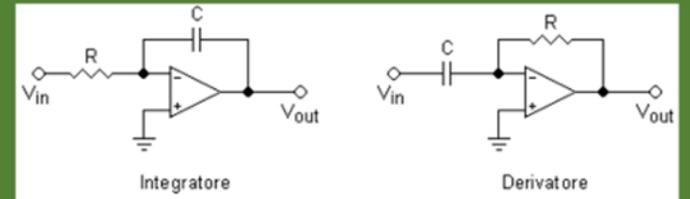


SOMMA DI PIÙ TENSIONI



$$-V_{out} = \left[\frac{R_f}{R_{in}} V_1 + \frac{R_f}{R_{in}} V_2 + \frac{R_f}{R_{in}} V_3 \right]$$

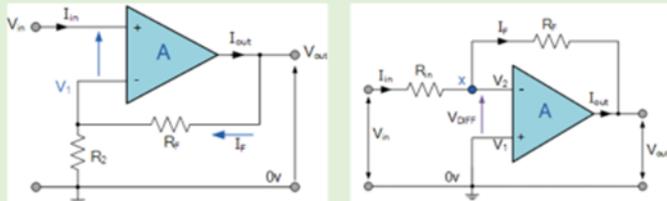
INTEGRALI E DERIVATE DI TENSIONI



$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

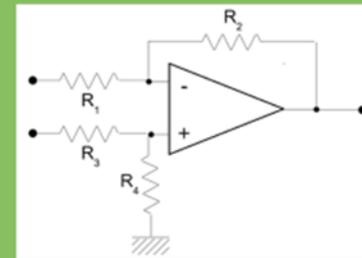
**MOLTIPLICAZIONE DI UN SEGNALE
PER UNA COSTANTE**



$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_f}{R_2}$$

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} \times V_{in}$$

DIFFERENZA DI DUE TENSIONI

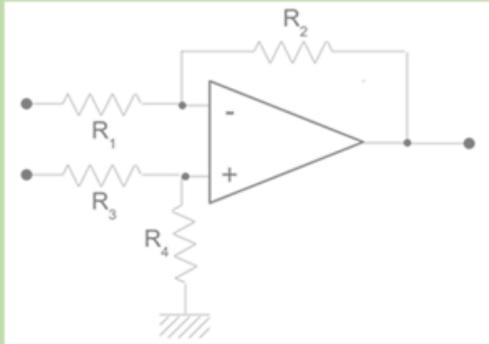


$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$v_u = \frac{R_1}{R_2} (v_{i2} - v_{i1})$$

**CONFIGURAZIONE IN ASSOLUTO PIU' UTILIZZATA IN
AMBITO DI ACQUISIZIONE DI SEGNALI BIOMEDICI**

DIFFERENZA DI DUE TENSIONI

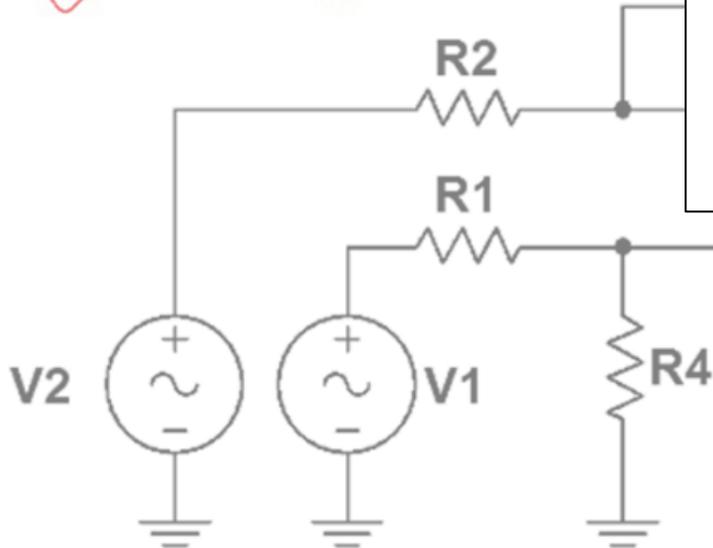


$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

v_u

N.B. a causa di alcuni scostamenti dalla idealità una diretta applicazione di questa configurazione consente di ottenere solamente **risultati di ridotta accuratezza.**

**Ma come valutiamo la qualità di un amplificatore differenziale?
Quali sono le principali fonti di incertezza???**



che nel caso in cui si abbia
 $R_1=R_2$ e $R_4=R_3$
oppure più semplicemente

diventa

$$V_{out} = V_1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$



$$\beta = R_1/R_4$$

$$\frac{\beta}{R_2} = (V_1 - V_2) \cdot \frac{R_3}{R_2}$$

**GUADAGNO
DIFFERENZIALE**

- Combinando resistenze e amplificatori operazionali è possibile costruire circuiti attivi particolarmente utili per l'acquisizione e amplificazione di segnali, la cui uscita sia **proporzionale alla differenza delle tensioni entranti ai due ingressi differenziali**

UN SINGOLO OP AMP

posizione degli effetti...

$$v_{out} = -V_2 \cdot \frac{R_3}{R_2}$$

$$\frac{R_4}{R_1 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) = V_1 \cdot \frac{R_4}{R_1 + R_4} \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_2}$$

$$\frac{R_4}{R_1 + R_4} \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_2} - V_2 \cdot \frac{R_3}{R_2}$$

Valutazione della qualità di un amplificatore differenziale: Common Mode Rejection Ratio (CMRR)

- Per analizzare la qualità di una struttura differenziale conviene scomporre le tensioni v_{i1} e v_{i2} nelle rispettive componenti di **modo comune v_C** e di **modo differenziale v_D** .

$$v_C = \frac{v_{i1} + v_{i2}}{2} \quad v_D = v_{i2} - v_{i1}$$

- Si otterrà quindi:

$$v_{i1} = v_C - \frac{v_D}{2} \quad v_{i2} = v_C + \frac{v_D}{2}$$

- Una volta introdotte **v_C** e **v_D** si definiscono rispettivamente:

$$A_D = \frac{v_u}{v_D} \quad \Rightarrow \quad \text{GUADAGNO DIFFERENZIALE}$$

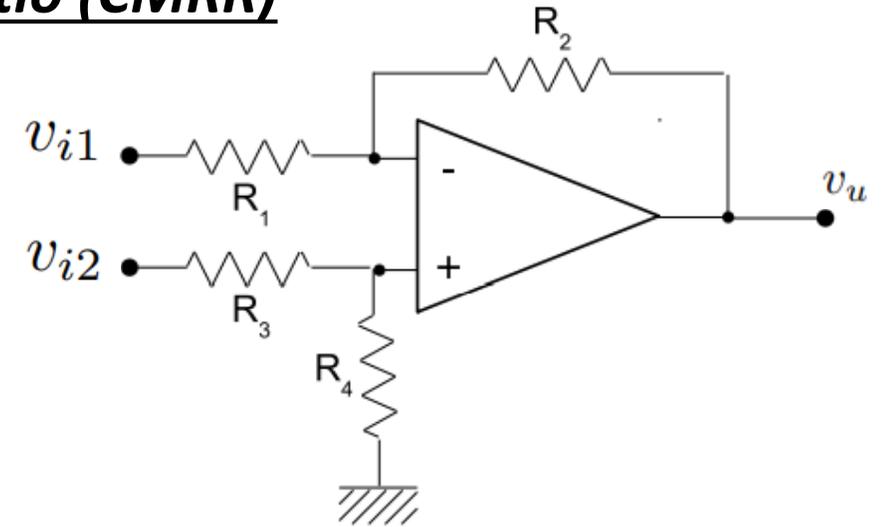
$$A_C = \frac{v_u}{v_C} \quad \Rightarrow \quad \text{GUADAGNO DI MODO COMUNE}$$

- Il loro rapporto (esprimibile sia in forma lineare che logaritmica) prenderà il nome di **RAPPORTO DI REIEZIONE DI MODO COMUNE** (**common-mode rejection ratio, CMRR**)

$$CMRR = \frac{|A_D|}{|A_C|} \quad CMRR_{[dB]} = 20 \log_{10} \frac{|A_D|}{|A_C|}$$

- Questo parametro indica il **limite entro il quale** una struttura differenziale è in grado di **considerare soltanto la differenza tra le due tensioni** di ingresso (che spesso è di maggiore interesse) **trascurando la loro tensione media**

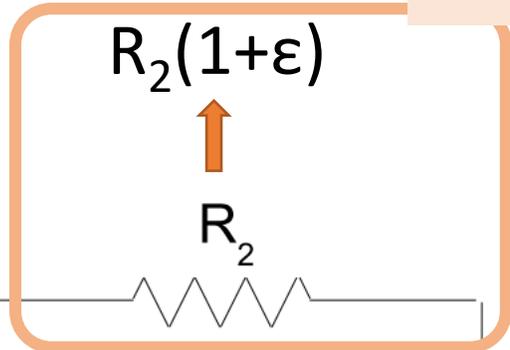
Quali sono quindi le principali non idealità che possono ridurre il CMRR in questa configurazione???



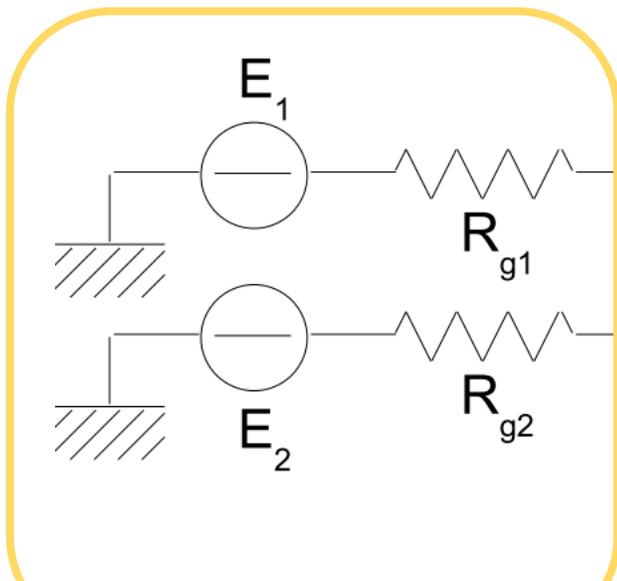
Quali sono quindi le principali non idealità che possono ridurre il CMRR in questa configurazione???



1. Effetto dell'incertezza delle resistenze



$$CMR(dB) \cong 20 \log_{10} \left(\frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{\epsilon} \right)$$

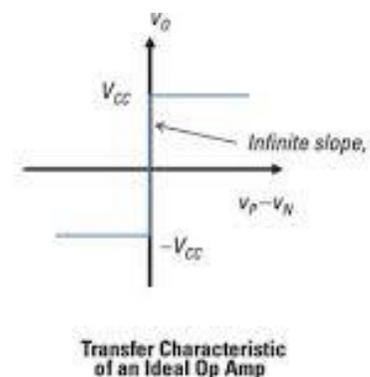
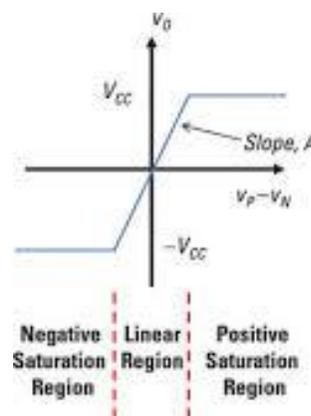
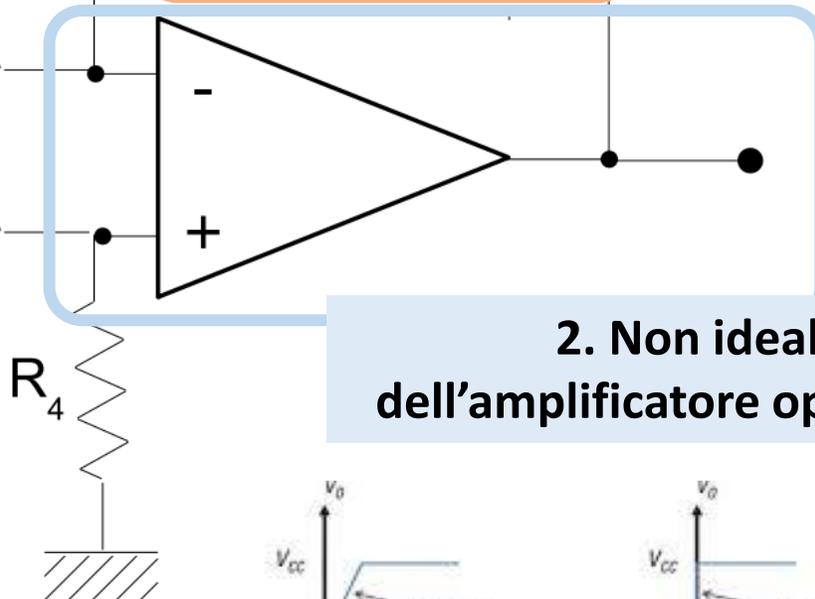


3. Influenza delle impedenze di uscita delle sorgenti di segnale

$$\frac{R_1 + R_{g1}}{R_2} = \frac{R_3 + R_{g2}}{R_4}$$

→ Trascurabili solo se molto piccole, altrimenti **influiscono in modo significativo sul CMRR**
 → Spesso **Rg non controllabili**

2. Non idealità dell'amplificatore operazionale



In termini di scostamenti di linearità, guadagno e livello di zero dal comportamento ideale

Circuiti differenziali : Amplificatori da strumentazione (INA)

- La sua struttura può pensarsi derivata dall'amplificatore differenziale ideale.
- La struttura presenta una **resistenza di ingresso molto elevata**, una **resistenza di uscita molto piccola**, ed un **guadagno indipendente dalle sorgenti di segnale**.

