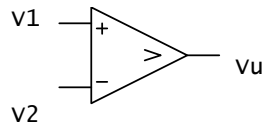


AMPLIFICATORE DIFFERENZIALE

Per amplificatore differenziale si intende un circuito in grado di amplificare la differenza tra due segnali applicati in ingresso.

Gli ingressi sono due: un primo ingresso si chiama **invertente** e si indica col segno **meno -**. Questo vuol dire che il segnale in uscita è sfasato di 180° rispetto al segnale applicato sul morsetto invertente. Il secondo ingresso si chiama **non invertente** e si indica col segno **più +**. Questo vuol dire che il segnale in uscita è in fase con il segnale applicato in ingresso, sul morsetto non invertente.

Il simbolo di un amplificatore differenziale è il seguente.

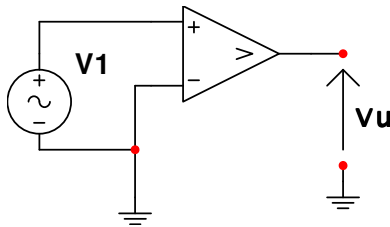


L'amplificatore differenziale può essere realizzato utilizzando i transistor bipolari BJT, oppure i FET, oppure un solo circuito integrato in cui è presente uno o più amplificatori differenziali.

GUADAGNO DIFFERENZIALE

Essendo l'amplificatore differenziale un amplificatore, occorre calcolare il guadagno. Ricordiamo che il guadagno indica quanto un amplificatore può amplificare, e si ottiene, nel caso del guadagno di tensione, facendo il rapporto tra tensione di uscita e tensione di ingresso. Nel nostro caso essendo due gli ingressi vi sono più modi di calcolare il guadagno di tensione.

1° modo:

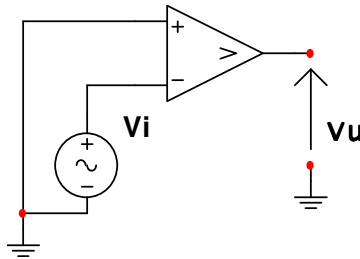


prevede di collegare il morsetto invertente a massa, e di applicare un solo segnale V_i al morsetto non invertente. In uscita otteniamo il segnale V_u amplificato di A_1 volte in fase rispetto al segnale di ingresso, cioè

$$V_u = A_1 V_i$$

Dobbiamo notare che il morsetto a cui non è applicato il segnale in ingresso, va comunque collegato a massa e non lasciato libero, cioè a potenziale non definito. Collegandolo a massa, siamo sicuri che il segnale applicato in ingresso, su quel morsetto, è nullo.

2° modo:



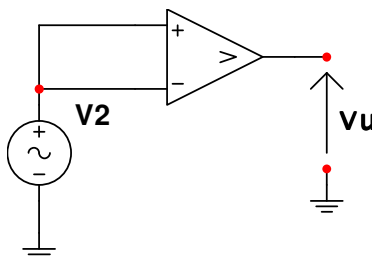
prevede di collegare il morsetto non invertente a massa, e di applicare un solo segnale V_i al morsetto invertente. In uscita otteniamo il segnale V_i amplificato di A_2 volte, però V_u è sfasato di 180° rispetto al segnale di ingresso, cioè

$$V_u = - A_2 V_i$$

In pratica A_1 rappresenta il guadagno di tensione dell'amplificatore differenziale quando il segnale viene applicato sul morsetto non invertente, e contemporaneamente il morsetto invertente è collegato a massa. A_1 è un numero positivo, poiché il segnale in uscita è in fase col segnale di ingresso. Invece, A_2 rappresenta il guadagno di tensione dell'amplificatore differenziale quando il segnale viene applicato sul morsetto invertente, e contemporaneamente il morsetto non invertente è collegato a massa. A_2 è un numero negativo, perché il segnale di uscita è sfasato di 180° , rispetto al segnale di ingresso. In un amplificatore differenziale ideale risulta

