



# I.I.S. "G. B. PENTASUGLIA" MATERA

RELAZIONE LABORATORIALE N. 3

Materia: Telecomunicazioni

Nome: Antonio

Cognome: Bellamia

Data: 16/02/2024

Classe: 4 D

INDIRIZZO: Informatica

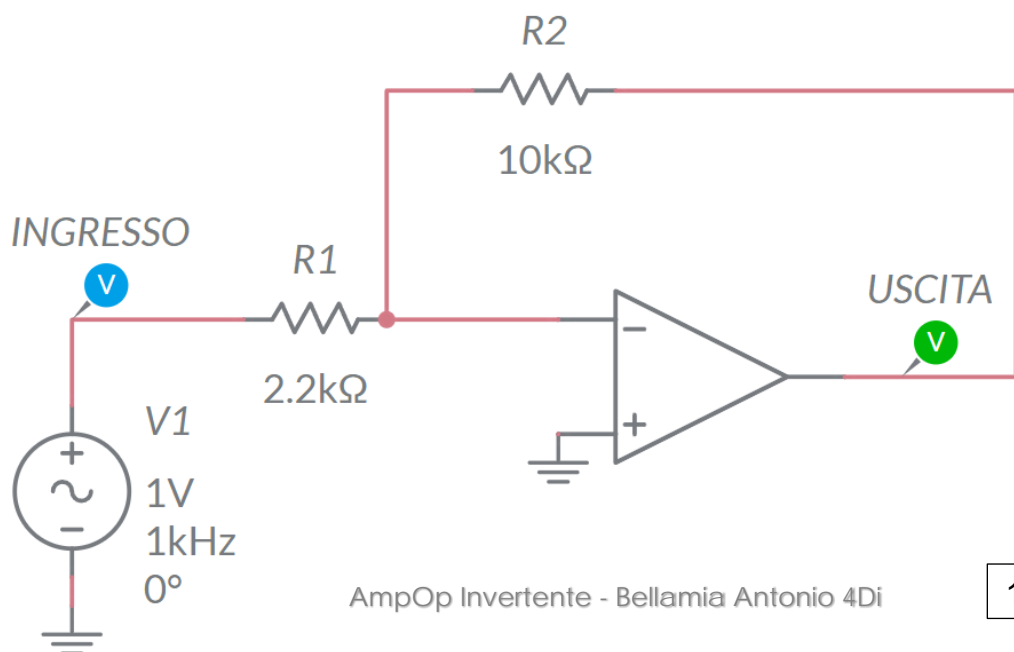
TITOLO della prova

Studio degli amplificatori operazionali

Obiettivo della prova

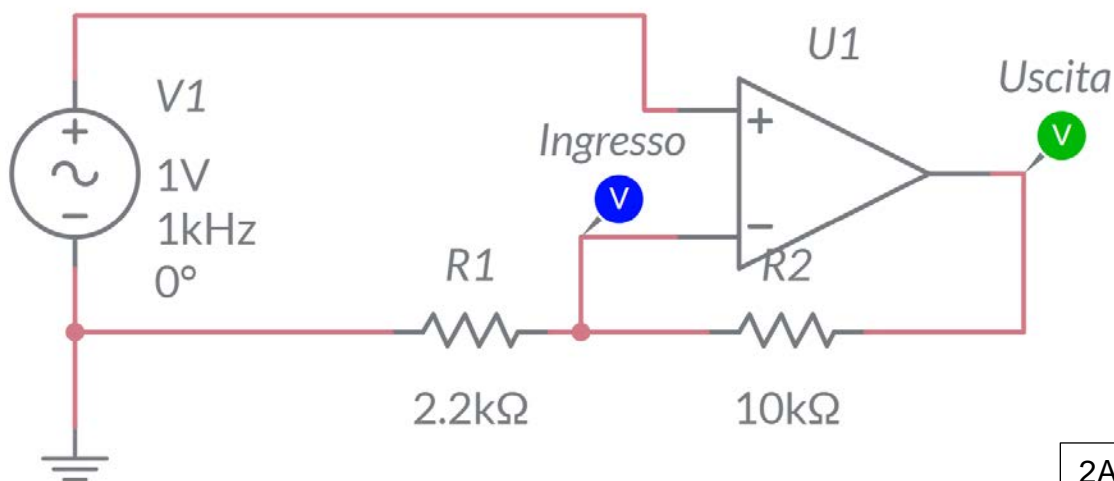
Analizzare amplificatori operazionali invertenti e non invertenti sottoposti ad un regime di corrente continua e alternata