QUAL È LA SUA CARATTERISTICA DI TRASFERIMENTO?

Guardiamo solo la parte a destra...

Riconosciamo la stessa struttura dell'amplificatore differenziale ideale

$$\rightarrow v_u = \frac{R_2}{R_1} (v_{u2} - v_{u1})$$

Poichè la corrente in ingresso è nulla, R_g , R_3 e R_3 sono in serie e percorse dalla corrente:

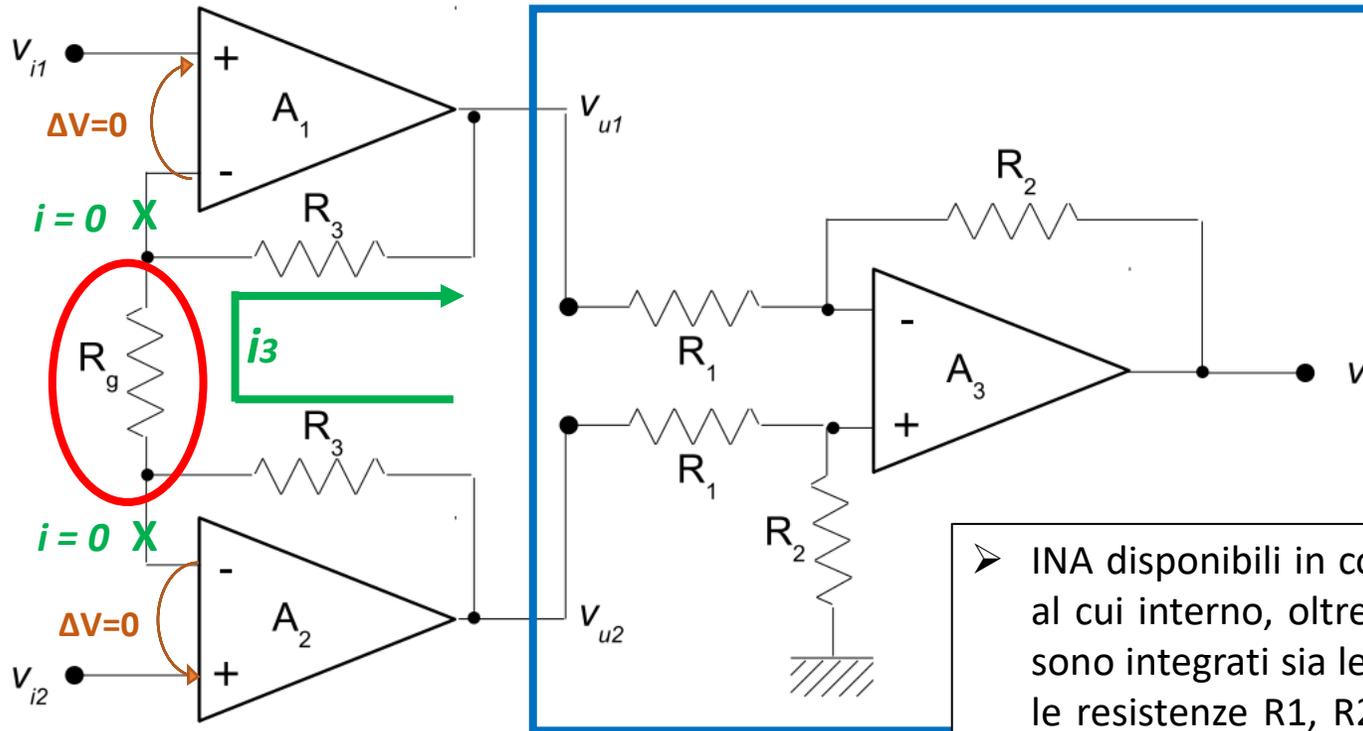
$$\rightarrow i_3 = \frac{v_{u1} - v_{u2}}{R_G + 2R_3}$$

Essendo $v_+ = v_-$, avremo che:

$$\rightarrow i_3 = \frac{v_1^- - v_2^-}{R_G} = \frac{v_{i1} - v_{i2}}{R_G}$$

Dalle tre precedenti equazioni si ricava che:

$$v_u = \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2R_3}{R_G} \right) (v_{i2} - v_{i1})$$



- INA disponibili in commercio generalmente in un'unica struttura al cui interno, oltre ad altri elementi non indicati nello schema, sono integrati sia le funzioni dei tre amplificatori A1, A2 e A3, sia le resistenze R1, R2 e R3. **La scelta della resistenza R_g , invece, può essere lasciata all'utilizzatore, che deve provvedere ad aggiungerla come componente esterno.**

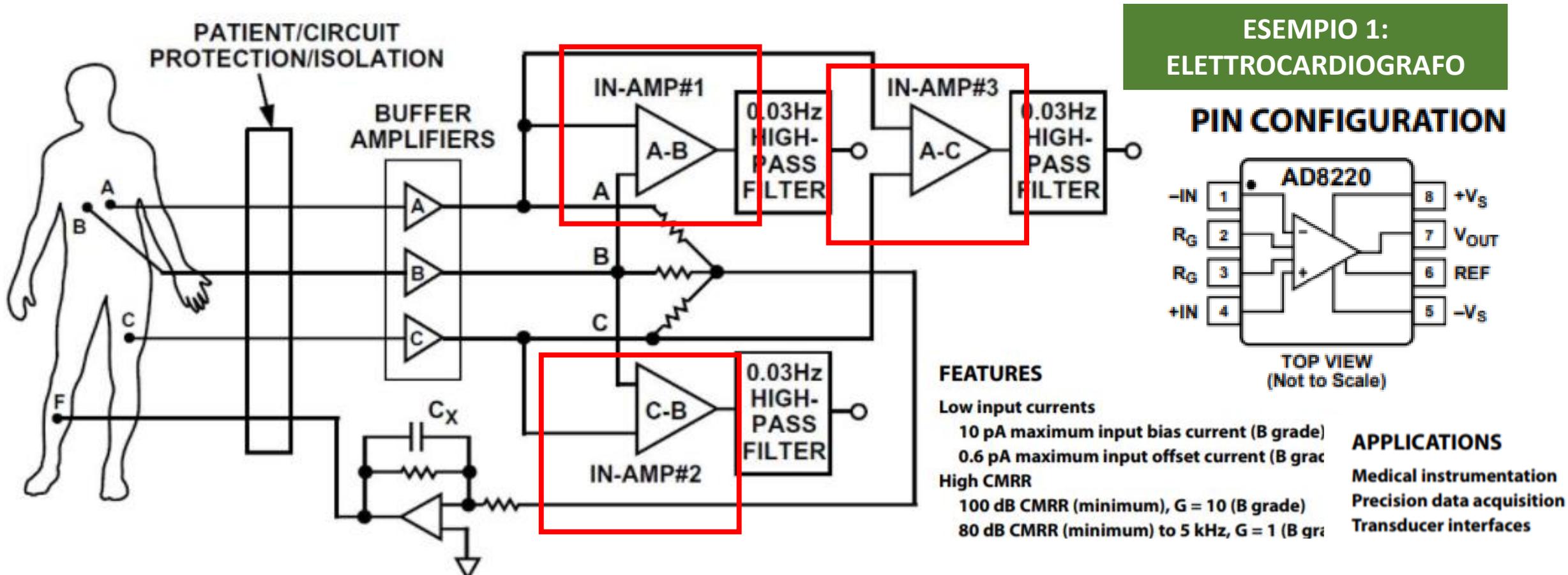
Lushigher KIN DE Electronics Limited
INA118UB



Best Quality Best Service

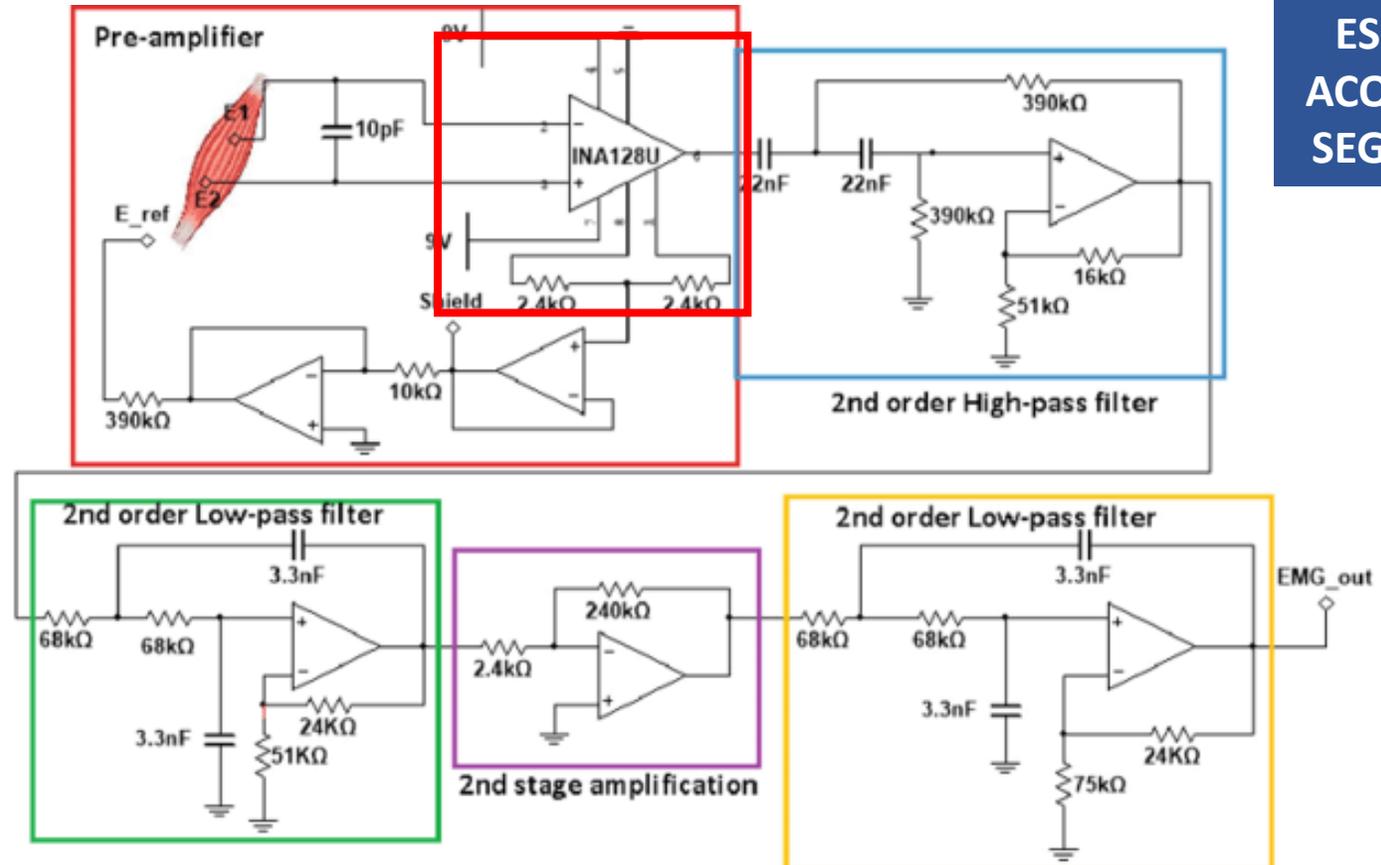
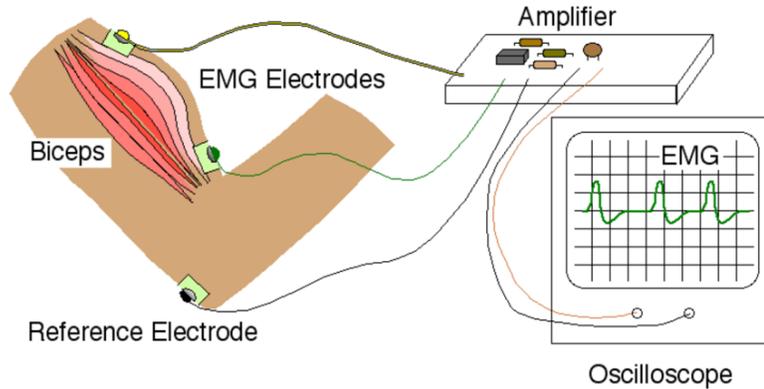
Amplificatori da strumentazione (INA): esempi in ambito biomedico

- In ambito biomedico l'utilizzo degli **amplificatori da strumentazione** è molto diffuso poichè una delle situazioni più ricorrenti di sensori e elettrodi biomedicali è **avere una elevata impedenza di contatto e dover registrare segnali di ampiezza molto piccola**.
- Per queste motivazioni, **elevata impedenza di ingresso** dell'INA evita effetto di carico (ossia parte della corrente legata al segnale utile venga persa perchè assorbita dalla strumentazione) con **effetti di distorsione** del segnale misurato.



