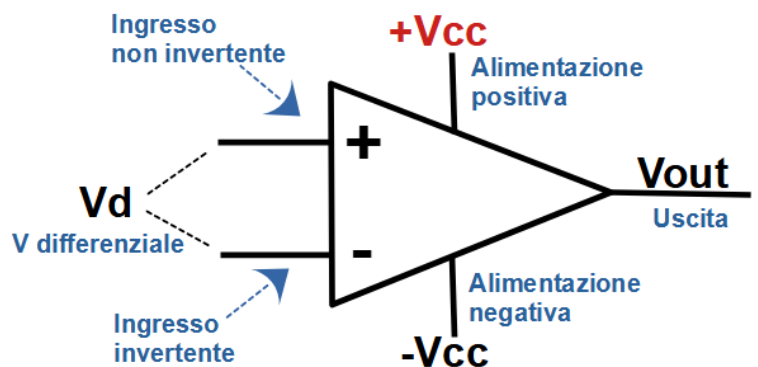


## L'AMPLIFICATORE OPERAZIONALE partendo da zero

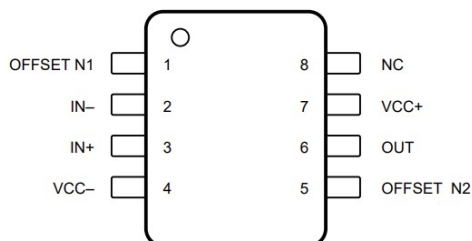
L'Amplificatore operazionale è un componente elettronico che si presenta sotto forma di circuito integrato con cui possono essere realizzati svariati dispositivi come ad esempio:

- Preamplificatori ed amplificatori audio
- Circuiti per elaborazione di segnali, sommatore, differenziale, integratore, derivatore
- Circuiti di interfaccia per sensori
- Circuiti oscillatori ad onda quadra e sinusoidale
- Filtri passa-basso, passa-alto e passa-banda
- Convertitori corrente tensione
- Generatori di corrente costante
- Comparatori di segnali
- ecc...

Il simbolo del componente è rappresentato da un triangolo con 2 terminali di ingresso, Invertente (-) e non invertente (+) 2 terminali di alimentazione (+Vcc e -Vcc) ed un'uscita (Vout).



L'A.O. si presenta con diverse tipologie di contenitori, e viene identificato da una sigla posta sul contenitore, uno degli amplificatori operazionali più noti, è il **uA741** contenuto in un contenitore D.I.P. (**D**ual **I**n **P**ackage) o anche detto D.I.L. (**D**ual **I**n **L**ine) dove i terminali del componente sono disposti su due file di contatti paralleli.



L'integrato uA741, come molti altri operazionali, necessita di un'alimentazione duale (positiva e negativa) sui terminali 7 e 4. Per ottenere un'alimentazione duale, occorrono due generatori di tensione posti in serie come nella seguente figura.

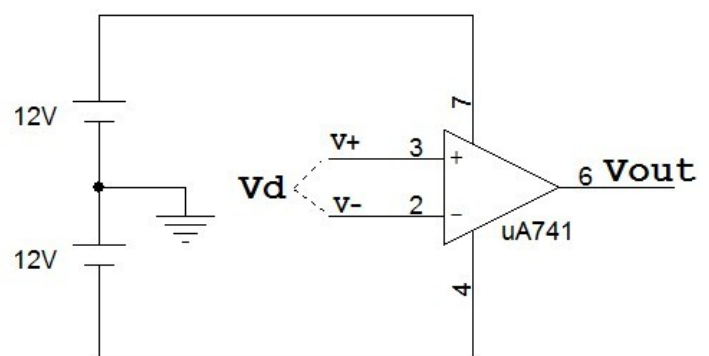
Oltre ai due terminali di alimentazione, il componente ha due terminali di ingresso **V+** e **V-**, ed uno di uscita.

Questo componente viene anche chiamato Amplificatore Differenziale, in quanto il segnale **Vd**, che rappresenta la differenza tra il potenziale presente su **V+** e quello su **V-**, viene amplificato per ottenere il valore di **Vout**.

Valgono pertanto le relazioni:

$$\mathbf{Vd = (V+ - V-)}$$

$$\mathbf{Vout = Ad * Vd}$$



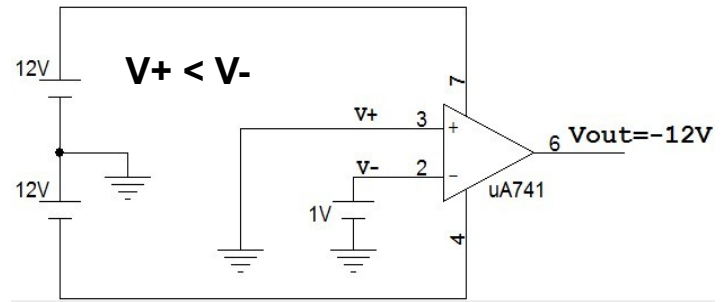
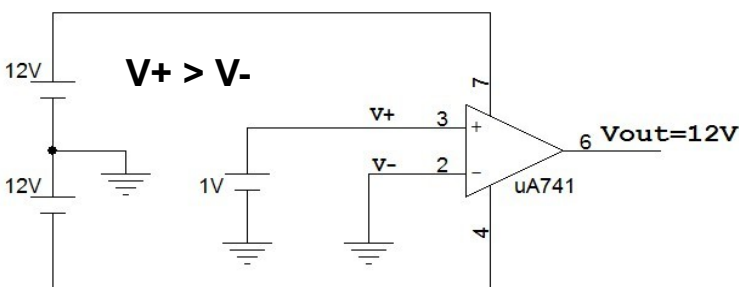
## CARATTERISTICHE DI UN AMPLIFICATORE OPERAZIONALE

Le tre principali caratteristiche di un Amplificatore Operazionale ideale, sono le seguenti:

- Impedenza di ingresso tendente all'infinito.
- Amplificazione differenziale ( $A_d$ ) tendente all'infinito.
- Resistenza di uscita nulla.