## SCHEMA ELETTRICO



AmpOp Invertente - Bellamia Antonio 4Di

1A

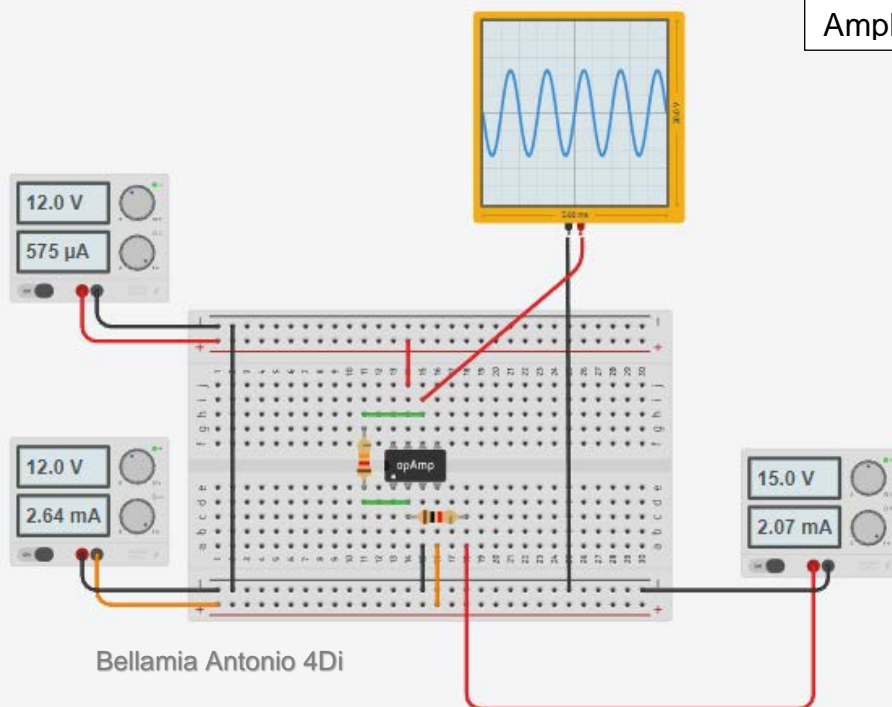


AmpOp Non Invertente - Bellamia Antonio 4Di

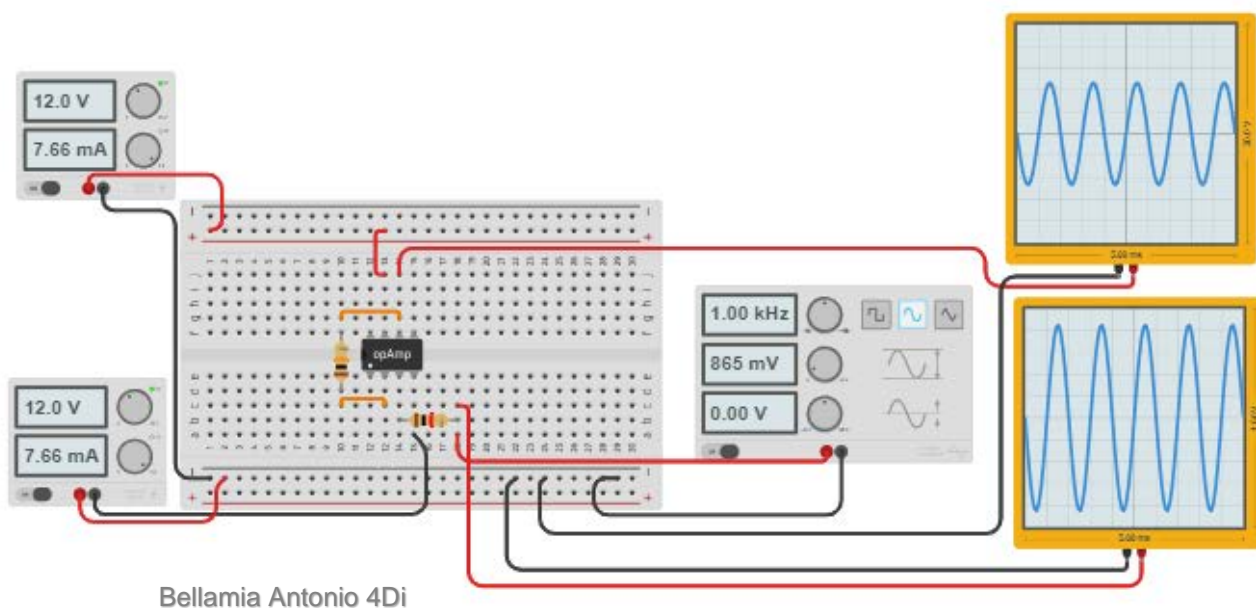
2A

## SCHEMA TOPOGRAFICO

Schema 1B,  
Amplificatore Invertente



Schema 2B,  
Amplificatore Non Invertente



## Descrizione e caratteristiche degli strumenti e apparecchi utilizzati

Strumento	Tipo	Costruttore	Mod. N. Serie	Classe (precisione)*	Portata*
Generatore	Banco	De Lorenzo spa	ModUL314	nd	nd
Generatore di funzione	Digitale	Tektronix	GFG-8219A	$\pm 5\% + 1\text{Hz}$	$0.3\text{Hz} \div 3\text{MHz}$
Oscilloscopio	Digitale	Metravi	DSO50D	$\pm 3\%$	50MHz
Resistore 1	Resistore a strato	N/D	N/D	$\pm 5\%$	2,2K $\Omega$
Resistore 2	Resistore a strato	N/D	N/D	$\pm 5\%$	10K $\Omega$
Amplificatore	Operazionale	N/D	D 39	N/D	$\pm 12\text{V}$
Multimetro	Digitale	Mastech	M9803R	$\pm 0.3\% / \pm 0.8\% / \pm 0.5\% \text{ rdg}$	10A/400V/40M $\Omega$
Cavi	Da laboratorio				

\*I valori del multimetro sono nell'ordine di Corrente Continua, Tensione e Resistenza.

\*\*I valori di precisione e portata provengono dalle schede tecniche allegate alla presente relazione.