Amplificatori da strumentazione (INA): esempi in ambito biomedico

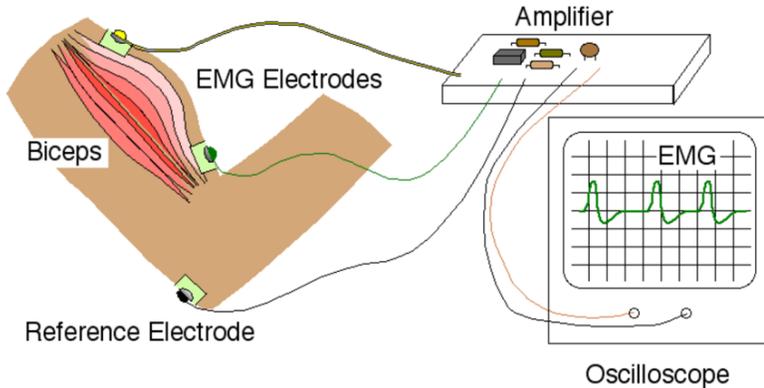
- In ambito biomedico l'uso degli **amplificatori da strumentazione** è molto diffuso poiché una delle situazioni più ricorrenti di sensori e elettrodi biomedicali è **avere una elevata impedenza di contatto e dover registrare segnali di ampiezza molto piccola**.
- Per queste motivazioni, **elevata impedenza di ingresso** dell'INA evita effetto di carico (ossia parte della corrente legata al segnale utile venga persa perchè assorbita dalla strumentazione) con **effetti di distorsione** del segnale misurato.



**ESEMPIO 2:
ACQUISIZIONE
SEGNALI EMG**

Amplificatori da strumentazione (INA): esempi in ambito biomedico

- In ambito biomedico l'utilizzo degli **amplificatori da strumentazione** è molto diffuso poichè una delle situazioni più ricorrenti di sensori e elettrodi biomedicali è **avere una elevata impedenza di contatto e dover registrare segnali di ampiezza molto piccola**.
- Per queste motivazioni, **elevata impedenza di ingresso** dell'INA evita effetto di carico (ossia parte della corrente legata al segnale utile venga persa perchè assorbita dalla strumentazione) con **effetti di distorsione** del segnale misurato.



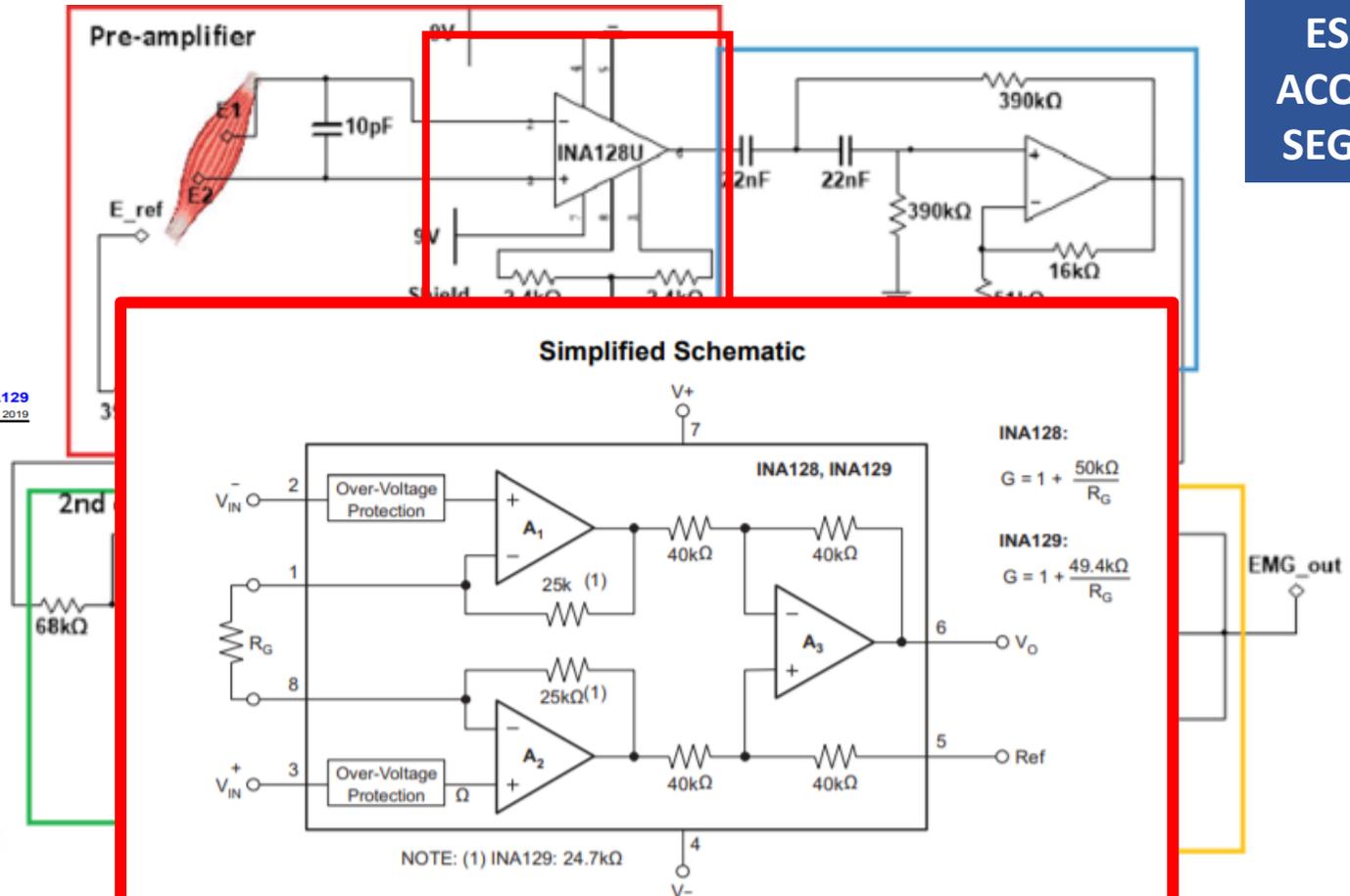
INA12x Precision, Low-Power Instrumentation Amplifiers

1 Features

- A newer version of this device is now available: [INA828](#)
- Low offset voltage: 50 μV maximum
- Low drift: 0.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ maximum
- Low Input Bias Current: 5 nA maximum
- High CMR: 120 dB minimum
- Inputs protected to $\pm 40\text{ V}$
- Wide supply range: $\pm 2.25\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$
- Low quiescent current: 700 μA

2 Applications

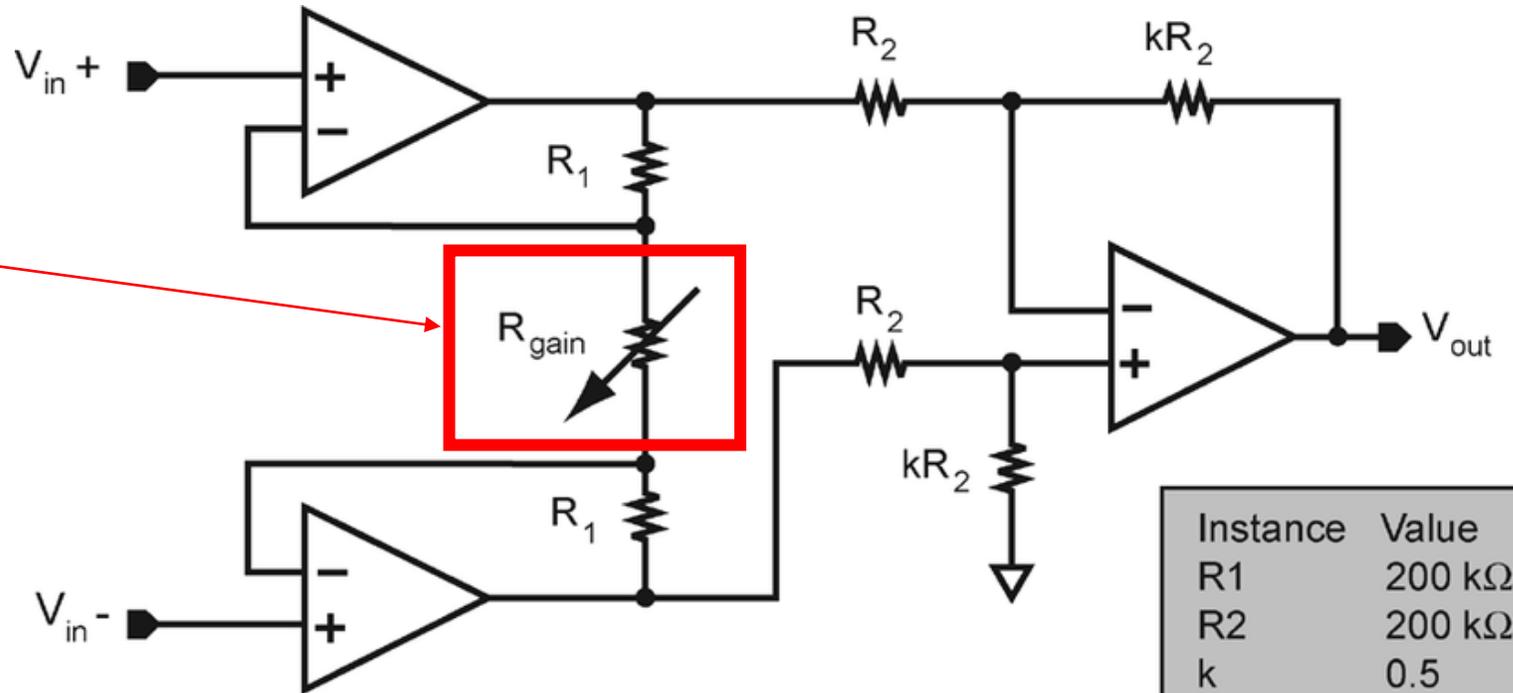
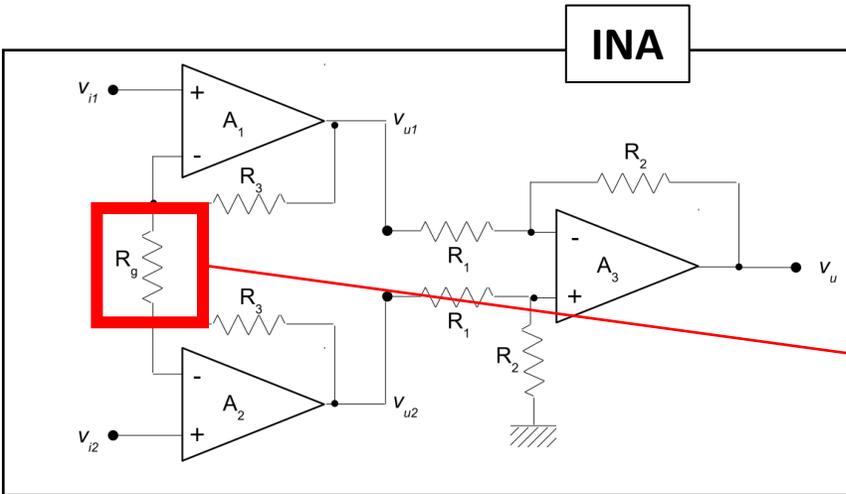
- Bridge amplifier
- Thermocouple amplifier
- RTD sensor amplifier
- Medical instrumentation
- Data acquisition



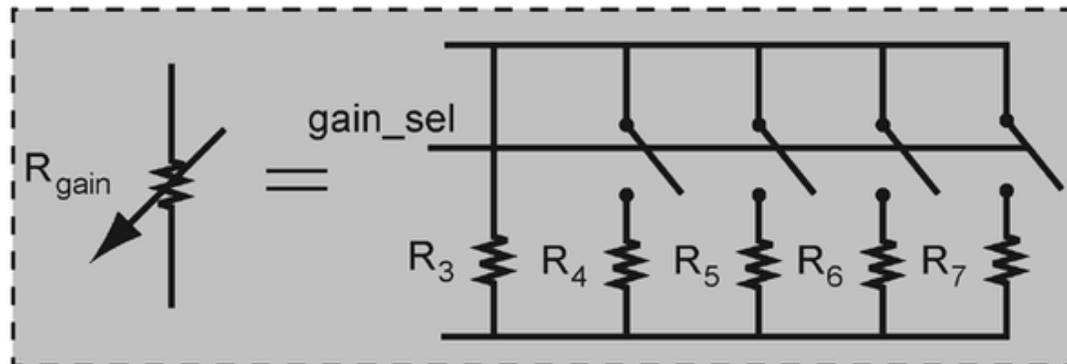
**ESEMPIO 2:
ACQUISIZIONE
SEGNALI EMG**

Amplificatore di guadagno programmabile (PGA)

- Una delle applicazioni più significative a cui si presta la struttura base dell'INA è la realizzazione di un amplificatore a guadagno programmabile (**programmable gain amplifier, PGA**).



- Nel PGA il **valore della resistenza R_g non è fisso** come nell'INA, ma viene **stabilito mediante un insieme di interruttori**, rendendo così controllabile il guadagno del dispositivo.
- Gli **interruttori vengono controllati di solito mediante segnali digitali** di controllo da microcontrollore

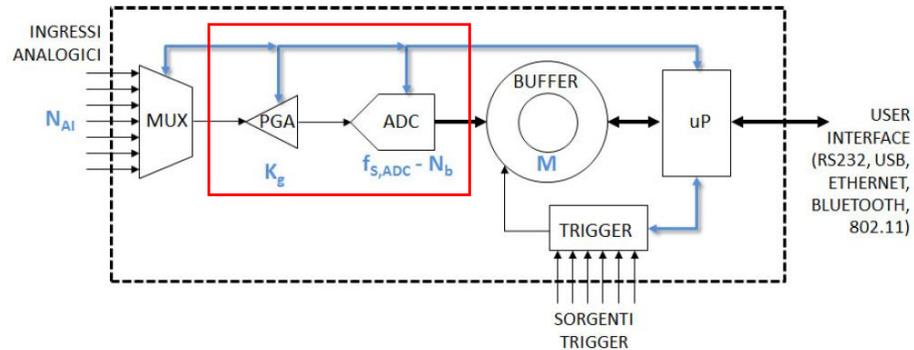


Instance	Value
R1	200 kΩ
R2	200 kΩ
k	0.5
R3	400 kΩ
R4	200 kΩ
R5	20 kΩ
R6	5 kΩ
R7	1.6 kΩ

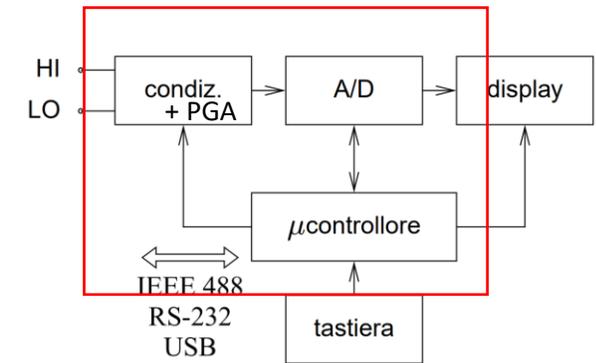
Amplificatore di guadagno programmabile (PGA): a cosa serve?