La prima caratteristica ci porta ad affermare che nei morsetti di ingresso di un amplificatore operazionale **non entra corrente**, come se tra i due terminali di ingresso ci fosse un circuito aperto.

La seconda caratteristica invece ci porta a dire che un piccolo sbilanciamento tra i due segnali di ingresso,  $V_+ > V_-$  o viceversa  $V_+ < V_-$ , porta l'uscita al massimo valore che può assumere che è rispettivamente  $+V_{cc}$  e  $-V_{cc}$ .



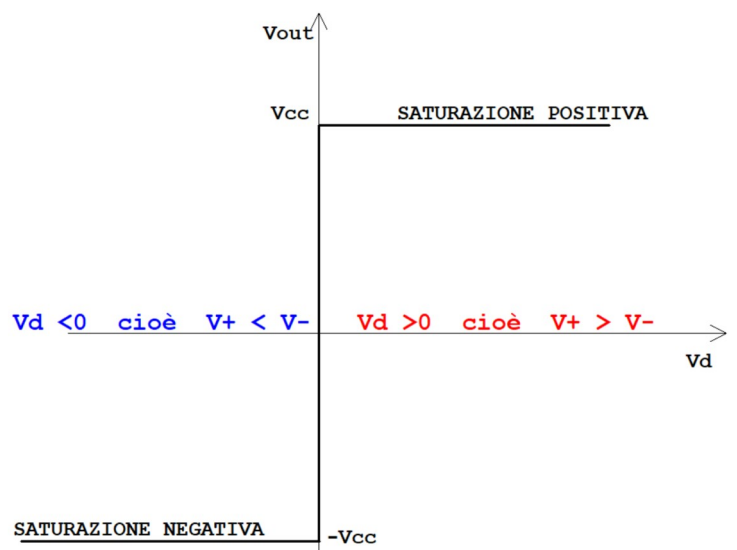
Possiamo pertanto già comprendere una sua prima possibile applicazione che è quella di “**comparatore**”, cioè un circuito ad **anello aperto**, che consente di comparare due segnali e fornire una tensione di uscita differente tra due valori possibili in base al segnale predominante in ingresso.

*Con la definizione di circuito ad anello aperto, intendiamo un circuito dove il segnale di uscita dipende solo da quello di ingresso in base alle caratteristiche del circuito.*

*Con la definizione di circuito ad anello chiuso, intendiamo invece un circuito dove il segnale di uscita dipende da quello di ingresso e dal confronto tra il segnale di ingresso e quello di uscita. Ciò avviene con un circuito feedback che riporta l'uscita all'ingresso per un confronto (retroazione).*

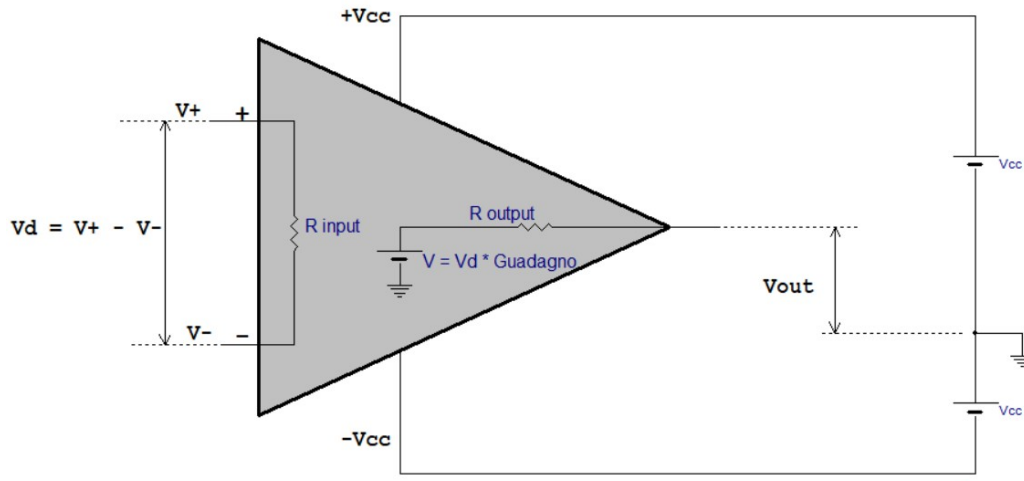
Nelle due figure precedenti vediamo che i morsetti di ingresso vengono tenuti ad un potenziale fisso e l'uscita non potrà fare altro che rispettare il legame tra ingresso ed uscita e non potendo assumere un valore pari a  $+\infty$  o  $-\infty$  assumerà il valore positivo o negativo dell'alimentazione.

A destra la caratteristica di un Amplificatore Operazionale ideale.