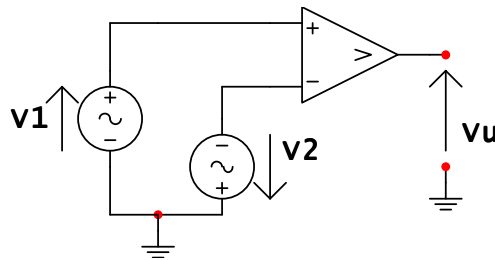
$$A_1 = A_2$$

3° modo



prevede di collegare contemporaneamente lo stesso segnale ai due ingressi. Poiché il primo segnale viene amplificato di A_1 volte con sfasamento nullo ed il secondo segnale viene amplificato di A_2 volte e sfasato di 180° , essendo $A_1 = A_2$ ma di segno opposto, **il segnale di uscita è nullo**. Tale tipo di collegamento si dice **di modo comune** perché il segnale viene applicato uguale ai due ingressi, invertente e non invertente. Segnale uguale, vuol dire che il segnale è uguale in ampiezza, in frequenza e in fase. Tale collegamento non consente di ottenere un segnale di uscita, cioè possiamo dire che il segnale non passa, ma viene respinto indietro. Si dice **reiezione di modo comune** il fatto che il segnale viene rinviato indietro.

4° modo.



prevede di applicare sul primo ingresso un segnale e sull'altro ingresso un segnale uguale come ampiezza e frequenza, però sfasato di 180°. Di conseguenza in uscita otteniamo un segnale amplificato del doppio rispetto ad un normale amplificatore avente guadagno A_1 oppure guadagno A_2 . Tale tipo di collegamento si dice **di modo differenziale**.

GUADAGNO DI MODO DIFFERENZIALE

Indichiamo con A_d il guadagno complessivo di modo differenziale che sarà definito:

$$A_d = \frac{A_1 + A_2}{2}$$

GUADAGNO DI MODO COMUNE

Indichiamo con A_s il guadagno di modo comune, definito come segue:

$$A_s = A_1 - A_2$$

In un amplificatore differenziale ideale $A_1 = A_2$ e sarà $A_s = 0$

RAPPORTO DI REIEZIONE DI MODO COMUNE

Possiamo ora definire **il rapporto di reiezione di modo comune**, detto **CMRR**, come il rapporto, in valore assoluto, tra A_d e A_s

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_s} \right|$$

Il rapporto di reiezione di modo comune indica la proprietà di un amplificatore differenziale di respingere il segnale che si presenta uguale ai due ingressi, in un amplificatore differenziale ideale questo valore è infinito. Se consideriamo che il rumore o un disturbo

che proviene dall'esterno, è un segnale che si presenta contemporaneamente ai due ingressi, possiamo ritenere che l'amplificatore differenziale ideale è immune ai disturbi, vale a dire il disturbo viene respinto dall'amplificatore e quindi non passa in uscita.

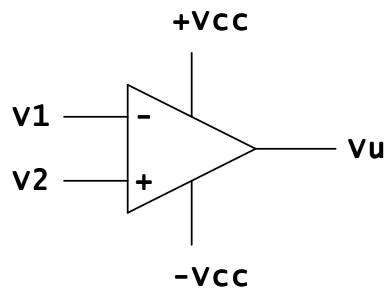
AMPLIFICATORE OPERAZIONALE

Si dice **amplificatore operazionale** un amplificatore che ha come primo stadio di ingresso un amplificatore differenziale, secondo il seguente schema a blocchi:



Si dice operazionale perché è in grado di effettuare alcune operazioni matematiche. Dallo schema possiamo notare che ad un normale amplificatore differenziale è stato aggiunto un amplificatore di tensione, che è di tipo lineare, con un adattatore di impedenza in modo che la potenza trasferita in uscita sia la massima possibile.

L' A.O. per il suo funzionamento ha bisogno di una alimentazione cosiddetta duale, cioè è alimentato da due tensioni continue di valore uguale e di segno opposto (tipicamente +15V e - 15V)



DATI CARATTERISTICI IDEALI

Di seguito sono riportati i dati caratteristici di un A.O. ideale

- amplificazione di tensione differenziale $A_d = \infty$
- resistenza di uscita $R_o = \infty$
- resistenza di ingresso $R_i = 0$
- banda passante $BW = \infty$

DATI CARATTERISTICI REALI

Diamo, ora, alcuni dati che sono validi per un normale amplificatore operazionale ed in particolare per il $\mu\text{A 741}$.