- La presenza del PGA è in particolare utile in qualsiasi catena di misura per **minimizzare l'incertezza introdotta dai successivi elementi**.
- La possibilità offerta dal PGA di **regolare l'ampiezza del segnale prima della fase di quantizzazione** fa in modo che la sua ampiezza massima sia prossima al valore di fondo scala del campo di uscita ammesso, massimizzando quindi l'utilizzo dei livelli di quantizzazione disponibili.
- Negli strumenti numerici dotati della capacità di **autoscaling** questa attività è eseguita in modo automatico, **selezionando il guadagno più adeguato del PGA mediante un segnale digitale di comando proveniente da un elemento di controllo, quale un microprocessore**.

SCHEDA DI ACQUISIZIONE

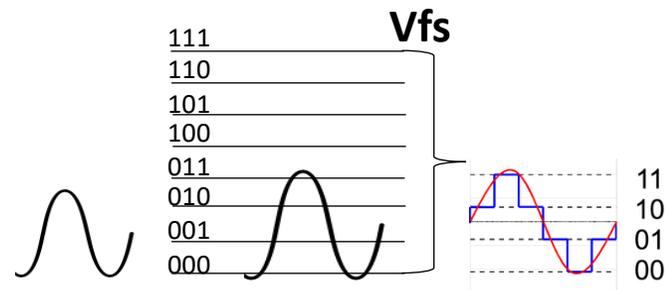
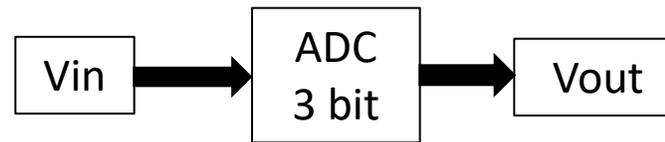


MULTIMETRO



(...)

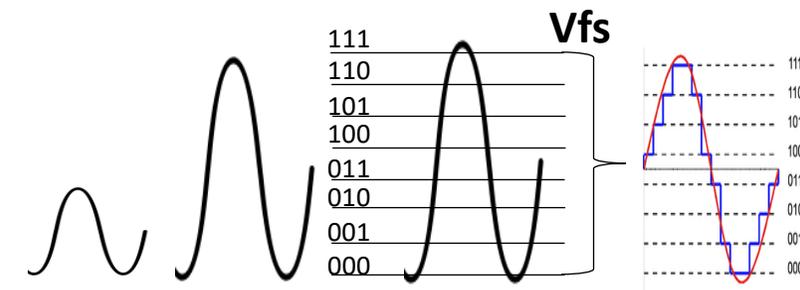
AMPIEZZA NON ADATTATA A FONDO SCALA ADC



SPRUTTATI SOLO 4 LIVELLI SUGLI 8 DISPONIBILI

→ SCARSA RISOLUZIONE

AMPIEZZA ADATTATA A FONDO SCALA ADC



SPRUTTATI 8 LIVELLI SUGLI 8 DISPONIBILI

→ MIGLIORE RISOLUZIONE

Outline

➤ Condizionamento del segnale

➤ Condizioni di non distorsione

➤ Amplificatore operazionale:
richiami e principali utilizzi circuitali

QUIZ 1



➤ Amplificatore da strumentazione

➤ Amplificatore di guadagno programmabile

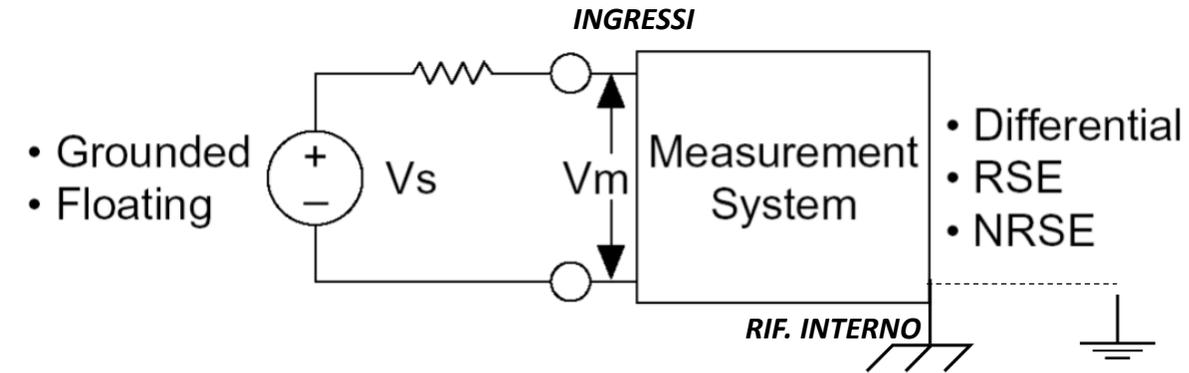
➤ Amplificatore di isolamento

QUIZ 2

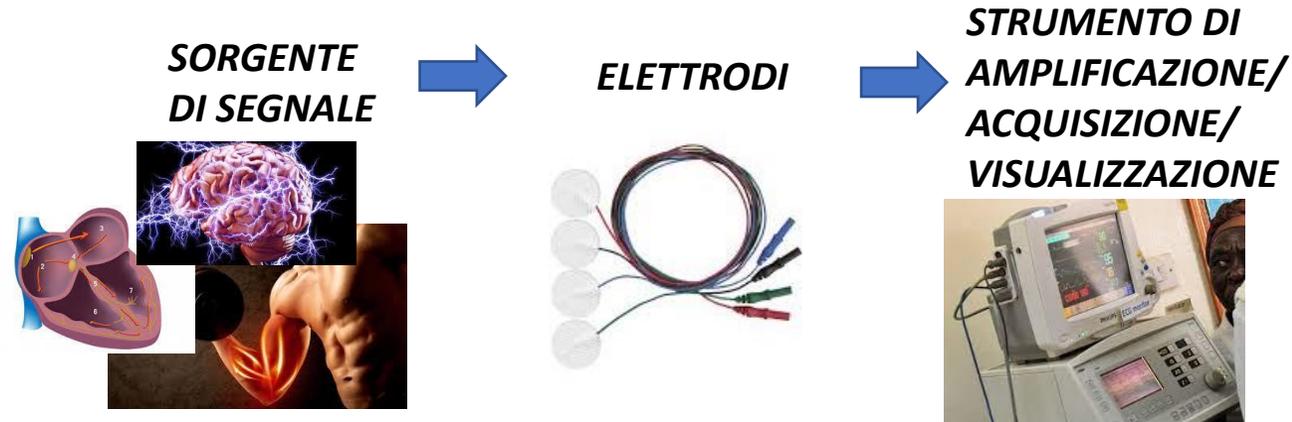


Amplificatori di isolamento: perchè sono utili in ambito biomedico?

Caso generale



Caso biomedicale: Misura di potenziali elettrici



- 1) Interesse per **piccole variazioni di segnale (μV - mV)** in presenza di **ampie tensioni di modo comune (da $<1\text{V}$ fino a 100V)**.
- 2) **Non esiste un riferimento predefinito** (massa) per i potenziali elettrici all'interno dell'organismo.
- 3) Il **percorso** da un punto qualsiasi del corpo **verso il potenziale di terra** non è descrivibile attraverso una semplice impedenza costante e **varia** in base al percorso considerato.
- 4) Eventuali **correnti troppo elevate** da strumentazione a paziente possono mettere **a rischio la sua sicurezza e la misura**.

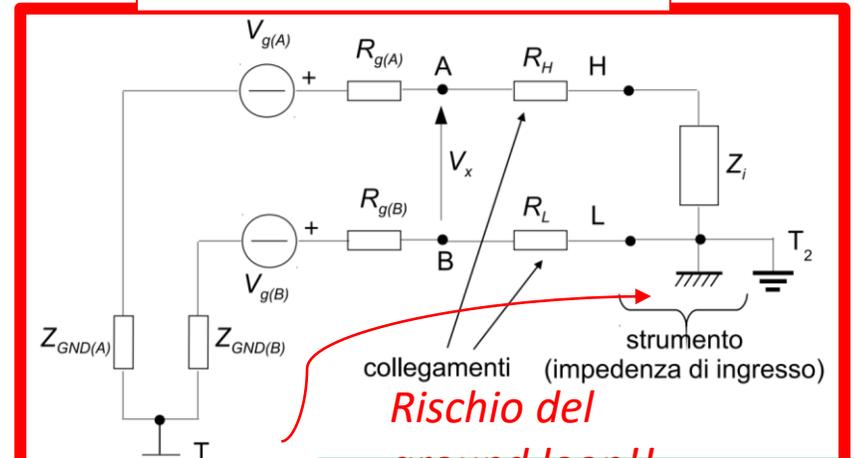
Amplificatori di isolamento: perchè sono utili in ambito biomedico?

- 1) Interesse per piccole variazioni di segnale (μV - mV) in presenza di ampie tensioni di modo comune (da $<1\text{V}$ fino a 100V).
- 2) non esiste un riferimento predefinito (massa) per i potenziali elettrici all'interno dell'organismo;
- 3) il percorso da un punto qualsiasi del corpo verso il potenziale di terra non è descrivibile attraverso una semplice impedenza costante e varia in base al percorso considerato.
- 4) Eventuali correnti troppo elevate da strumentazione a paziente possono mettere a rischio la sua sicurezza e la misura

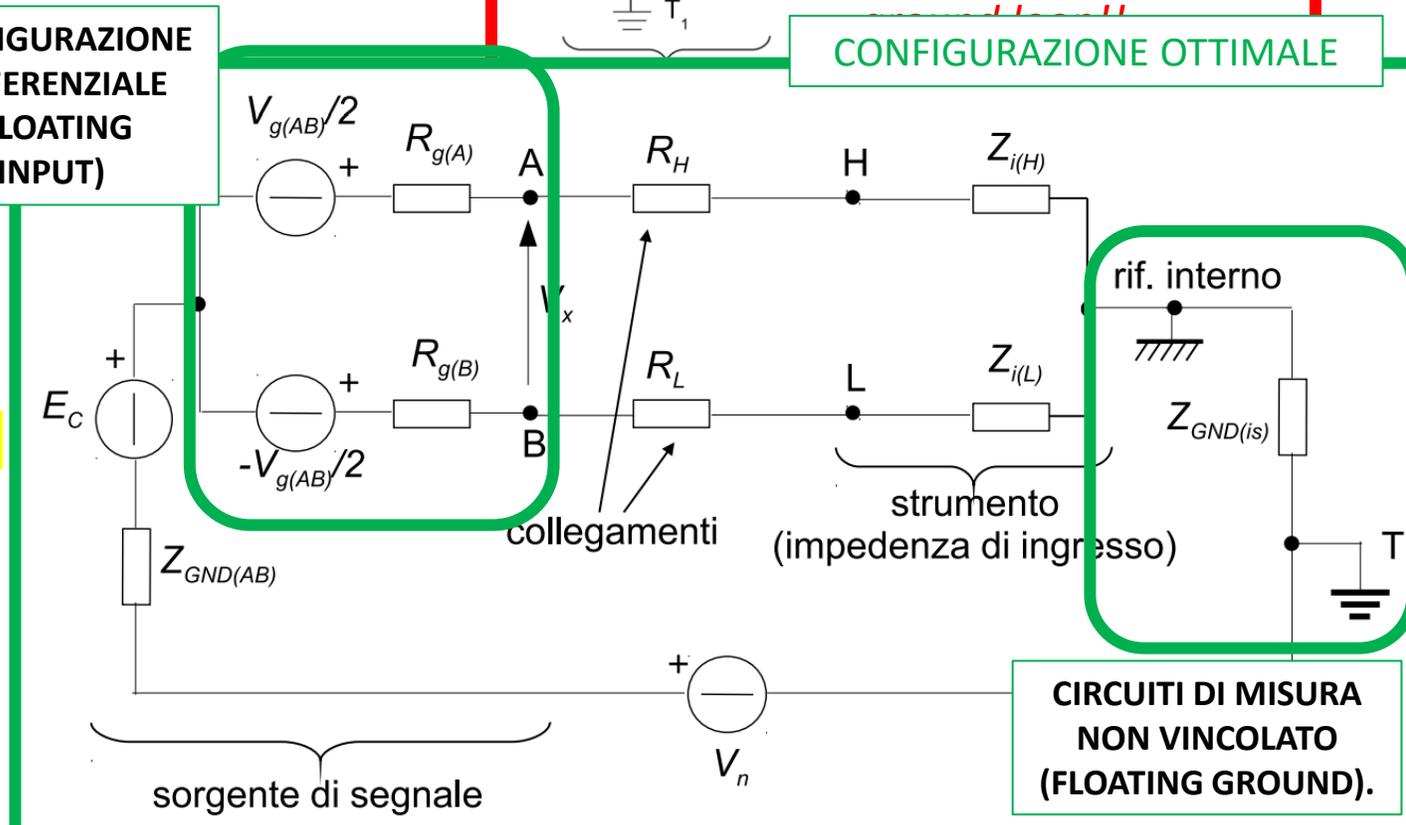
Soluzioni

- Le misure effettivamente considerate sono **misure differenziali** tra coppie di elettrodi o tra un elettrodo ed un **valore di riferimento definito per convenzione (sfruttando circuiti tipo INA, fino a tensioni di modo comune $<1\text{V}$)**
- Necessità di **isolare il riferimento interno** dal riferimento della strumentazione, tramite un'**impedenza di isolamento**, rendendo il **circuito di misura non vincolato**