## Misure effettuate – Elaborazione delle misure- Formule adoperate

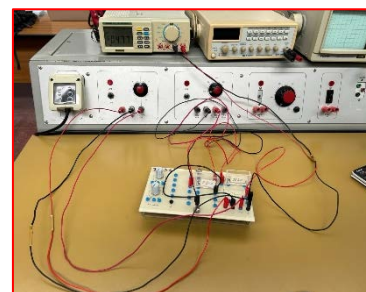
### • PROVA 1: AMPLIFICATORE OPERAZIONALE INVERTENTE IN CORRENTE CONTINUA

DATI	
R1	2,2k $\Omega$
R2	10k $\Omega$
Vi	1,02V
Vo	-4,77V

$$A = \frac{R2}{R1} = -\frac{10\text{k}\Omega}{2,2\text{k}\Omega} = -4,54$$

$$Vo = A \times Vi = -4,54 \times 1,02\text{V} = -4,64$$

La Vo da noi calcolata corrisponde, tenendo conto della precisione dello strumento, con quella mostrata effettivamente in uscita sulla strumentazione. Questa prima prova è stata effettuata in regime di corrente continua.



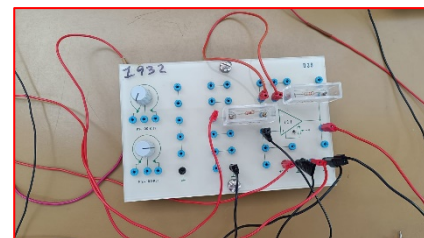
### • PROVA 2: AMPLIFICATORE OPERAZIONALE INVERTENTE IN CORRENTE CONTINUA

DATI	
R1	2,2k $\Omega$
R2	10k $\Omega$
Vi	3V
Vo	-12,5V

$$A = \frac{R2}{R1} = -\frac{10\text{k}\Omega}{2,2\text{k}\Omega} = -4,54$$

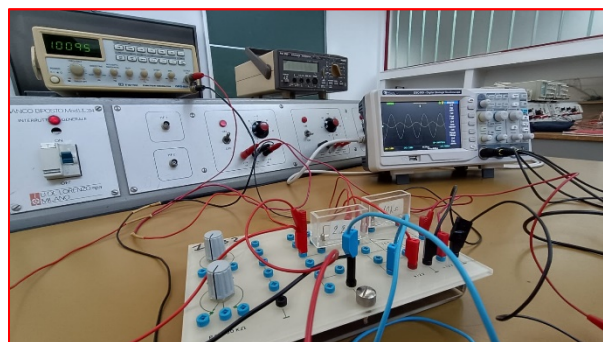
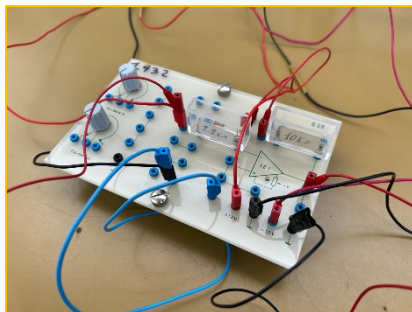
$$Vo = A \times Vi = -4,54 \times 3\text{V} = -13,62$$

La Vo da noi calcolata corrisponde, tenendo conto della precisione dello strumento, con quella mostrata effettivamente in uscita sulla strumentazione. Questa seconda prova è stata effettuata in regime di corrente continua.