## AMPLIFICATORE OPERAZIONALE REALE

Un Amplificatore Operazionale, può essere visto nel seguente modo:

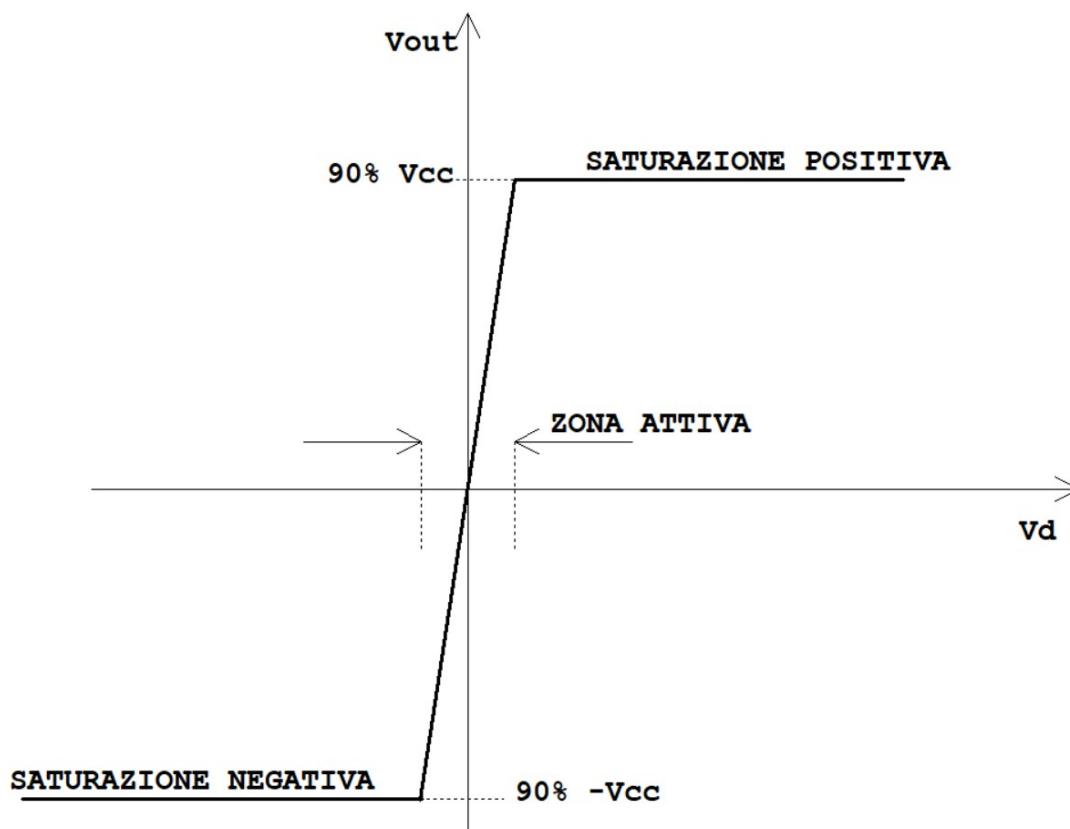


In un amplificatore ideale, abbiamo una **Rinput=∞** ed una **Routput=0** ed un guadagno **Ad= ∞**.

Nel caso di un amplificatore reale e non ideale, non abbiamo valori tendenti all'infinito ma comunque valori molto alti. In questo caso perciò la resistenza di ingresso molto elevata, farà comunque circolare una bassissima corrente sui terminali di ingresso, un valore trascurabile ma comunque presente.

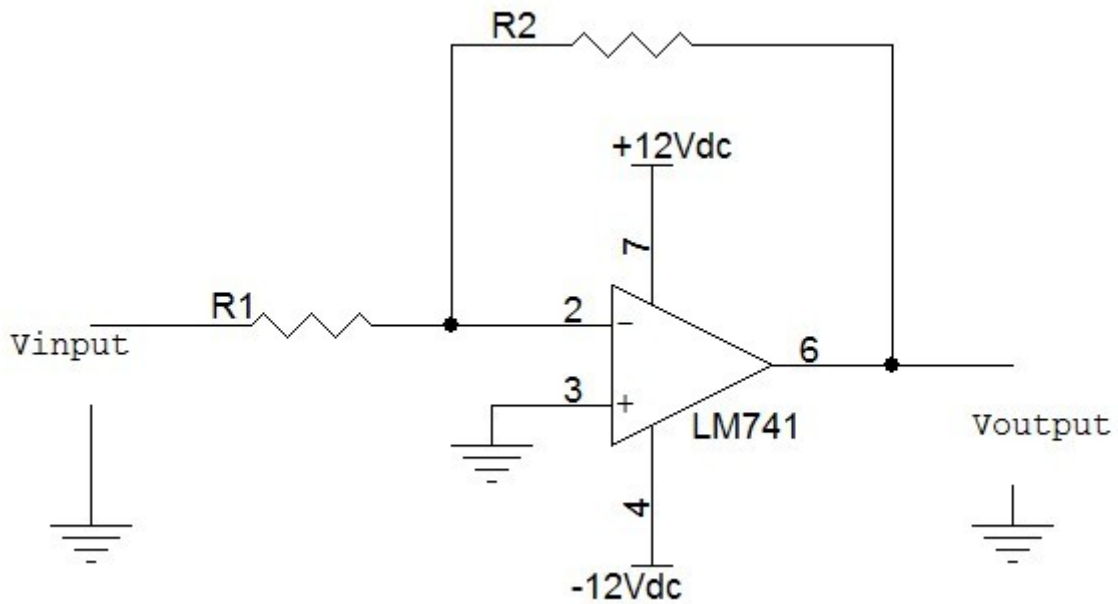
Stesso discorso per il guadagno, che non sarà pari ad infinito ma sarà di un valore molto elevato.