CONFIGURAZIONE CRITICA



CONFIGURAZIONE OTTIMALE

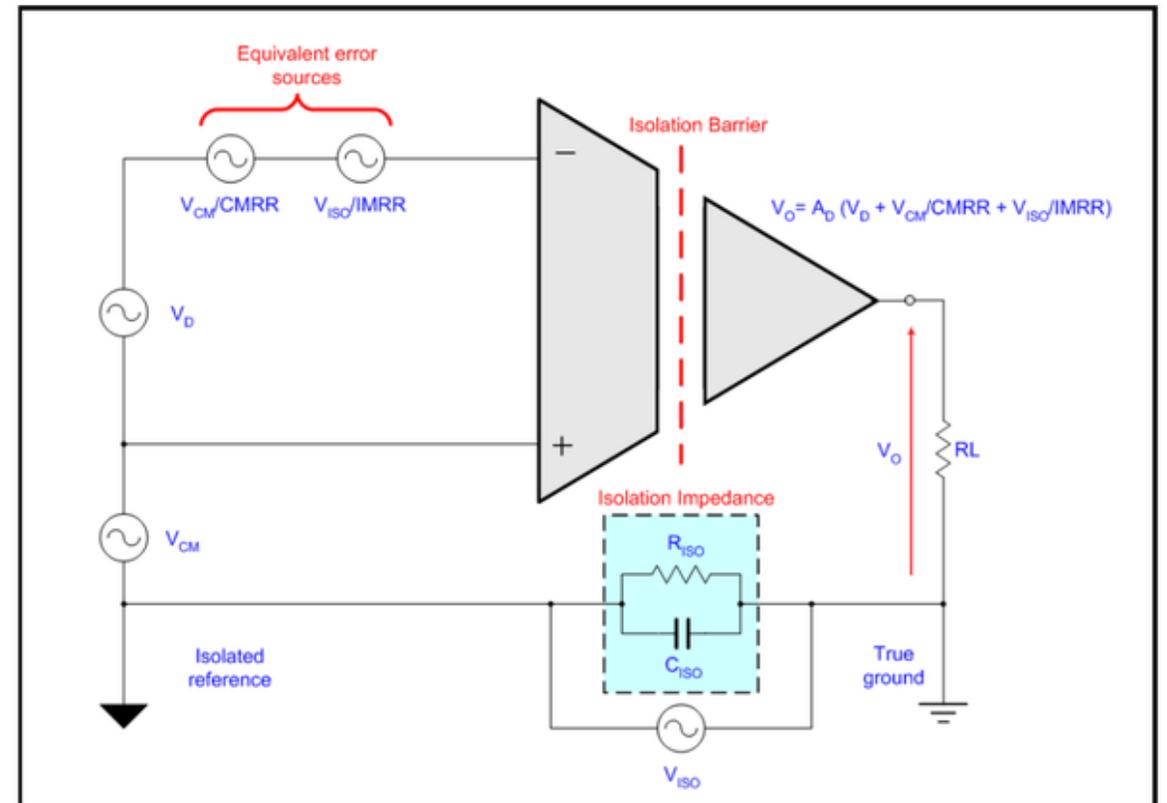
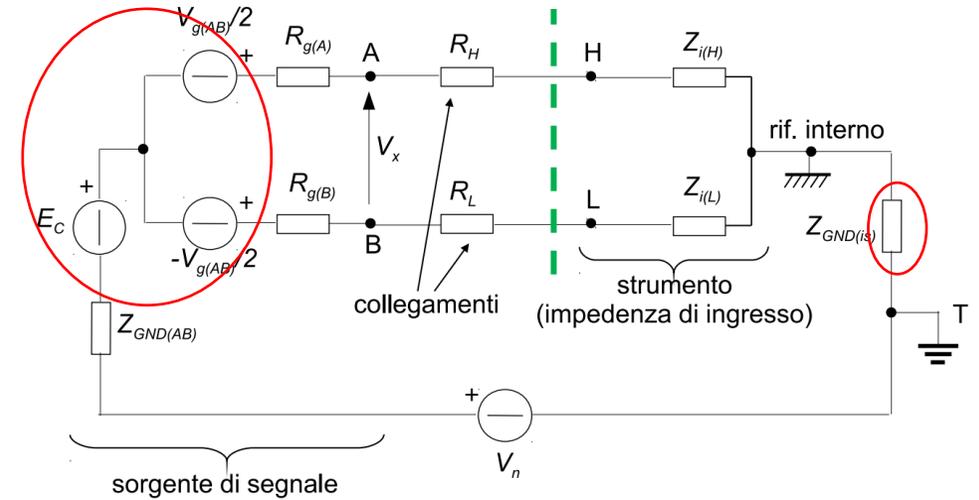


Amplificatori di isolamento: perchè sono utili in ambito biomedico?

- 1) Interesse per piccole variazioni di segnale (μV - mV) in presenza di ampie tensioni di modo comune (da $<1\text{V}$ fino a 100V).
- 2) non esiste un riferimento predefinito (massa) per i potenziali elettrici all'interno dell'organismo;
- 3) il percorso da un punto qualsiasi del corpo verso il potenziale di terra non è descrivibile attraverso una semplice impedenza costante e varia in base al percorso considerato.
- 4) Eventuali correnti troppo elevate da strumentazione a paziente possono mettere a rischio la sua sicurezza e la misura

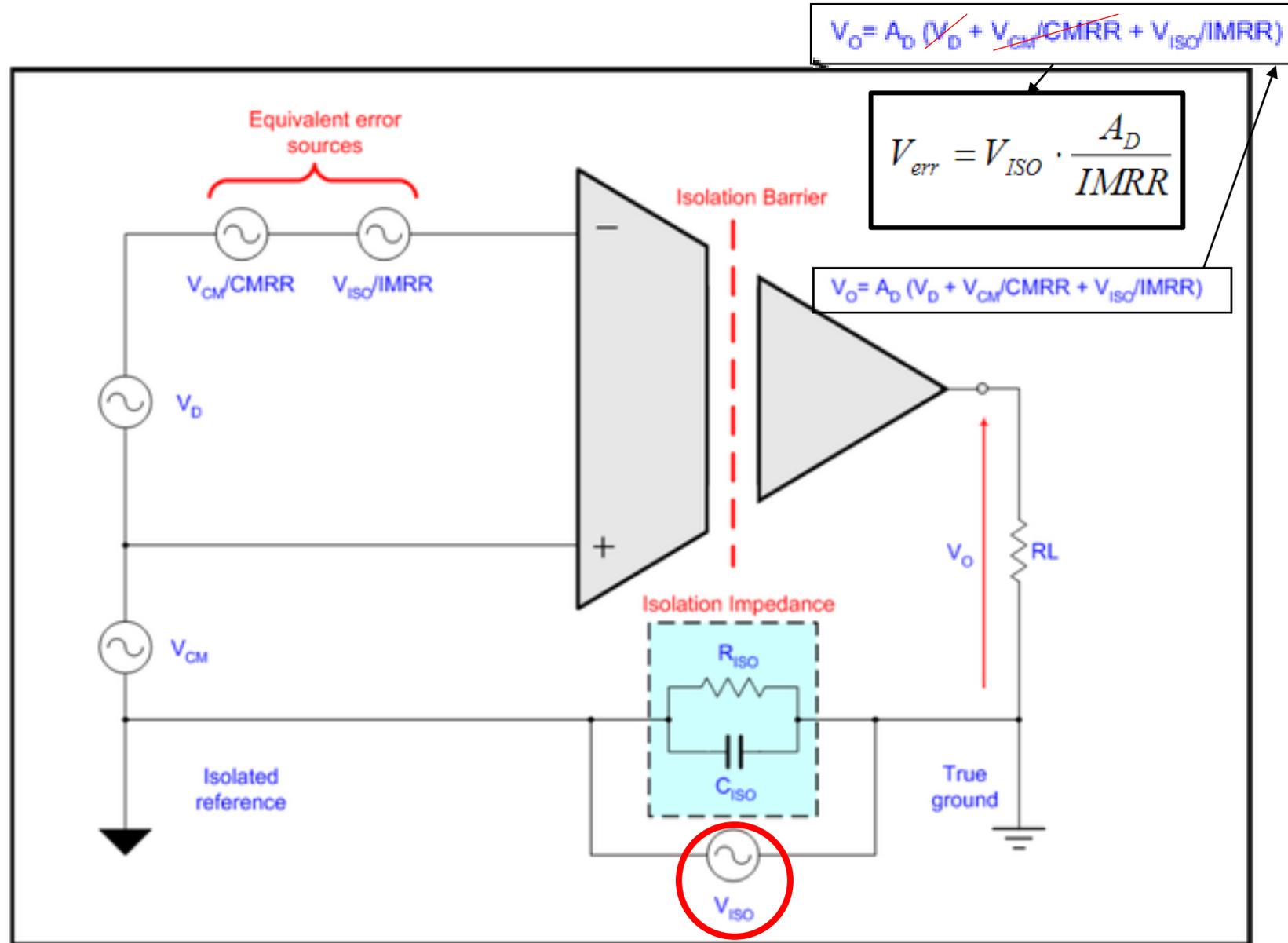
Soluzioni

- Sfruttati gli **AMPLIFICATORI DI ISOLAMENTO**, amplificatori differenziali che sono stati progettati per misurare i più piccoli segnali di corrente e di tensione quando si è in presenza di alta tensione in modalità comune (fino a kV), proteggono i componenti di acquisizione da tali tensioni.
- Il loro funzionamento consiste nel fornire sia una barriera di sicurezza elettrica che un isolamento elettrico dello stadio di ingresso di un canale di acquisizione.



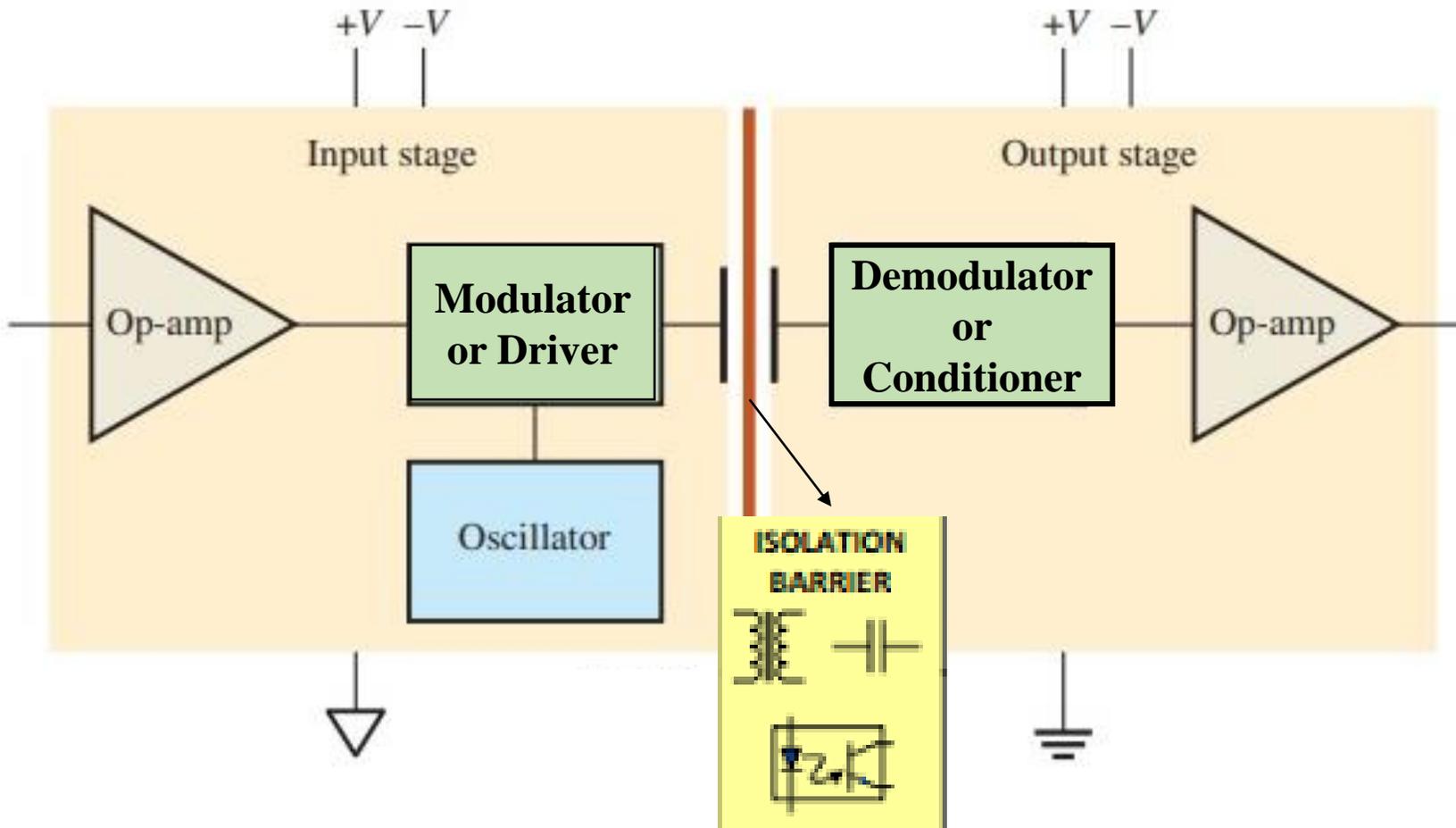
Amplificatore di isolamento: IMRR

- In aggiunta al termine TENSIONE DI MODO COMUNE (V_{CM}) viene introdotto il termine **TENSIONE DI ISOLAMENTO (V_{ISO})**.
- Si definisce di **Isolation Mode Rejection Ratio (IMRR)** il rapporto tra la **tensione di isolamento (V_{ISO})** e la **corrispondente tensione da questa indotta (V_{err})** sull'uscita dell'amplificatore di isolamento.
- Rispetto all'utilizzo della semplice impedenza di isolamento, l'utilizzo dell'amplificatore di isolamento può consentire sia **misure più accurate**, sia **un isolamento di sicurezza**.