- PROVA 3: AMPLIFICATORE OPERAZIONALE INVERTENTE IN CORRENTE ALTERNATA**

DATI	
R1	2,2k $\Omega$
R2	10k $\Omega$
Frequenza	1,01kHz
Fase	186°



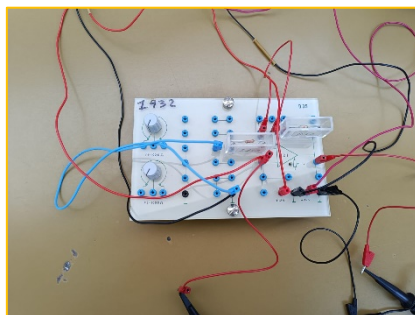
	CH1 (INGRESSO)	CH2 (USCITA)
Vpp	2V	9,28V
Vmax	1,28V	4,4V
Vmin	-800mV	-4,88V

Possiamo notare l'amplificazione di tipo invertente dal segnale mostrato sull'oscilloscopio:



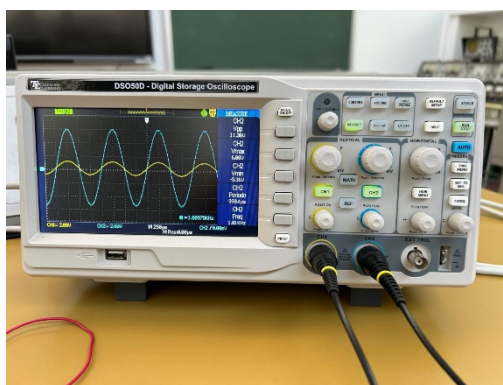
- PROVA 4: AMPLIFICATORE OPERAZIONALE NON INVERTENTE IN CORRENTE ALTERNATA**

DATI	
R1	2,2k $\Omega$
R2	10k $\Omega$
Frequenza	1,01kHz
Fase	4,37°



	CH1 (INGRESSO)	CH2 (USCITA)
Vpp	2,08V	11,36V
Vmax	1,28V	6V
Vmin	-800mV	-5,36V

Possiamo notare l'amplificazione di tipo non invertente dal segnale mostrato sull'oscilloscopio:

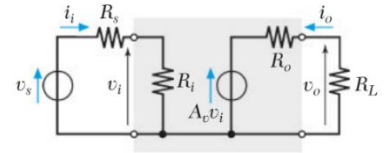




## Relazione - Teoria

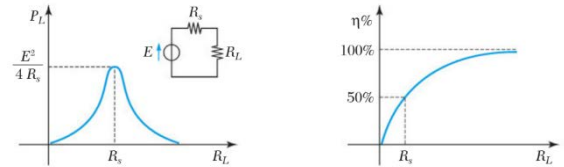
Per lo studio degli amplificatori operazionali approfondire innanzitutto le sue caratteristiche e successivamente sono stati analizzati gli effetti della retroazione.

Un amplificatore è un dispositivo che varia l'ampiezza di un segnale di un fattore moltiplicativo indicato come guadagno. Un amplificatore presenta come caratteristiche il guadagno, la resistenza in ingresso, la resistenza in uscita e la banda passante. La banda passante di un amplificatore ideale deve essere infinita, in quanto il guadagno non è dipendente dalla frequenza. Esistono tre tipologie fondamentali di amplificatori:



L'amplificatore di tensione dove  $A_V = \frac{V_o}{V_i}$ , di corrente dove  $A_i = \frac{i_o}{i_i}$ , e quello di potenza dove  $A_P = \frac{P_o}{P_i}$ .