In un amplificatore reale il legame tra  $V_d$  e  $V_{out}$  può essere rappresentato dal seguente grafico:



Nella zona attiva c'è un legame lineare tra  $V_d$  e  $V_{out}$  dato da:  **$V_{out} = G * V_d$** , al di fuori di questa zona non potendo raggiungere valori più alti di  $V_{cc}$  e di  $-V_{cc}$ , la tensione di uscita si ferma a due valori definiti di **saturazione**, che corrispondono circa al 90% della tensione di alimentazione.

Possiamo però considerare l'amplificatore operazionale, non solo in un circuito ad anello aperto, ma con differenti configurazioni che riportano l'uscita ai terminali di ingresso, un circuito ad anello chiuso, come ad esempio nel seguente schema:



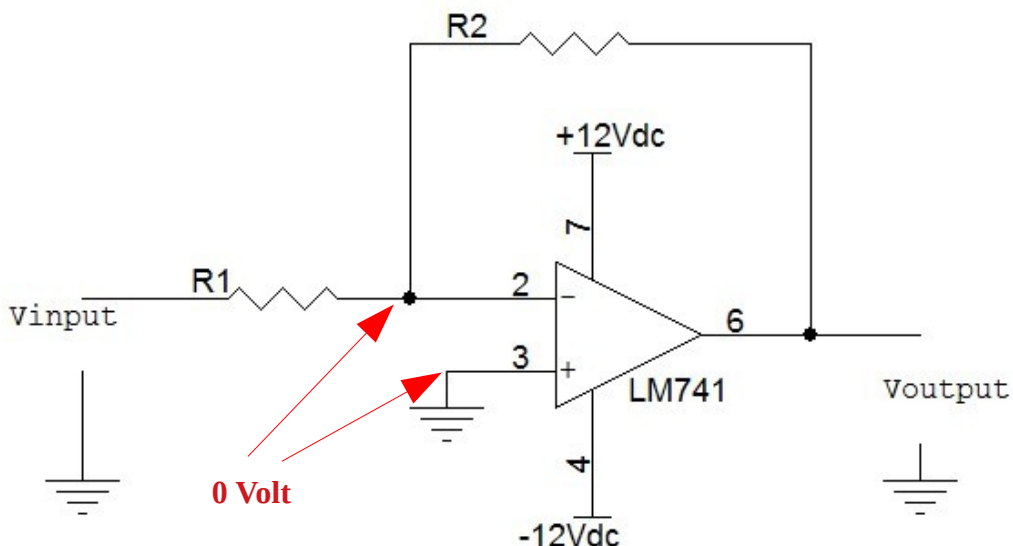
Prima di ragionare sul funzionamento del circuito, consideriamo la relazione tra ingresso ed uscita, descritta precedentemente e cioè:  $V_{out} = A_d * V_d$  se consideriamo  $A_d = \infty$  abbiamo che:

$V_{out} = \infty * V_d$  ricavando  $V_d$  avremo che:  $V_d = \frac{V_{out}}{\infty}$  visto che  $V_{out}$  può assumere solo un valore finito che al massimo è pari a  $V_{CC}$  o  $-V_{CC}$ , avremo che:  $V_d = 0$

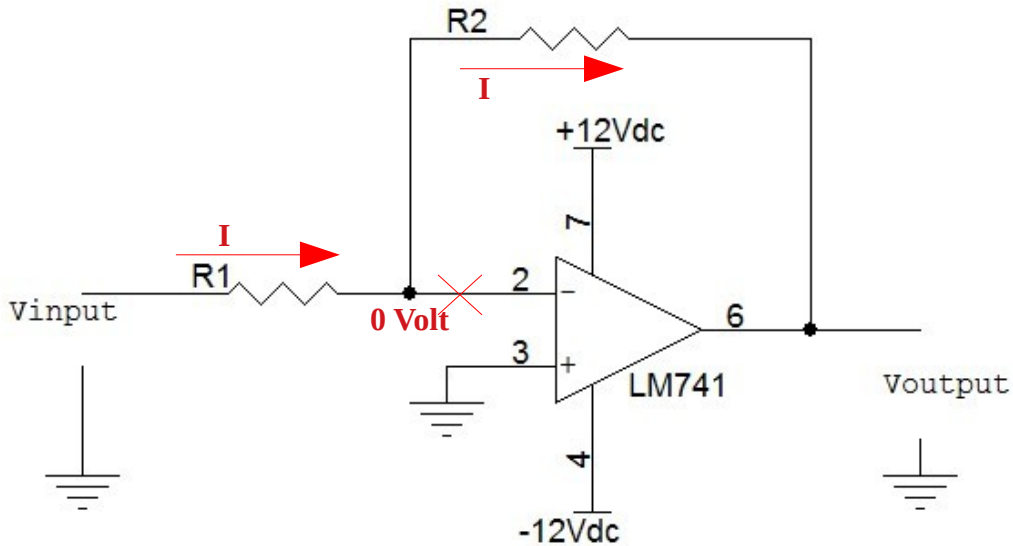
Dire che  $V_d = 0$  equivale a dire che  $V_+ = V_-$  come se tra i due morsetti ci fosse un cortocircuito, ma ciò è in evidente conflitto con la prima caratteristica dell'A.O. e cioè che l'impedenza di ingresso sia pari a  $\infty$ .