Amplificatore di isolamento: principio di funzionamento generale

- Realizzabili con grande varietà di **componenti per realizzare l'isolamento** e con una **miriade di diversi circuiti elettronici per manipolare il segnale** e consentirne la trasmissione dal blocco di ingresso a quello di uscita
- Ricalcano tutti una **struttura comune**, utile per comprenderne il funzionamento.



SCHEMA DI FUNZIONAMENTO

STEP 1:

MODULAZIONE/CONVERSIONE DEL SEGNALE,

Con l'obiettivo di renderlo capace di attraversare la barriera di isolamento

STEP 2:

TRASMISSIONE DEL SEGNALE ATTRAVERSO LA BARRIERA DI ISOLAMENTO,

Sfruttando i principi fisici associati alla specifica tipologia

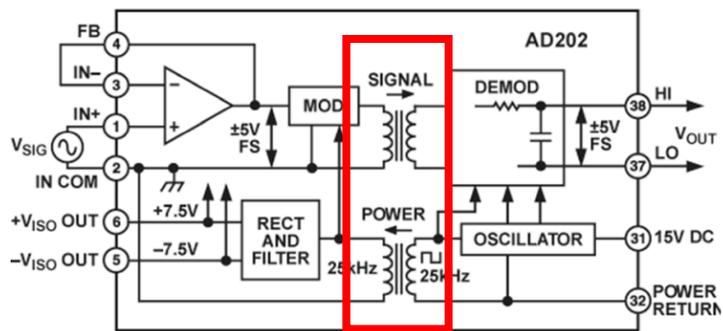
STEP 3:

ESTRAZIONE DEL SEGNALE ORIGINALE,

Tramite demodulazione con filtri passa basso o circuiti di condizionamento vari

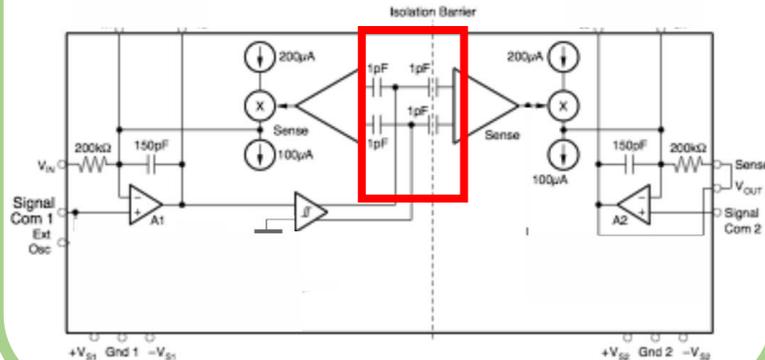
Amplificatore di isolamento: tipologie

A TRASFORMATORE



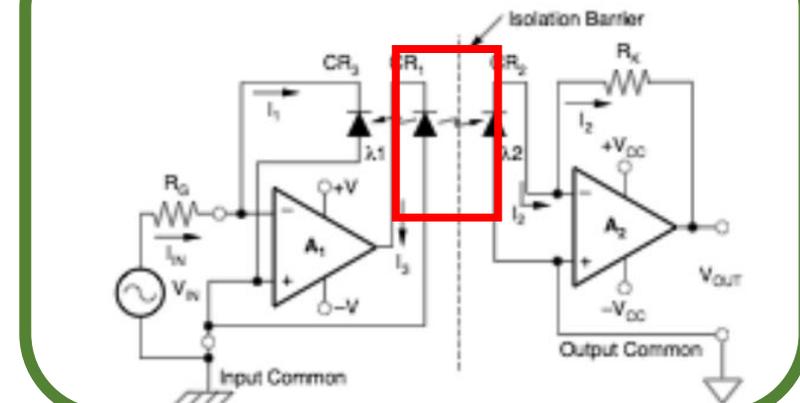
ELEMENTO CHIAVE:
TRASFORMATORE

CAPACITIVO

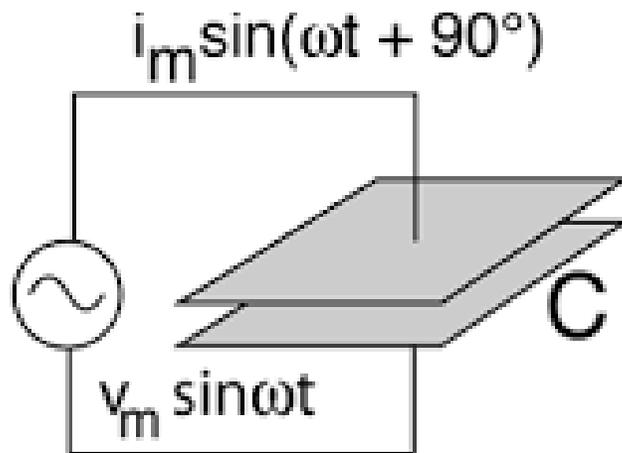
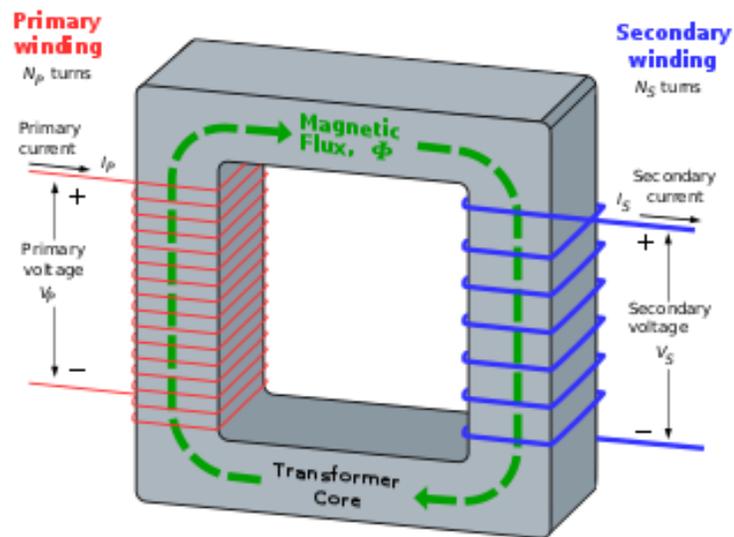


ELEMENTO CHIAVE:
CAPACITA' DI ACCOPPIAMENTO

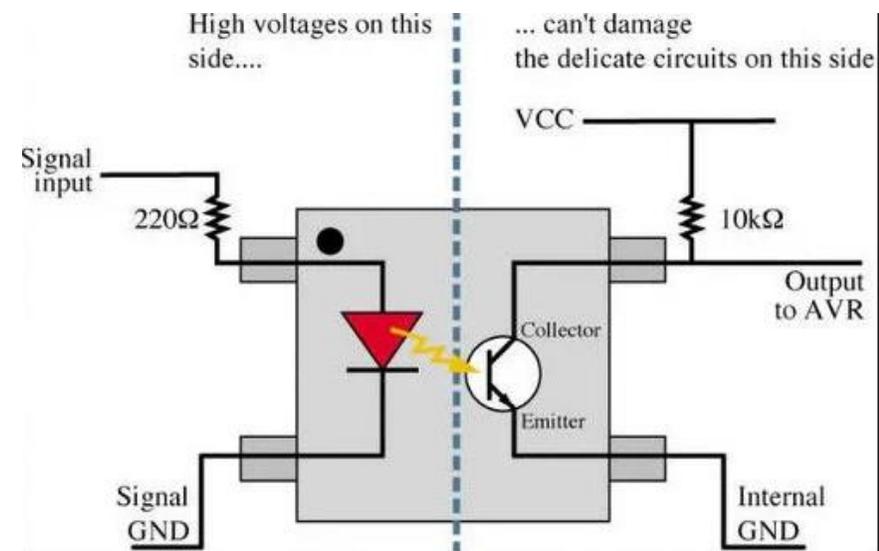
OPTOELETTRONICO



ELEMENTO CHIAVE:
OPTOISOLATORE

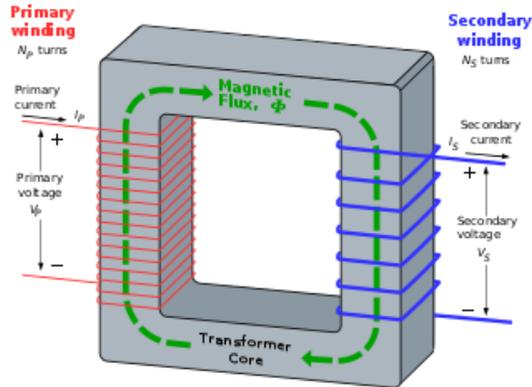


$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

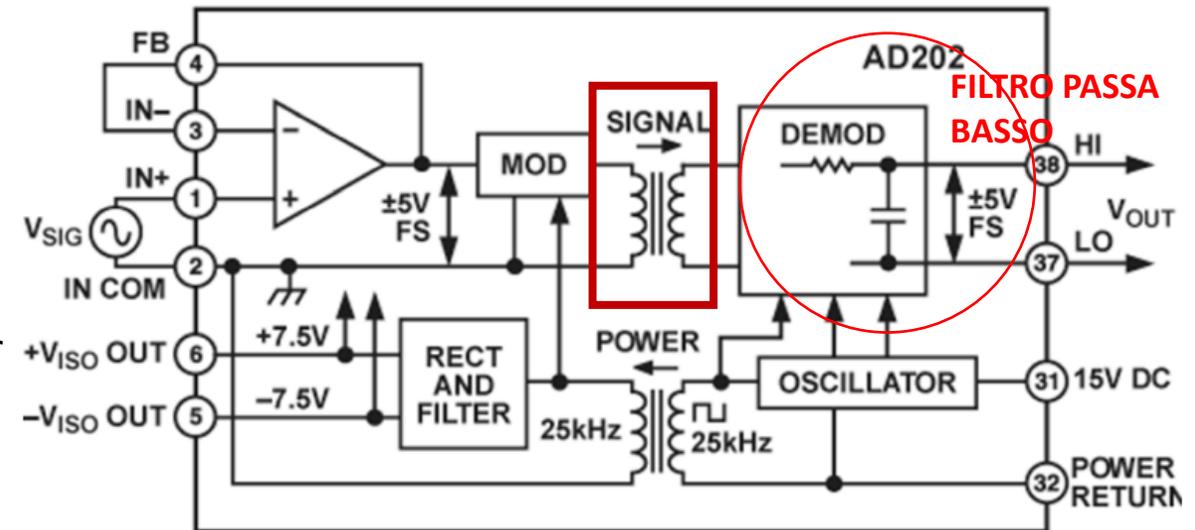


Amplificatore di isolamento a trasformatore

PRINCIPIO FISICO DI BASE



➤ Il segnale di interesse viene utilizzato per modulare un segnale portante ad alta frequenza ed il segnale risultante viene trasferito attraverso un trasformatore per essere poi ricostruito, all'altro lato del dispositivo, attraverso una demodulazione.