Se interessa ottenere in uscita la massima potenza possibile, è necessario ottimizzare il trasferimento energetico tra generatore di segnale e ingresso dell'amplificatore e tra uscita dell'amplificatore e carico  $R_L$ . Questo si verifica se si pone  $R_i = R_s$  e  $R_L = R_o$ . Dove un generatore di tensione con resistenza interna  $R_s$  è direttamente collegato a un carico  $R_L$ , possiamo definire il rendimento:



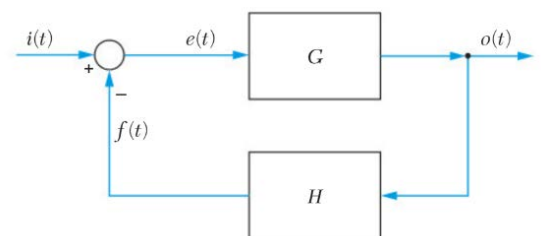
$$\eta = \frac{P_L}{P_G} = \frac{P_L}{P_L + P_D}$$

Dove  $P_L$  è la potenza assorbita dal carico,  $P_G$  la potenza erogata dal generatore e  $P_D$  la potenza dissipata da  $R_s$ . Il grafico evidenzia come il rendimento tenda asintoticamente ad 1 al crescere di  $R_L$ , ovvero al diminuire della corrente e quindi della potenza  $P_D$ , mentre il massimo trasferimento energetico tra generatore e carico si ha con  $R_s = R_L$ .

Possiamo rappresentare la struttura di un sistema fisico complesso, quale è l'amplificatore, tramite schemi a blocchi. Ogni singolo blocco è caratterizzato da una variabile in ingresso e da una variabile in uscita. Se l'uscita di un blocco è collegata con l'ingresso del successivo, questi si dicono in cascata. Per rappresentare la somma algebrica di più variabili si usa un nodo sommatore. Per rappresentare una variabile comune a più ingressi o uscite si ricorre ad un punto di diramazione.

Nello studio dei sistemi tramite gli schemi a blocchi si ipotizza che, idealmente, il comportamento del singolo blocco, descritto tramite il suo legame ingresso-uscita, non cambi quando questo viene collegato ad altri blocchi (nel caso dell'amplificatore di tensione, per esempio, questo equivale a considerare infinita la resistenza in ingresso e nulla quella di uscita). Uno o più blocchi in cascata costituiscono un sistema ad anello aperto (open loop). In un sistema ad anello aperto qualsiasi variazione di qualche parametro interno al singolo blocco si ripercuote sull'uscita, alterandone la risposta rispetto a quanto previsto: è quindi evidente che un sistema di questo genere deve essere formato da singoli blocchi di elevata qualità, al fine di rendere minime le variazioni indesiderate dei parametri. In altri termini, poiché l'uscita è data dall'ingresso amplificato, prima dal guadagno del primo blocco, poi da quello del secondo e via dicendo, solo se questi guadagni sono molto stabili (nel senso che non cambiano mai valore) è costante l'amplificazione complessiva, e questo non è facile da ottenersi.

Risulta pertanto utile ricorrere a un controllo automatico del sistema tramite un circuito capace di autocompensarsi. Per questo si ricorre a circuiti detti ad anello chiuso (closed loop) o a retroazione (feedback). Il blocco  $G$  viene detto di andata, il blocco  $H$  di ritorno: la variabile in uscita  $o(t)$  viene rinviata, attraverso  $H$ , in ingresso e controllata tramite il suo confronto con quella in ingresso  $i(t)$  di riferimento, la differenza  $e(t)$ , che rappresenta l'errore introdotto dal sistema, agisce come variabile in ingresso al blocco di andata in modo da riportare in uscita il valore corretto.



Una retroazione di questo tipo è detta negativa se  $G$  e  $H$  sono tali che risulta  $|e(t)| < |i(t)|$ , in caso contrario si dice positiva; la retroazione negativa è quella usata negli amplificatori.

L'uso della retroazione negativa permette di realizzare amplificatori con prestazioni mediamente migliori, rispetto ai sistemi ad anello aperto. I principali effetti della retroazione negativa sugli amplificatori sono i seguenti:

- Maggiore stabilità del guadagno;
- Minore distorsione;
- Variazioni della resistenza in ingresso e in uscita;
- Riduzione degli effetti dei disturbi;
- Allargamento della banda passante.

Posto  $G$  il guadagno del blocco di andata e  $H$  quello del blocco di ritorno, il guadagno di un amplificatore retroazionato risulta:  $A_f = o(t)/i(t)$ , considerando che:  $e(t) = i(t) - f(t) = i(t) - o(t)H$ ,  $o(t) = Ge(t)$ , sostituendo si ottiene:  $o(t) = Gi(t) - GHo(t)$  e quindi:

$$A_f = \frac{G}{1 + GH}$$

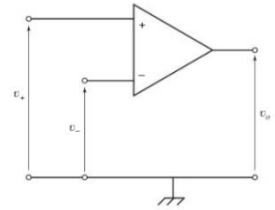
Tale formula esprime il guadagno di un amplificatore retroazionato. Il termine  $1 + GH$  è detto fattore di retroazione. Il prodotto  $GH$  viene invece chiamato guadagno di anello.