Possiamo definire questo comportamento come un **"cortocircuito virtuale"**, i terminali di ingresso si trovano allo stesso potenziale ma tra i due non c'è alcun collegamento fisico, e non c'è alcuna corrente di ingresso.

Tornando ora al circuito di figura, possiamo asserire che sul terminale non invertente  $V_+$ , c'è un potenziale di 0Volt. Applicando il concetto di cortocircuito virtuale, anche sul terminale invertente  $V_-$  ci sarà lo stesso potenziale di 0Volt, come fosse connesso alla GND.



Possiamo pertanto affermare che ai capi di R1 c'è una differenza di potenziale pari a ( $V_{input}-0$ ) e cioè  $V_{input}$ .  
 La corrente che scorre su R1 sarà:  $I = \frac{V_{input}}{R1}$  questa corrente però non entra nel terminale invertente, in quanto come abbiamo detto prima, nei terminali di ingresso non entra corrente ( $R_{ingresso} = \infty$ ).  
 Ciò significa che la corrente potrà solo percorrere la R2 verso il terminale di uscita.



Considerando che il terminale invertente è 0Volt, la differenza di potenziale ai capi di R2 sarà ( $0 - V_{output}$ ) ed applicando la legge di Ohm sulla R2, possiamo dire che  $(0 - V_{output}) = R2 * I$  o anche:

$$V_{output} = -R2 * I \quad \text{sostituendo } I \text{ avremo che: } \boxed{V_{output} = \frac{-R2}{R1} * V_{input}}$$

dove il rapporto  $\frac{-R2}{R1}$  rappresenta l'amplificazione del segnale di ingresso.

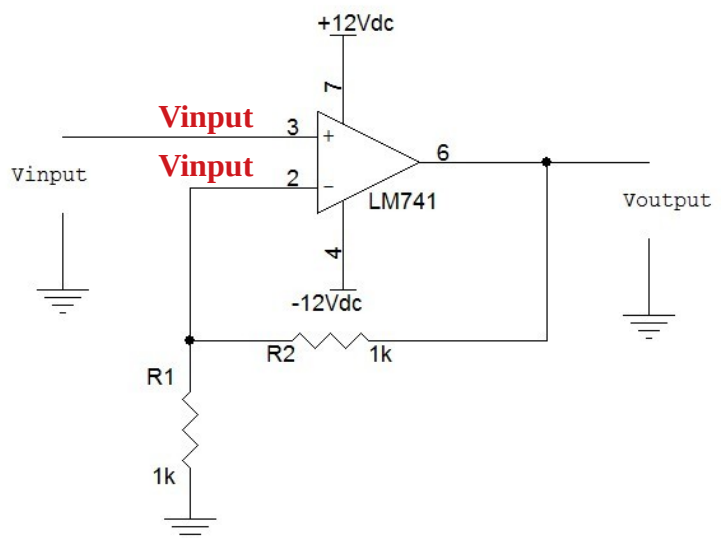
Possiamo notare che l'amplificazione è negativa e dipende dal rapporto tra le due resistenze.

$$V_{output} = A * V_{input} \quad \text{dove } \boxed{A = \frac{-R2}{R1}}$$

Questa configurazione circuitale viene definita **Amplificatore Invertente**.

Ragionando allo stesso modo possiamo analizzare un altro circuito.

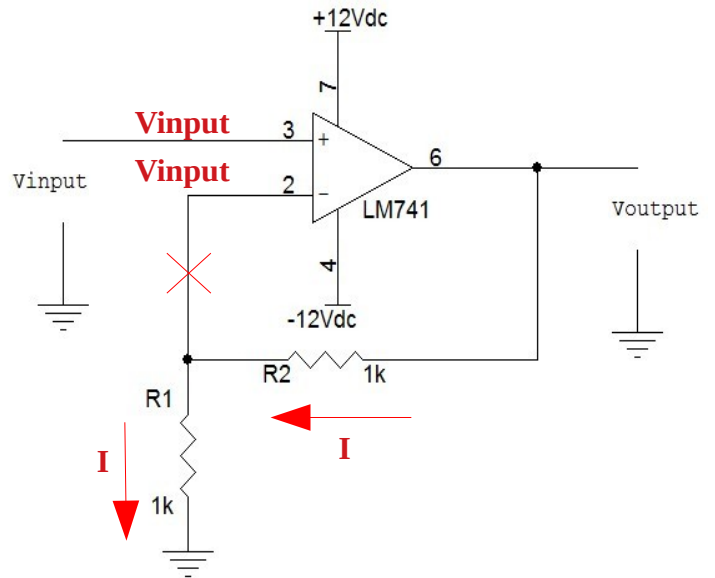
In questo caso il terminale non invertente, assume obbligatoriamente il potenziale della tensione  $V_{input}$ , e sempre per il concetto di cortocircuito virtuale, il terminale invertente avrà lo stesso potenziale (ricordiamo infatti che  $V_d=0$  e pertanto  $V_+ = V_-$ ).



Anche in questo caso ragionando con le correnti possiamo trovare la corrente che scorre su R1 che è la stessa che scorrerà su R2, visto che nel terminale invertente dell'operazionale c'è un'impedenza infinita e pertanto non uscirà e non entrerà alcuna corrente.