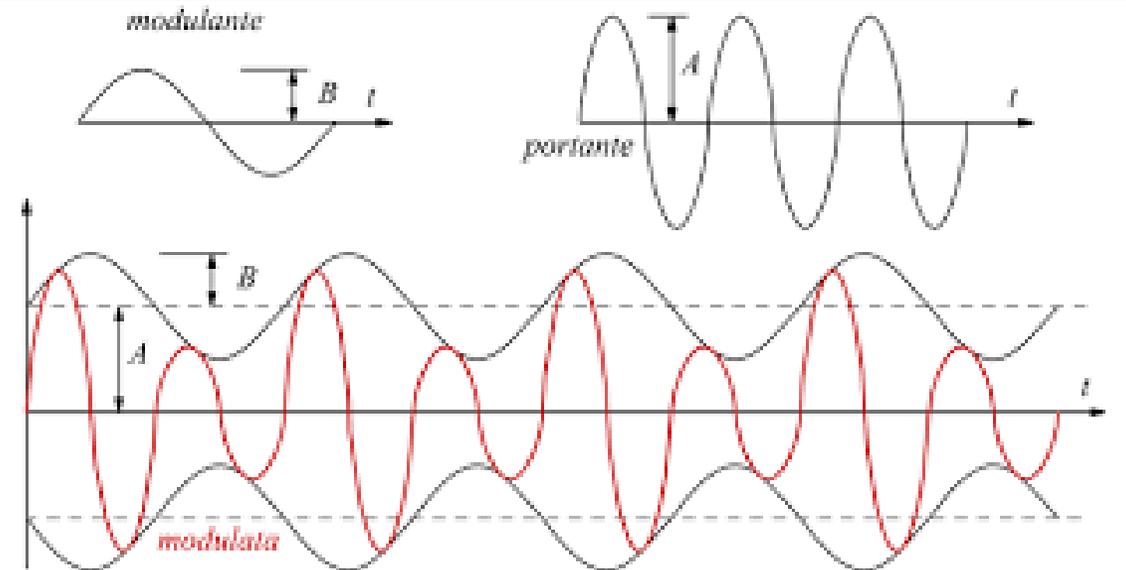
AD202JY di Analog Devices utilizza un accoppiamento con trasformatore per garantire un isolamento di 1000 V c.c. servendosi di un'unica alimentazione non isolata a 15 V. (Immagine da datasheet Analog Devices)

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO SEMPLIFICATO

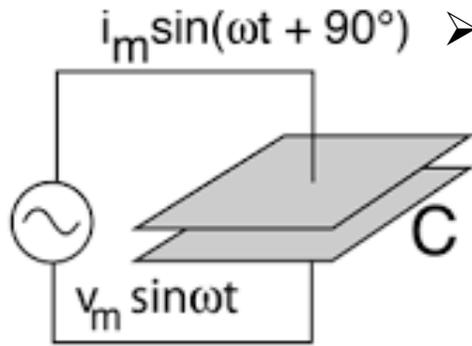
STEP 1: modulatore: il segnale va a moltiplicare una portante ad alta frequenza, che lo modula in ampiezza.

STEP 2: circuito magnetico trasformatore: il segnale viene trasferito, inalterato, ad un demodulatore.

STEP 3: il segnale modulato, moltiplicato per la portante, passa infine attraverso un **filtro passa-basso**, che permette di estrarre la componente in banda base, permettendo di recuperare l'informazione originaria $\rightarrow v_{OUT} = v_{SIG}$.

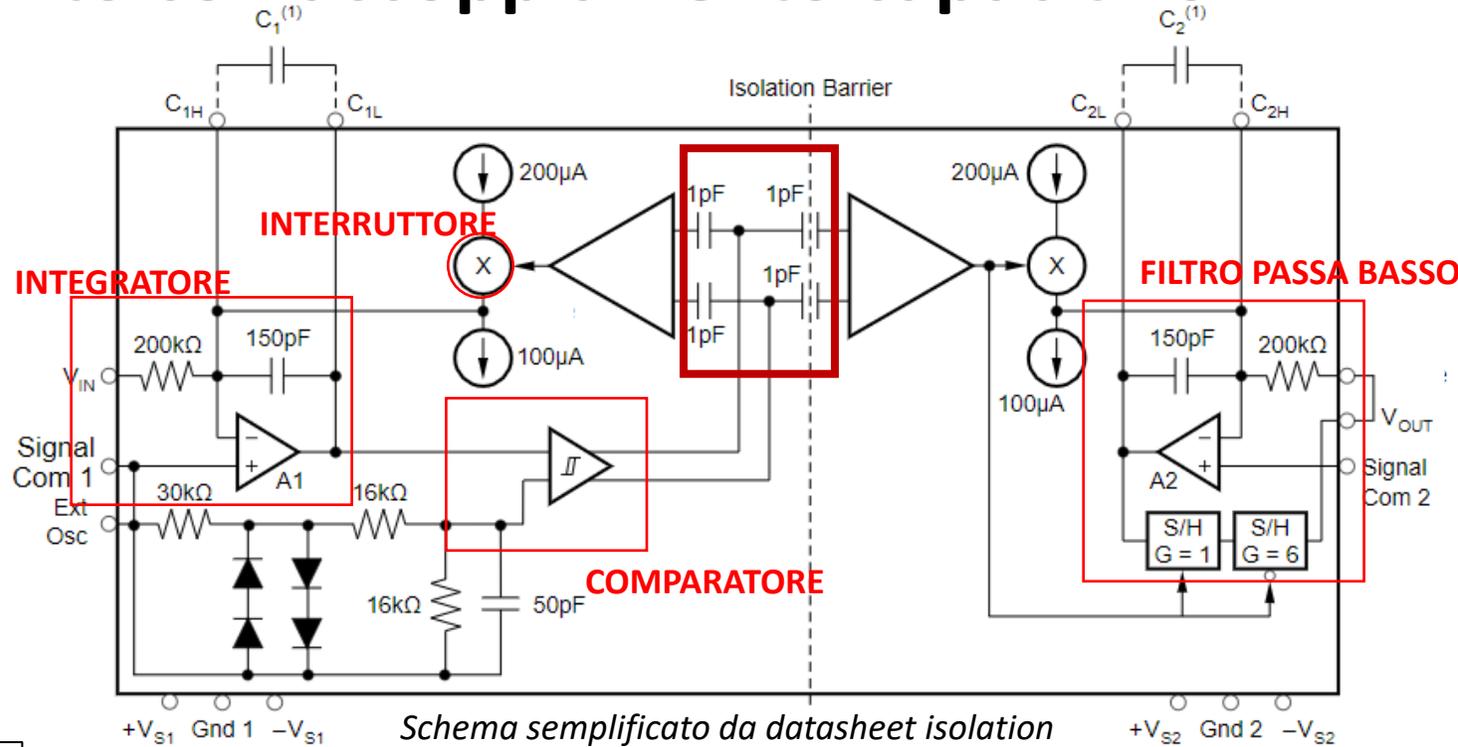


Amplificatore di isolamento con accoppiamento capacitivo



$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Il segnale di interesse viene utilizzato per modulare un segnale portante ad alta frequenza e viene trasferito attraverso capacità di accoppiamento che, al contrario, bloccano i segnali di modo comune che, molto spesso, si trovano in prevalenza alle frequenze basse.



Schema semplificato da datasheet isolation amplifier Burr-Brown ISO 120

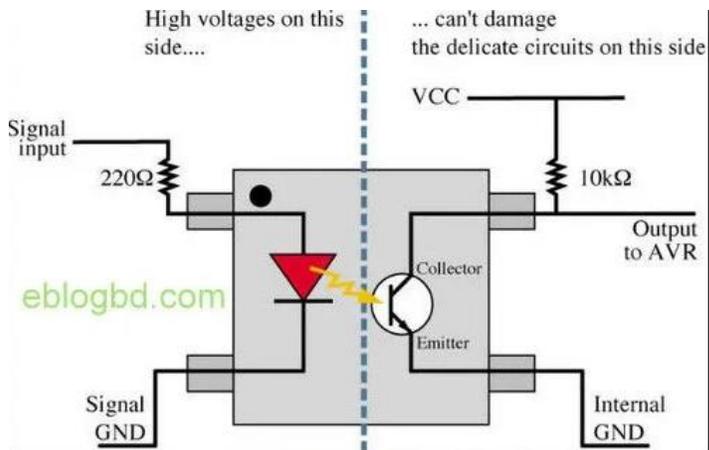
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO SEMPLIFICATO

STEP 1: Il circuito integratore in uscita genera quindi un **segnale triangolare il cui duty cycle sarà modulato in durata dal segnale V_{IN}** , poichè l'effetto della tensione V_{IN} sarà quello di **sbilanciare la durata delle fasi con pendenza positiva e negativa**.

STEP 2: Per il legame esistente tra tensione e carica in un condensatore, al condensatore si trasferirà una carica proporzionale secondo la formula $Q = -I_G \tau^+ + I_G \tau^- := \frac{V_{IN}}{R_I} \cdot T$

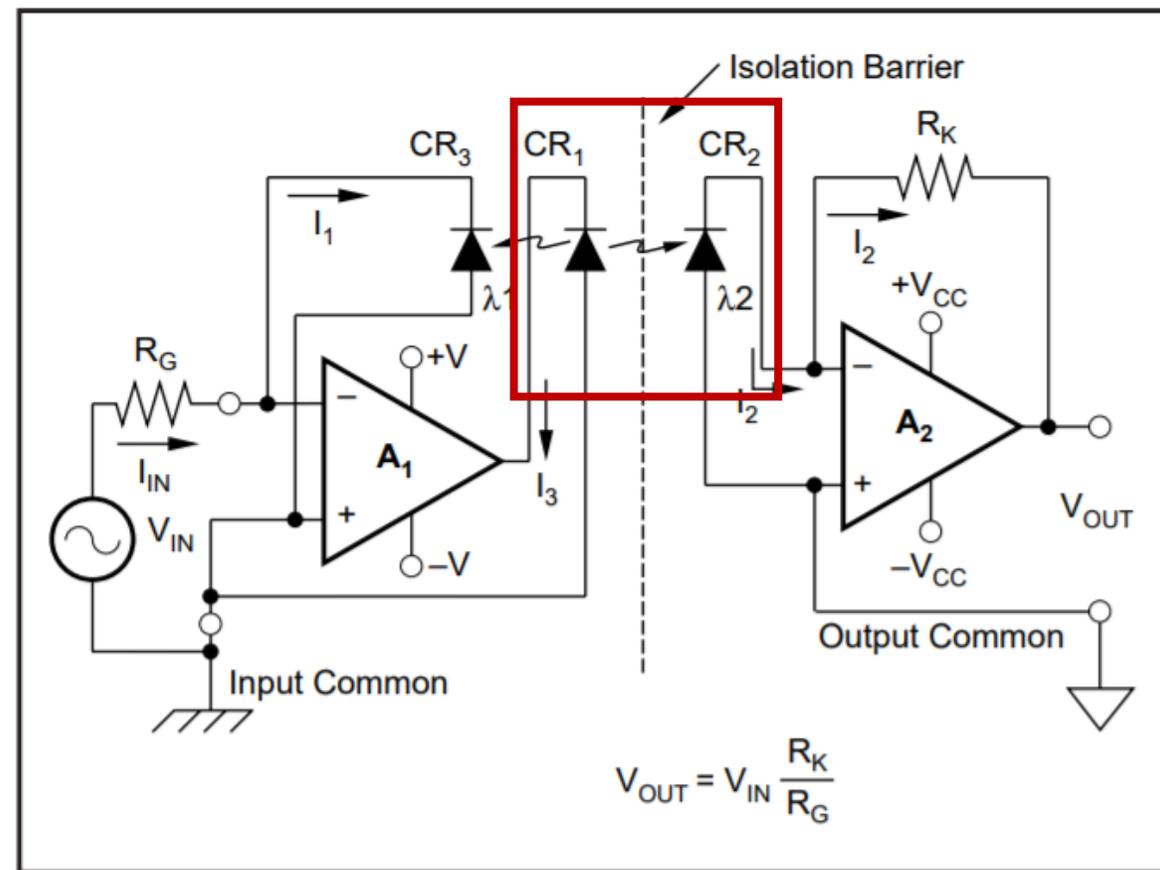
STEP 3: Dal lato demodulatore, un amplificatore differenziale riceve, attraverso accoppiamento capacitivo lo stesso segnale di uscita dal comparatore e il segnale originale viene estratto con un integratore che agisce come filtro passa basso.

Amplificatore di isolamento con accoppiamento ottico



➤ Il segnale di interesse viene convertito in energia luminosa per poter essere trasmesso nell'optoisolatore e poi riconvertito in segnale elettrico all'uscita

- un **optoisolatore** (optocoupler) è formato da un **diodo ad emissione di luce** (light-emitting diode, LED, che opera in **polarizzazione diretta**) e da un **fotorivelatore** (fotodiodo o, più spesso, fototransistor, che opera in **polarizzazione inversa**).
- Garantisce l'isolamento grazie al materiale trasparente (solitamente vetro o plastica) che separa i due elementi.



Schema semplificato da datasheet isolation amplifier Burr-Brown 3650

PROBLEMA PRINCIPALE: garantire la **linearità** della relazione ingresso-uscita

SOLUZIONE: uso della **retroazione** per **linearizzare** la caratteristica di trasferimento dell'accoppiatore ottico

Amplificatore di isolamento con accoppiamento ottico

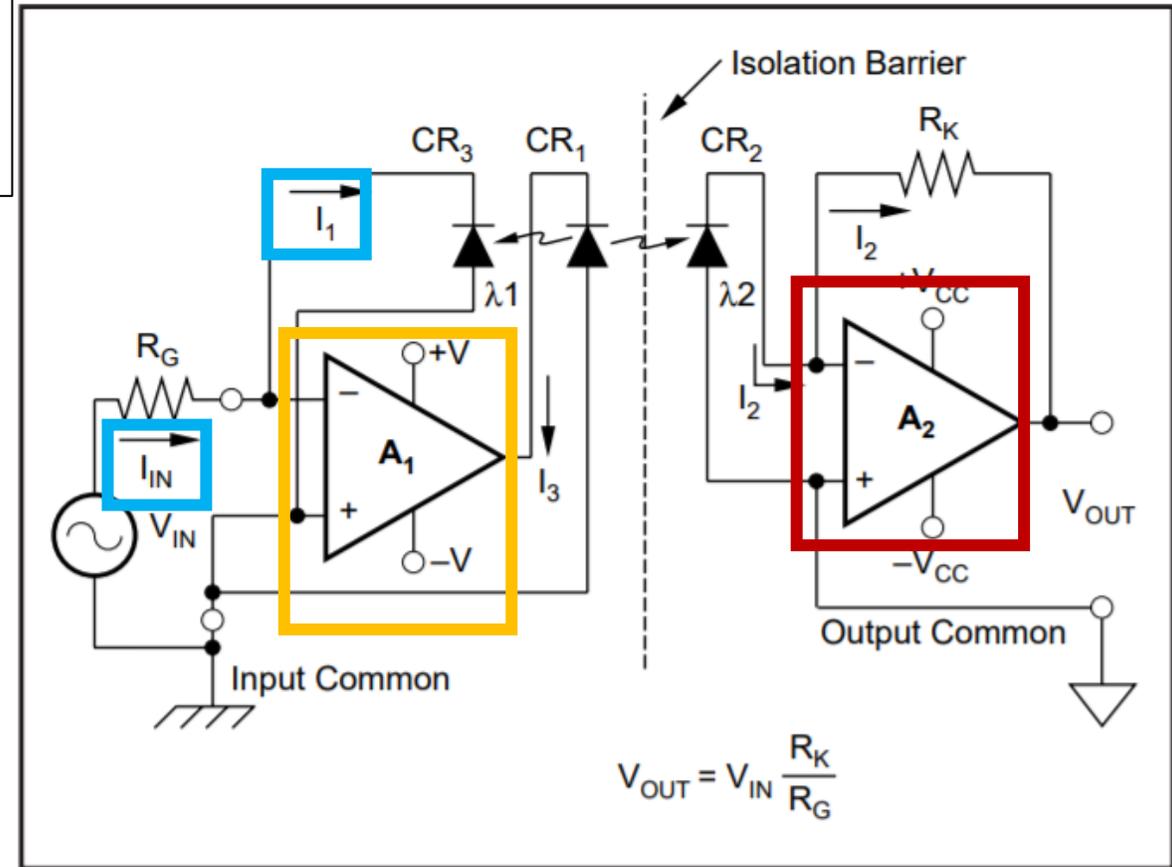
Ip: LED CR1 ed i due fotodiodi CR2 e CR3 sono accoppiati in modo da avere caratteristiche quanto più possibile uguali (**matching**). Inoltre, la luce emessa dal LED CR1 raggiunge i due fotodiodi con uguale intensità. Di conseguenza, le correnti I_1 , I_2 ed I_3 sono tra loro uguali.