Se risulta che  $GH$  è molto maggiore di 1, ovvero il guadagno di anello tende a coincidere con il fattore di retroazione, il guadagno può essere scritto come:

$$A_f \approx \frac{1}{H}$$

Gli amplificatori operazionali sono componenti integrati molto versatili, originariamente previsti per la realizzazione di calcolatori analogici. Le circuitazioni interne agli OP-AMP utilizzano prevalentemente BJT, ma anche, nei più attuali, di FET e MOSFET.

Il terminale + indica l'ingresso non invertente, il terminale - l'ingresso invertente. Il terminale + è detto ingresso non invertente perché il guadagno di tensione rispetto a questo ingresso è positivo, ovvero il segnale in uscita è amplificato e in fase con quello in ingresso. L'altro ingresso presenta invece un guadagno di tensione negativo, perché il segnale in uscita risulta in opposizione di fase con quello in ingresso. I guadagni ai due ingressi sono idealmente in modulo uguali, in modo che la  $v_i$ , sia la differenza degli ingressi amplificata (l'operazionale è un amplificatore differenziale).

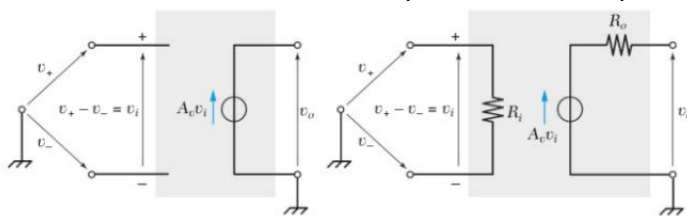


Essendo l'OP-AMP un amplificatore di tensione, presenta idealmente queste caratteristiche:

- Guadagno di tensione  $A_v$  infinito;
- Perfetto bilanciamento ( $|A_{v+}| = |A_{v-}|$ )
- Resistenza di ingresso infinita;
- Resistenza di uscita nulla;
- Banda passante infinita.

L'utilità di un guadagno di tensione infinito deriva dal fatto che in questo modo, inserendo l'operazionale in circuiti a retroazione negativa, sarà facile ottenere la condizione ottimale per il guadagno d'anello  $GH \gg 1$ . Il perfetto bilanciamento è necessario per ottenere un effettivo amplificatore differenziale. La resistenza di ingresso e quella di uscita sono infinite, essendo l'amplificatore ideale.

Possiamo definire un circuito equivalente all'amplificatore operazionale:



Il primo circuito in figura rappresenta un amplificatore ideale in quanto  $R_i$  è infinita (circuito aperto) ed  $R_o$  è pari a 0 (circuito chiuso). Se vogliamo considerare una situazione simile a quella verificabile nella realtà, dobbiamo prendere in considerazione il secondo circuito.

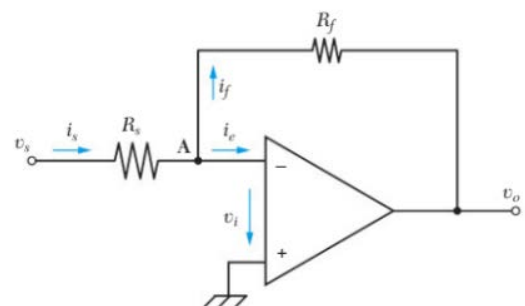
Esistono due configurazioni dell'amplificatore operazionale: quella invertente e quella non invertente. Entrambi i due OP-AMP sono circuiti a retroazione negativa.

Un amplificatore operazionale non può essere praticamente usato come amplificatore senza l'aggiunta di componenti esterni che ne determinano la retroazione negativa a causa del suo guadagno idealmente infinito.

Il guadagno dell'amplificatore in configurazione invertente retroazionato  $A_{vf}$  descritto dalla seguente formula:

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_f \times i_f}{R_s \times i_s} = -\frac{R_f}{R_s}$$

Possiamo notare che il guadagno di tensione dell'amplificatore retroazionato  $A_f$ , detto anche guadagno ad anello chiuso, non dipende dal valore  $A_v$  del guadagno di tensione dell'operazionale, detto anche guadagno ad anello aperto, ma solo dalle resistenze  $R_s$  e  $R_f$ . La tensione di uscita è, istante per istante, di polarità opposta a quella di ingresso.