Ai capi di R1 c'è una differenza di potenziale pari a  $V_{input}$  e la corrente  $I$  vale:

$$I = \frac{V_{input}}{R1}$$



La resistenza R2 risulta in serie con R1 in quanto come abbiamo detto dal morsetto invertente non può uscire corrente, pertanto possiamo affermare che:

$$V_{output} = I * (R1 + R2) \quad \text{sostituendo } I \text{ avremo che } V_{output} = \frac{V_{input}}{R1} * (R1 + R2)$$

Semplificando avremo che:

$$V_{output} = V_{input} * \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

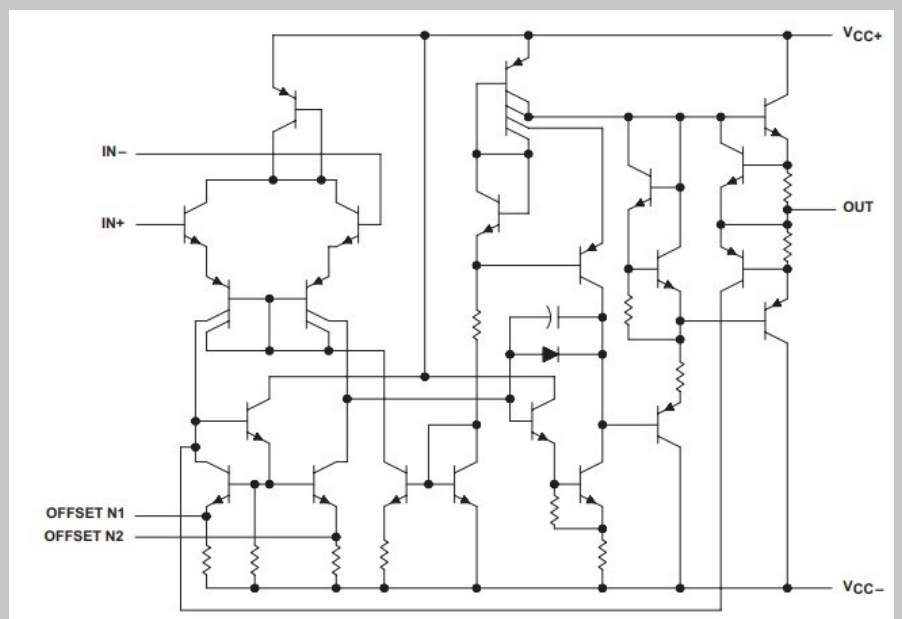
L'amplificazione anche in questo caso dipende dal rapporto delle due resistenze e vale:

$$A = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \quad \text{cioè un valore positivo mai inferiore all'unità.}$$

Questa configurazione viene definita **Amplificatore non Invertente**.

Inizialmente l'A.O. è stato definito come "circuito integrato", in effetti volendo approfondire tramite il datasheet del componente uA741, troviamo la sua circuiteria interna, che come possiamo vedere è composta da componenti attivi e passivi come transistor, diodi, resistori e condensatori.

Inoltre sempre dal data sheet possiamo vedere le sue caratteristiche elettriche e la presenza di altri due ingressi definiti **offset** che per ora possiamo tranquillamente ignorare.



## CIRCUITO INSEGUITORE

Un caso particolare di amplificatore non invertente è quello che possiamo avere con una resistenza R1 di valore infinito (circuito aperto).

Applicando la relazione vista precedentemente:

$$V_{output} = V_{input} * \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

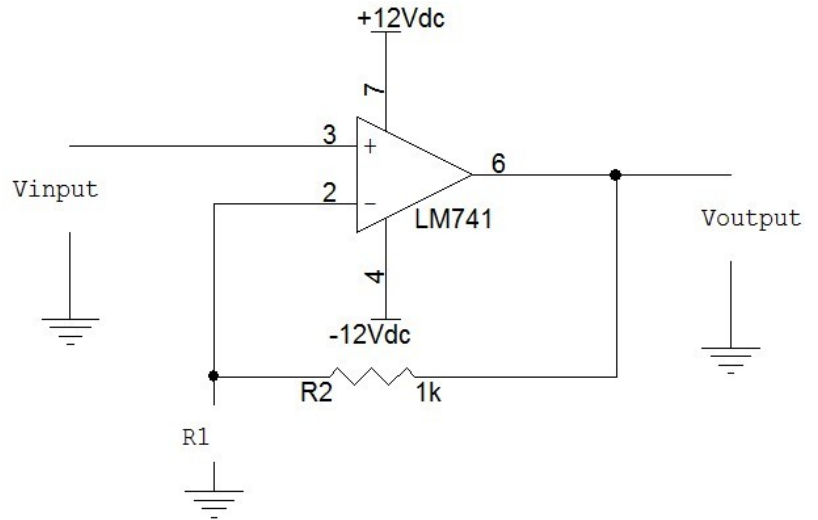
e sostituendo ad R1 un valore pari ad  $\infty$  avremo che il rapporto R2/R1 sarà nullo:

$$V_{output} = V_{input} * (1)$$

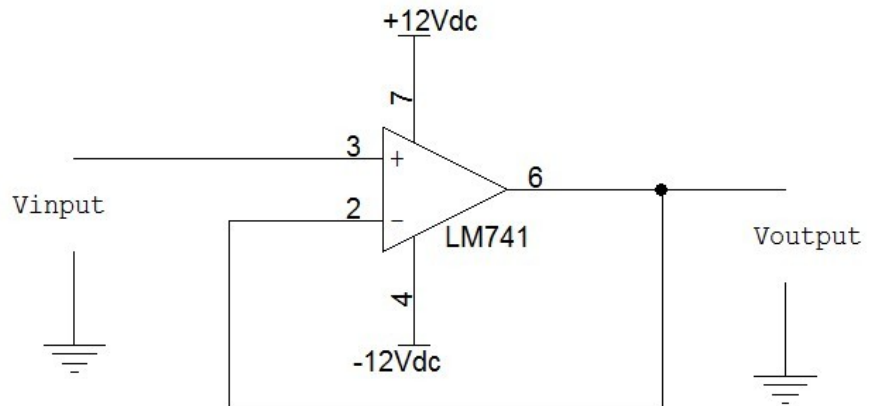
cioè

$$V_{output} = V_{input}$$

Ma il rapporto R2/R1 sarà nullo anche se al posto di R1 mettiamo un cortocircuito, pertanto il circuito potrebbe essere realizzato senza alcuna resistenza ottenendo lo stesso risultato.



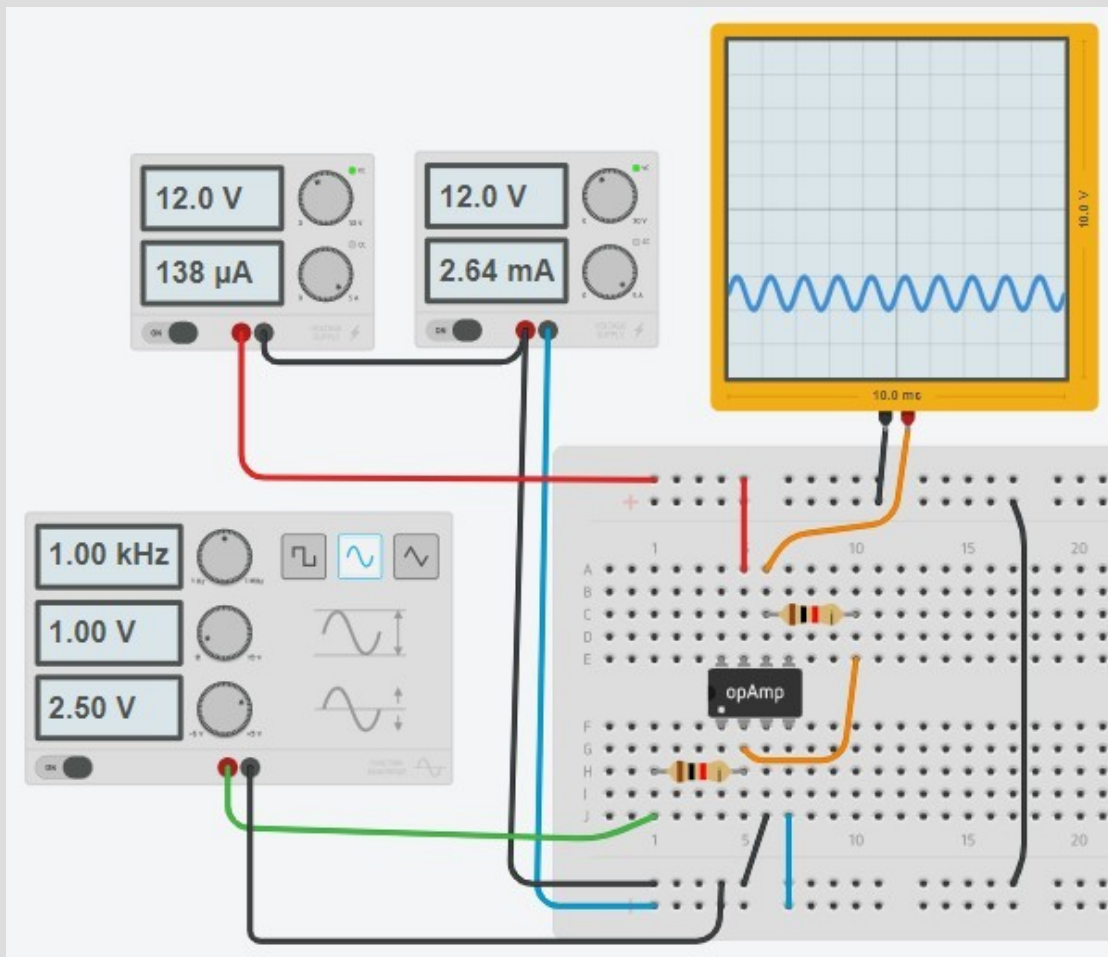
$V_{output} = V_{input}$



Il circuito viene definito inseguitore, in quanto la tensione di uscita segue l'andamento di quella di ingresso. La sua utilità sta nel fatto che avendo in ingresso un'impedenza infinita, questa configurazione può separare il circuito collegato al segnale di ingresso da quello di uscita, trasferendo lo stesso segnale come se i due punti fossero collegati insieme.