- l'assorbimento di corrente da parte dell'amplificatore differenziale A_1 è trascurabile, quindi

$$I_1 = I_{IN} = \frac{V_{IN}}{R_G}$$

- Il circuito realizzato dall'amplificatore A_1 ha guadagno di corrente pari a -1, dato che $I_3 = I_2 = -I_1$.
- poichè i fotodiodi CR_2 e CR_3 sono percorsi da correnti della stessa intensità, dato che l'assorbimento di corrente da parte dell'amplificatore differenziale A_2 è anch'esso trascurabile, si ha: $V_{OUT} = -R_K I_2 = R_K I_1$

- E quindi conoscendo I_{IN} avremo che: $V_{OUT} = V_{IN} \frac{R_K}{R_G}$



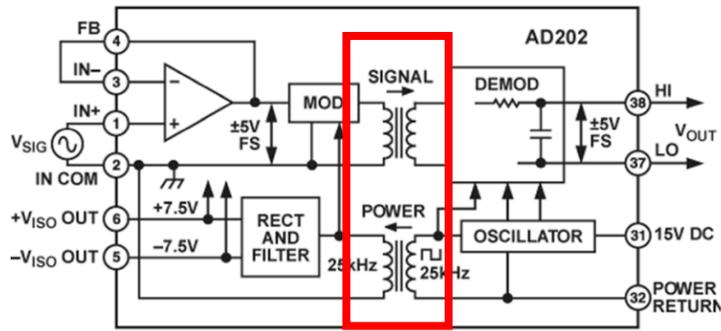
Schema semplificato da datasheet isolation amplifier Burr-Brown 3650)

PROBLEMA PRINCIPALE: garantire la **linearità** della relazione ingresso-uscita

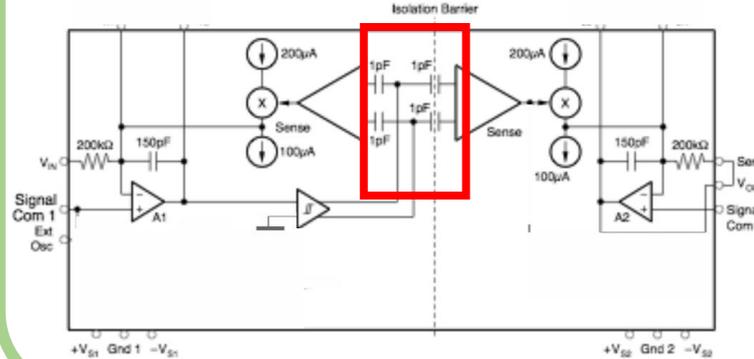
SOLUZIONE: uso della **retroazione** per **linearizzare** la **caratteristica** di trasferimento dell'accoppiatore ottico

Amplificatore di isolamento: caratteristiche a confronto

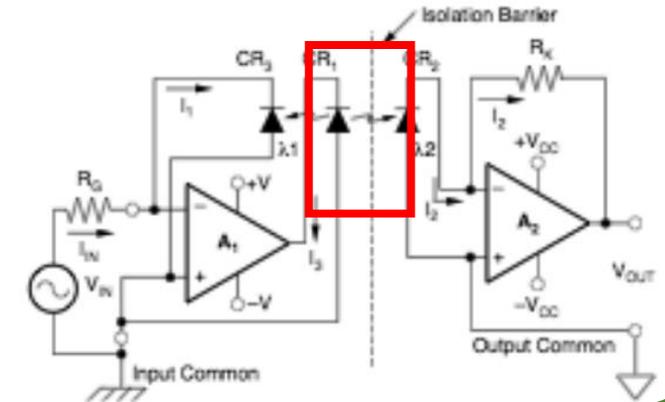
A TRASFORMATORE



CAPACITIVO



OPTOELETTRONICO



- Valori di tensione di isolamento limite **> 1 kV** e **IMRR > 100 dB**
- L'accoppiamento ha luogo totalmente **in forma analogica**.
- **Banda passante** massima legata a performance di oscillatore/modulatore.
- **Basso consumo energetico**
- Poca immunità a rumori
- **Degradazione meno rapida con il tempo**

- Valori di tensione di isolamento limite **> 1 kV** e **IMRR > 100 dB**
- L'accoppiamento ha luogo totalmente **in forma analogica**.
- **Banda passante** massima legata a performance di oscillatore/modulatore.
- Medio consumo energetico
- **Elevata immunità a rumori**
- **Degradazione meno rapida con il tempo**

- Valori di tensione di isolamento limite **> 1 kV** e **IMRR > 100 dB**
- Alcuni **analogici**, ma **spesso il segnale viene prima convertito in forma digitale**, riducendo i costi.
- Minori limitazioni di **banda passante**
- Elevato consumo energetico
- **Elevata immunità a rumori**
- Degradazione più rapida con il tempo
- **Ben consolidati sul mercato, convenienti per applicazioni lente**

Amplificatore di isolamento: Esempio di datasheet



Product Folder



Order Now



Technical Documents



Tools & Software



Support & Community



ISO124

SBOS074E – SEPTEMBER 1997 – REVISED JUNE 2018

ISO124 ± 10 -V Input, Precision Isolation Amplifier

1 Features

- 100% Tested for High-Voltage Breakdown
- Rated 1500 Vrms
- High IMR: 140 dB at 60 Hz
- Maximum Nonlinearity: 0.010%
- Bipolar Operation: $V_O = \pm 10$ V
- Packages: PDIP-16 and SOIC-28
- Ease of Use: Fixed Unity Gain Configuration
- Supply Range: ± 4.5 -V to ± 18 -V

2 Applications

- Industrial Process Control:
 - Transducer Isolator, Isolator for Thermocouples, RTDs, Pressure Bridges, and Flow Meters, 4-mA to 20-mA Loop Isolation
- Ground Loop Elimination
- Motor and SCR Control
- Power Monitoring
- PC-Based Data Acquisition
- Test Equipment

3 Description

The ISO124 is a precision isolation amplifier incorporating a novel duty cycle modulation-demodulation technique. The signal is transmitted digitally across a 2-pF differential capacitive barrier. With digital modulation, the barrier characteristics do not affect signal integrity, thus resulting in excellent reliability and good high-frequency transient immunity across the barrier. Both barrier capacitors are imbedded in the plastic body of the package.

The ISO124 is easy to use. No external components are required for operation. The key specifications are 0.010% maximum nonlinearity, 50-kHz signal bandwidth, and 200- μ V/ $^{\circ}$ C V_{OS} drift. A power supply range of ± 4.5 V to ± 18 V, and quiescent currents of ± 5 mA on V_{S1} and ± 5.5 mA on V_{S2} make the ISO124 device a good choice for a wide range of applications.

The ISO124 is available in 16-pin PDIP and 28-lead SOIC plastic surface-mount packages.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
ISO124	PDIP (16)	17.90 mm \times 7.50 mm
	SOIC (28)	20.01 mm \times 6.61 mm

(1) For all available packages, see the package option addendum at the end of the data sheet.

Simplified Schematic

Take home messages (1/2)

CONDIZIONAMENTO DEL SEGNALE

- Con il termine **condizionamento** del segnale si intende quell'elaborazione preliminare del segnale per renderlo adatto ad essere trattato dal sistema di acquisizione e misura. Tale blocco include tutti quei circuiti, modellabili come un doppio bipolo lineare, che hanno in ingresso un segnale elettrico da un trasduttore e in uscita un segnale elettrico pronto per essere convertito da un convertitore ADC per consentirne poi l'acquisizione.
- Il condizionamento ha come **obiettivi principali** quelli di adattamento del livello del segnale ai limiti dell'ADC, minimizzare l'effetto di carico prodotto sul generatore di segnale, realizzare una impedenza di uscita adatta e ottimizzare l'SNR.

CONDIZIONI DI NON DISTORSIONE

- Le operazioni di condizionamento del segnale devono essere realizzate in modo da non alterarne le caratteristiche essenziali e da rispettare **due condizioni di non distorsione**: in termini di guadagno, esso deve essere costante e indipendente dalla frequenza (entro determinati limiti); in termini di fase, essa deve essere lineare e variare proporzionalmente rispetto alla frequenza, in modo da garantire un ritardo di gruppo.

AMPLIFICATORE OPERAZIONALE:

RICHIAMI E PRINCIPALI UTILIZZI

CIRCUITALI

- Le caratteristiche principali **dell'amplificatore operazionale** sono: amplificazione infinita (in pratica molto grande, maggiore di 10^5), impedenza di ingresso infinita (R_i) (dell'ordine di $10^8 \Omega$), impedenza di uscita nulla (R_o) (in pratica dell'ordine di qualche Ω).
- Tali caratteristiche lo rendono ottimale per essere utilizzato nei circuiti di condizionamento in modo da minimizzare il carico sulle sorgenti di segnale e ridurre l'impedenza in uscita verso i sistemi di acquisizione.
- Combinando tali amplificatori in circuiti con retroazione con componenti passivi è possibile realizzare diverse operazioni: somma di più tensioni, moltiplicazione per una costante, filtraggio, rettificazione, comparazione, adattamento di impedenza e differenza di tensioni.
- L'amplificatore differenziale è una delle configurazioni predominanti nei circuiti di condizionamento biomedicali, la cui struttura tuttavia deve necessariamente essere resa più complessa per ridurre al minimo l'effetto delle non idealità sul CMRR.

Take Home Messages (2/2)

AMPLIFICATORE DA STRUMENTAZIONE

- La struttura di un **amplificatore da strumentazione (INA)** può pensarsi derivata dall'amplificatore differenziale ideale, ma con modifiche e integrazione volte a limitare l'effetto dell'incertezza dovuta da: variabilità valore resistenze di retroazione, variabilità resistenze della sorgente, non idealità dell'amplificatore operativo.
- La struttura composta da 3 Opamp presenta una resistenza di ingresso molto elevata, una resistenza di uscita molto piccola, ed un guadagno indipendente dalle sorgenti di segnale.
- Viene solitamente fornito in forma integrata di chip, al quale l'utilizzatore deve aggiungere solo la resistenza di guadagno, che verrà scelta in base all'amplificazione desiderata.

AMPLIFICATORE DI GUADAGNO PROGRAMMABILE

- L'**amplificatore di guadagno programmabile (PGA)** è derivato dalla struttura dell'INA con l'unica differenza per quanto riguarda la resistenza di guadagno che anziché essere fissa, può essere regolata tramite una serie di comandi generalmente inviati da un microcontrollore.
- Il PGA risulta particolarmente importante tra il condizionamento e l'ADC per adattare l'ampiezza del segnale al fondo scala del convertitore in modo tale da sfruttare tutti i livelli di quantizzazione disponibili.

AMPLIFICATORE DI ISOLAMENTO

- L'**amplificatore di isolamento** è un componente particolarmente utilizzato in applicazioni biomedicali in quanto aggiunge alla riduzione delle correnti di modo comune garantita dalla configurazione con floating input e floating ground anche la sicurezza elettrica per il paziente, isolando il lato del circuito che riceve la sorgente e quello che fornisce il valore di uscita.
- La capacità di tale amplificatore di separare ingresso da uscita viene valutata dall'**isolation mode rejection ratio (IMRR)**, rapporto tra la tensione di isolamento (V_{ISO}) e la corrispondente tensione da questa indotta (V_{err}) sull'uscita dell'amplificatore di isolamento.
- L'isolamento può essere garantito tramite diversi principi di accoppiamento: a trasformatore, basandosi su un trasferimento induttivo, capacitivo, tramite trasferimento di una carica proporzionale alla tensione in ingresso, o ottico, tramite l'utilizzo di un **optoisolatore che trasforma il segnale in energia luminosa e poi lo riconverte in segnale elettrico**