Supposto infinito il valore di  $A_v$  e finito il valore di  $v_o$  (perché la retroazione negativa riduce il guadagno a un valore finito), risulta:

$$V_i = \frac{v_o}{A_v} = 0$$

Il nodo A è un punto di massa virtuale in quanto, pur se non posto a massa, è al potenziale di massa, essendo la  $v_i = 0$  (trascurabile rispetto a  $v_s$  e  $v_o$ ). Per questo, secondo i principi di Kirchhoff, essendo  $i_e = 0$ , abbiamo che  $i_f = i_s$ . Inoltre la resistenza di ingresso di questa configurazione coincide con  $R_s$  e la resistenza di uscita è già idealmente nulla.

Nella configurazione non invertente, invece, il guadagno di tensione è il seguente:

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

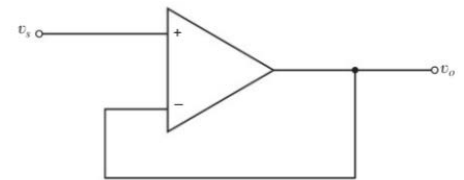
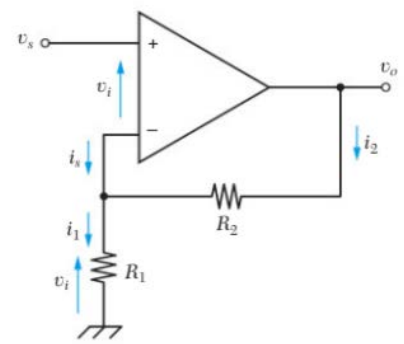
Il guadagno in questo caso non è invertente. Mentre con la configurazione invertente era possibile anche introdurre una attenuazione ponendo  $R_f < R_s$ , in questo caso il valore minimo del guadagno è pari a 1.

Per quanto riguarda la resistenza di ingresso la retroazione negativa aumenta ulteriormente la già elevata resistenza di ingresso dell'operazionale e quindi si può porre  $R_1 = \infty$  e la resistenza di uscita, anche in questo caso ridotta dalla retroazione, è posta a 0.

In conclusione si può dire che la configurazione non invertente è quella che più si avvicina, in linea di principio, al caso dell'amplificatore di tensione ideale, che infatti deve presentare resistenza di ingresso infinita e resistenza di uscita nulla.

Se poniamo  $R_2 = 0$  e  $R_1 = \infty$  si ottiene un guadagno di tensione unitario.

Questo circuito, detto inseguitore di tensione, presenta pertanto la particolarità di possedere una resistenza di ingresso teoricamente infinita, una di uscita teoricamente nulla e un guadagno di tensione unitario. Si tratta di un tipico circuito adattatore di carico: questo circuito è capace di trasferire la tensione di ingresso in uscita senza variarla, ma con la possibilità di lavorare con una corrente superiore a quella possibile in ingresso. In altri termini si può dire che è un circuito buffer.



## Relazione - Pratica

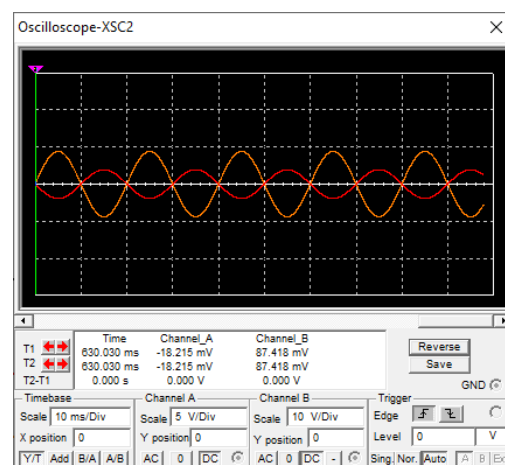
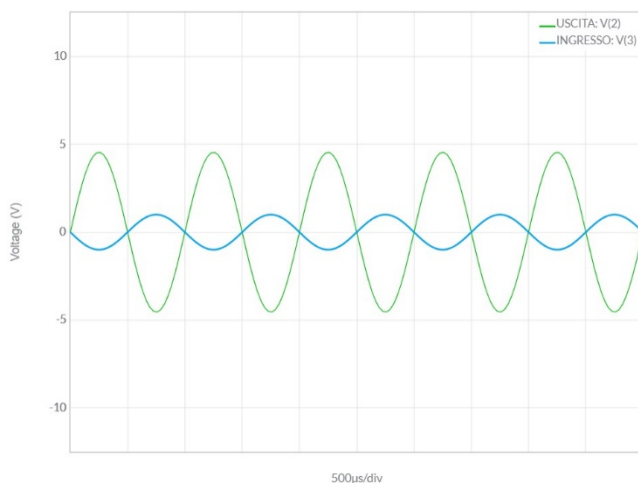
Come anticipato, per questa esperienza laboratoriale, ci siamo serviti degli amplificatori operazionali. Abbiamo innanzitutto provato la configurazione invertente in corrente continua, abbiamo rilevato i valori di tensione in entrata ed in uscita e abbiamo verificato il tutto tramite calcoli matematici.