Resistenza di ingresso.

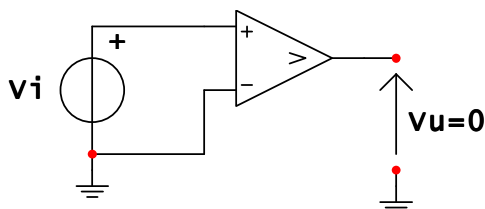
E' la resistenza vista tra i due ingressi dell'amplificatore operazionale, quando è collegato a catena aperta, cioè senza reazione. Ricordiamo che si dice reazione il fatto di riportare in ingresso parte del segnale di uscita. Per il $\mu\text{A 741}$ è $R_{in} = 2 \text{ M}\Omega$.

Resistenza di modo comune.

E' la resistenza di uno degli ingressi rispetto a massa, quando l'altro ingresso è isolato. Per il $\mu\text{A 741}$ è $R_{mc} = 400 \text{ M}\Omega$.

Tensione di fuori zero d'ingresso.

E' la tensione che deve essere applicata tra i due ingressi in modo da annullare la tensione di uscita, quando in ingresso non vi è alcun segnale. Infatti a causa della non eguale amplificazione dei due stadi che costituiscono l'amplificatore differenziale, in uscita si ha una tensione $V_u = 0$, anche quando l'ingresso è nullo. Per evitare ciò, si applica una piccola tensione di ingresso, secondo il seguente schema:



l'amplificatore risulta bilanciato quando la tensione di uscita è nulla. La tensione di fuori zero per il $\mu\text{A 741}$ è $V_{fz} = 1 \text{ mV}$.

Massima tensione di ingresso.

E' la massima tensione che si può applicare tra un ingresso e massa. Per il $\mu\text{A 741}$ è $V_{in} = 15 \text{ V}$.

Resistenza di uscita.

E' la resistenza tra uscita e massa, quando l'amplificatore è collegato a catena aperta. Per il $\mu\text{A 741}$ è $R_u = 75 \Omega$.

Massima tensione di uscita.

E' la massima tensione tra uscita e massa, senza distorsione del segnale. Per il $\mu\text{A 741}$ è $V_u = 13,5 \text{ V}$.

Corrente di corto circuito.

E' la massima corrente che l'amplificatore può fornire in uscita. Per il $\mu\text{A 741}$ è $I_{cc} = 25 \text{ mA}$.

Guadagno di tensione.

E' il rapporto tra la tensione di uscita e la tensione di ingresso di modo differenziale, quando l'amplificatore è collegato a catena aperta. Per il $\mu\text{A 741}$ è

$$A_d = \frac{V_u}{V_i} = 200.000$$

Rapporto di reiezione di modo comune.

E' il rapporto tra il guadagno di modo differenziale A_d ed il guadagno di modo comune A_s .
Per il $\mu A 741$ è

$$CMRR = \frac{A_d}{A_s} = 32.000$$

Oppure usando il decibel

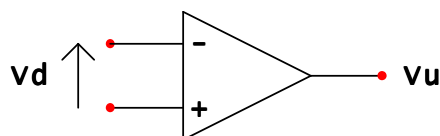
$$CMRR = 20 \log \frac{A_d}{A_s} = 90 \text{ dB}$$

Banda passante

Il $\mu A 741$ la frequenza di taglio è $F_T = 1 \text{ MHz}$.