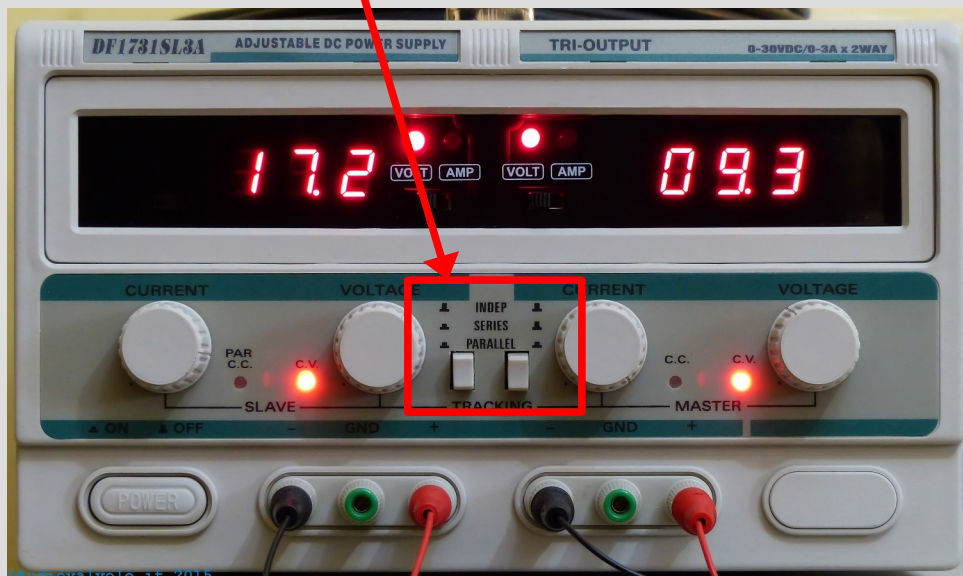


Nella seguente figura un esempio di montaggio dell'amplificatore non invertente su breadboard con Tinkercad.



Quando si esegue il montaggio dei circuiti con gli amplificatori operazionali alimentati in maniera duale, è consigliabile sempre utilizzare 3 file di contatti orizzontali della breadboard per le due alimentazioni (rosso e blu) e per la gnd (nero) come nello schema sopra. Per avere la tensione duale +VCC e -VCC bisogna collegare in serie due generatori di tensione.

Quasi tutti gli alimentatori di laboratorio hanno le due uscite collegabili internamente in maniera **indipendente** (2 generatori separati) in **parallelo** (2 generatori in parallelo) o in **serie** (2 generatori collegati in serie). La scelta viene fatta mediante uno o **due selettori** posti sul pannello frontale. Se il collegamento in serie viene fatto esternamente come nello schema sopra, i due selettori devono essere in posizione **indipendente**.



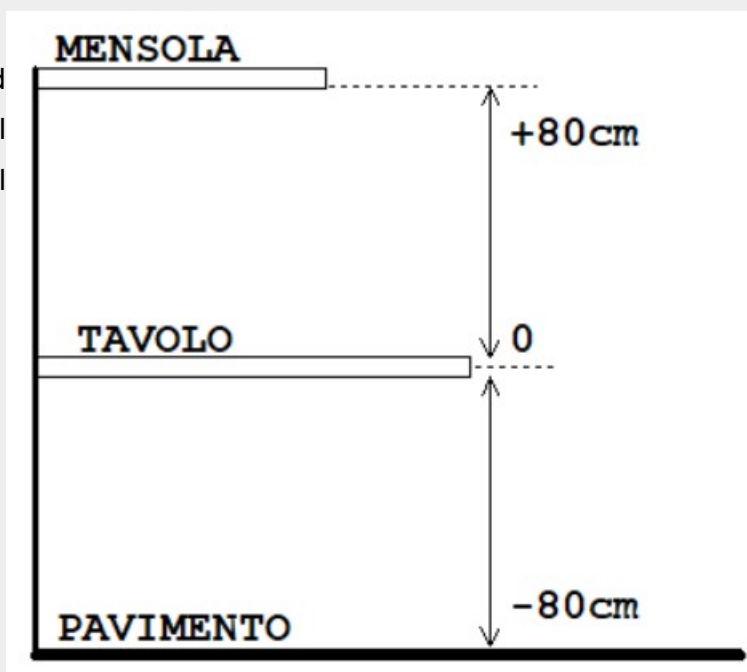


Un'ulteriore parentesi sul concetto di alimentazione duale e su come ottenerla.

La tensione di un punto di un circuito può essere vista per analogia come un'altezza in metri rispetto ad un livello di riferimento.

Ad esempio se consideriamo il piano del tavolo il nostro riferimento, cioè il nostro punto 0, una mensola appesa al muro in alto rispetto al tavolo, si trova ad un livello più alto (potenziale più alto) ed il pavimento si trova ad un livello più basso (potenziale più basso).

Nella figura possiamo considerare la mensola ad un'altezza di +80cm rispetto al tavolo ed il pavimento ad un'altezza di -80cm sempre rispetto al tavolo.



Possiamo ragionare con il potenziale elettrico come abbiamo fatto con le altezze. Occorre ricordare che per innalzare il potenziale di un punto occorre utilizzare un generatore di tensione.

Nel nostro caso da un punto corrispondente al potenziale di 0 Volt, dovrò innalzare la tensione per ottenere un valore positivo +Vcc ed abbassarla per ottenere un potenziale negativo -Vcc.

Ad esempio utilizzando due generatori di identico valore pari a 10Volt, e collegandoli in serie, considerando il punto centrale di connessione tra i due generatori come il nostro riferimento (0 Volt) in alto avremo un potenziale di +10Volt ed in basso un potenziale di -10V.