Successivamente abbiamo testato lo stesso amplificatore operazionale invertente in corrente alternata. Con l'ausilio dell'oscilloscopio digitale, abbiamo letto i valori di tensione massimi in ingresso ed in uscita ed abbiamo visualizzato i segnali. Abbiamo così potuto constatare, visivamente, l'amplificazione del segnale in ingresso. Abbiamo anche potuto verificare la fase tra i due segnali (teoricamente  $180^\circ$ ), rilevando un valore di  $186^\circ$  (accettabile considerando la precisione degli strumenti utilizzati).

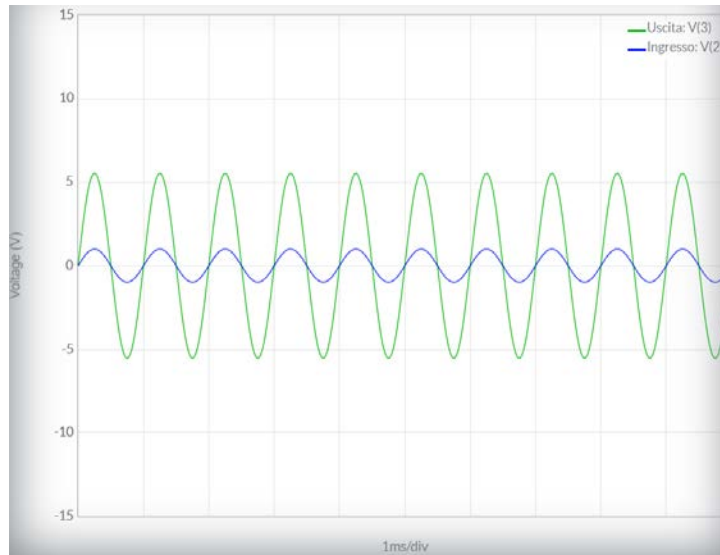
Infine abbiamo configurato l'amplificatore operazionale come non invertente e lo abbiamo collegato ad una fonte di corrente alternata. Abbiamo letto sull'oscilloscopio i valori di massima della tensione ed abbiamo visualizzato i due segnali in ingresso e uscita. Abbiamo così potuto constatare, visivamente, l'amplificazione del segnale in ingresso, così come abbiamo potuto verificare la fase tra i due segnali (teoricamente  $0^\circ$ ), rilevando un valore di  $4^\circ$  (accettabile considerando la precisione degli strumenti utilizzati).

Successivamente, ci siamo serviti del software Multisim per simulare i circuiti degli amplificatori operazionali, schematizzando quanto eseguito precedentemente in laboratorio. Con il software Multisim abbiamo convalidato i risultati appena ottenuti utilizzando le componenti fisiche dei circuiti. Di seguito sono riportati i risultati delle simulazioni.

Segnale generato dall'amplificatore operazionale invertente in corrente alternata (schema in fig. 1A):



Segnale generato dall'amplificatore operazionale non invertente in corrente alternata (schema in fig. 2A):



## Conclusioni

Durante questa prova laboratoriale abbiamo potuto osservare il funzionamento degli amplificatori invertente e non invertente, dando una veste pratica a quanto studiato teoricamente.

In conclusione abbiamo osservato che nella configurazione non invertente il guadagno è sempre maggiore di 1 (come descritto anche dalla formula).

Nell'amplificatore operazionale invertente lo sfasamento tra i due segnali, in ingresso ed uscita, è circa di  $180^\circ$  mentre, nella configurazione non invertente, è quasi nullo.

L'amplificatore è stato testato sia in corrente continua e sia in corrente alternata, dove entrano in gioco i concetti di frequenza e fase, per l'appunto.

La prova è stata portata a termine con successo anche grazie all'oscilloscopio digitale fornito dalla scuola, questo strumento presenta una precisione superiore a quella degli oscilloscopi analogici utilizzati nelle prove precedenti e ciò, ci ha permesso di visualizzare correttamente l'amplificazione del segnale.

Relazione n°3 di Telecomunicazioni

Bellamia Antonio 4Dinf