AMPLIFICATORE OPERAZIONALE AD ANELLO APERTO

Consideriamo di applicare una tensione V_d ai due morsetti di entrata di un A.O. (collegamento ad anello aperto),



dato l' elevato valore dell' amplificazione differenziale dovremmo avere una tensione di uscita V_u elevatissima anche per piccoli valori di V_d . Ad esempio per un $\mu A 741$ in corrispondenza di

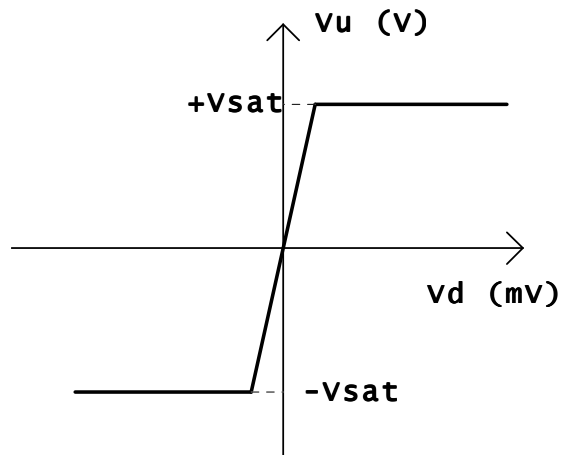
$$V_d = 1 \text{ mV}$$

si dovrebbe avere

$$V_u = A_d * V_i = 200000 * 1 * 10^{-3} = 200 \text{ V}$$

E' evidente che il $\mu A 741$ non potra' fornire questa tensione il quanto le sue caratteristiche ci dicono che la tensione massima che possiamo ottenere in uscita non puo' essere superiore a 13.5 V . Questo vuol dire che l' A.O. collegato ad anello aperto e' un dispositivo che anche per piccolissimi valori di V_d va in saturazione cioe' al massimo della

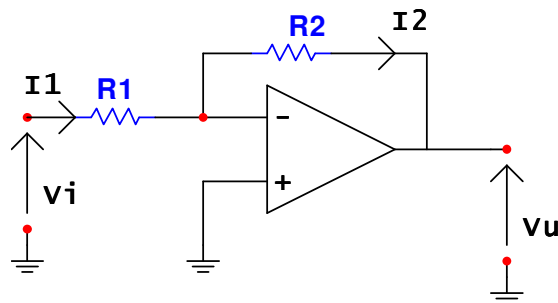
sua uscita. Questo discorso evidentemente vale sia per valori di V_d positivi che per valori negativi come e' indicato nel grafico seguente.



Il valore V_{sat} in genere e' circa 2 V in meno della tensione duale di alimentazione.

AMPLIFICATORE INVERTENTE

Un amplificatore operazionale si dice collegato in configurazione invertente quando il segnale in uscita è sfasato di 180° rispetto al segnale di ingresso. Per ottenere questo occorre che il segnale sia applicato sul morsetto invertente, contrassegnato dal segno $-$. Lo schema di un amplificatore è il seguente:



Possiamo notare che la configurazione è del tipo **ad anello chiuso**; si dice anello chiuso quando parte del segnale di uscita viene riportato in ingresso, si ha cioè una **retroazione** o **reazione**; nel nostro caso la reazione è di tipo negativo, perché il segnale viene riportato sul morsetto invertente.

Nello schema V_i è la tensione applicata in ingresso, V_u è la tensione ottenuta in uscita. Considerando che la resistenza fra i due piedini di ingresso dell' A.O. e' praticamente infinita, l' A.O. non assorbira' corrente e di conseguenza fra i due piedini $-$ e $+$ non ci sara' tensione e quindi, virtualmente si possono considerare come collegati assieme; questo porta alla conclusione che entrambe i piedini sono virtualmente collegati a massa (**massa virtuale**). Conseguenza del discorso precedente e' che sara':

$$I_1 = I_2$$

Vogliamo ora calcolare l' amplificazione di tensione del circuito

$$A_V = \frac{V_u}{V_i} \quad (1)$$

Cioè il rapporto tra tensione di uscita e tensione di ingresso, considerando che il piedino – dell A.O. e' a massa virtuale sara':

$$V_i = R_1 I_1 \quad (2)$$

con analogia considerazione il piedino + e' a massa virtuale, quindi:

$$V_u = - R_2 I_2 \quad (3)$$

Dove il segno - tiene conto del fatto che la corrente I_2 provoca sulla R_2 una caduta di tensione di segno opposto alla V_u . Sostituendo la (3) e la (2) nella (1) avremo:

$$A_V = \frac{V_u}{V_i} = \frac{- R_2 I_2}{R_1 I_1} = - \frac{R_2}{R_1}$$

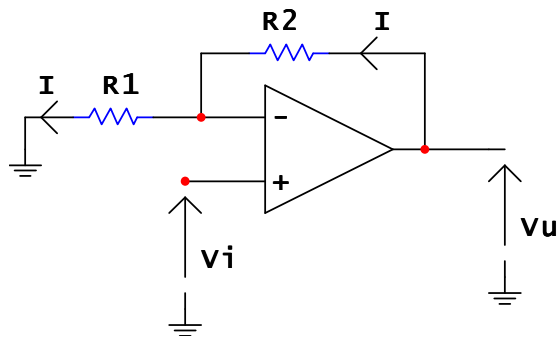
In definitiva nella configurazione invertente il guadagno di tensione è

$$A_V = - \frac{R_2}{R_1}$$

Vediamo che l' amplificazione di tensione dipende esclusivamente dalle due resistenze, Il segno meno tiene conto dello sfasamento tra tensione di ingresso e tensione di uscita. C' e da notare inoltre che a seconda dei valori delle due resistenze l' amplificazione puo' anche essere minore di uno, cioe' la tensione di uscita puo' essere piu' bassa di quella di entrata, ed il circuito si comportera' da attenuatore.

AMPLIFICATORE NON INVERTENTE

Un amplificatore è detto non invertente quando il segnale viene applicato in ingresso al morsetto non invertente, la conseguenza sara' che il segnale di uscita risultera' in fase con il segnale di ingresso. Lo schema elettrico è il seguente:



Notiamo, che per evitare che l'amplificatore vada in saturazione, occorre fare una reazione di tipo negativo, in modo da ridurre il guadagno complessivo dell'amplificatore. I resistori R_1 ed R_2 costituiscono un partitore di tensione, e riportano in ingresso parte della tensione di uscita. La reazione è di tipo negativo perché tale tensione viene riportata sul morsetto invertente.

Come per il circuito precedente vogliamo ora calcolare l' amplificazione di tensione

$$A_v = \frac{V_u}{V_i} \quad (4)$$

Considerando che il piedino – dell A.O. e' a massa virtuale sara':

$$I = \frac{V_i}{R_1} \quad (5)$$

Considerando inoltre che il piedino – non assorbe corrente si ha :

$$I = \frac{V_u}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

Uguagliando i secondi membri della (5) e della (6), entrambe rappresentanti la corrente I, avremo:

$$\frac{V_i}{R_1} = \frac{V_u}{R_1 + R_2}$$

Volendo ricavare l' amplificazione avremo con semplici passaggi:

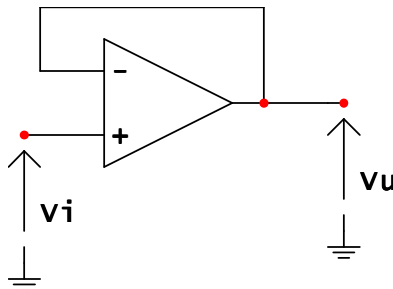
$$A_V = \frac{V_u}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}$$

$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (7)$$

Notiamo subito che l' amplificazione e' sempre maggiore di uno quindi il circuito non potra' mai essere un attenuatore (cosa possibile nell' amplificatore invertente), inoltre l' amplificazione e' un numero positivo, cioe' la tensione di uscita e' sempre in fase con la tensione di entrata, e dipende esclusivamente dalle due resistenze.

INSEGUITORE DI TENSIONE - BUFFER

Lo schema elettrico di un inseguitore di tensione è il seguente:



Questo circuito puo' essere visto come un caso particolare dell' amplificatore non invertente nel quale le resistenze hanno i valori:

$$R_2 = 0 \quad \text{ed} \quad R_1 = \infty$$

Sostituendo questi valori nella (7) si ha che

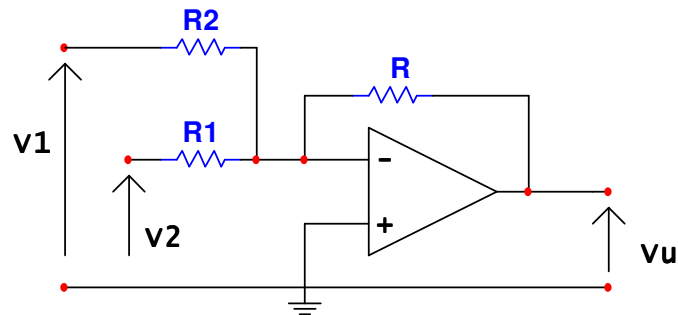
$$A_V = 1$$

L'inseguitore di tensione è quindi un circuito che dà in uscita lo stesso valore di tensione che riceve in ingresso. Viene usato come adattatore di impedenza. Infatti ha una elevata resistenza in ingresso, e questo vuol dire che assorbe poca corrente in ingresso; inoltre ha

una bassa resistenza di uscita, e questo consente di erogare una elevata corrente di uscita e quindi di pilotare diversi carichi. In pratica si utilizza come buffer. Il **buffer**, in pratica, è un dispositivo che memorizza il segnale ricevuto in ingresso, cioè non cambia il valore del segnale, però consente, data l' elevata corrente che può erogare in uscita, di pilotare diversi altri circuiti.

SOMMATORE INVERTENTE

Il circuito del sommatore invertente è il seguente:



Questo non è altro che un amplificatore invertente con due tensioni applicate all'ingresso. Considerando il principio della sovrapposizione degli effetti, la tensione V_u può essere considerata come somma di due tensioni:

V_u' corrispondente all'uscita quando si applica solo V_1 e

V_u'' corrispondente all'uscita quando si applica solo V_2

$$V_u = V_u' + V_u'' \quad (8)$$

Ma ricordando la formula dell'amplificazione di un amplificatore invertente si ha:

$$V_u' = - \frac{R}{R_2} V_1$$

E analogamente

$$V_u'' = - \frac{R}{R_1} V_2$$

La (8) diventa quindi

$$V_u = V_u' + V_u'' = - \frac{R}{R_2} V_1 - \frac{R}{R_1} V_2$$

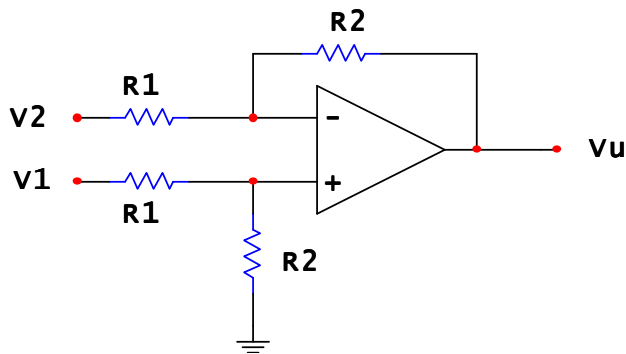
Se ora supponiamo $R = R_1 = R_2$ avremo:

$$V_u = -V_1 - V_2 = -(V_1 + V_2)$$

Questo circuito quindi effettua la somma col segno cambiato delle due tensioni di ingresso, per questo e' detto circuito sommatore invertente.

CIRCUITO DIFFERENZIALE

Prendiamo in considerazione il seguente circuito



Anche in questo circuito abbiamo due tensioni di entrata V1 e V2.

Considerando il principio della sovrapposizione degli effetti, la tensione V_u puo' essere considerata come somma di due tensioni:

V_u' corrispondente all' uscita quando si applica solo V2 e si cortocircuita a massa la V1

V_u'' corrispondente all' uscita quando si applica solo V1 e si cortocircuita a massa la V2

$$V_u = V_u' + V_u'' \quad (9)$$

Calcoliamo la V_u' :

cortocircuitando a massa la V2 il piedino non invertente si trovera' a massa dato che le resistenze ad esso collegate non saranno attraversate da corrente, il circuito diventera' praticamente un amplificatore invertente e quindi:

$$V_u' = -\frac{R_2}{R_1} V_2$$

Calcoliamo la V_u'' :

cortocircuitando a massa la V_2 il circuito diventera' un amplificatore non invertente alimentato nel piedino non invertente dal partitore di tensione composto dalle resistenza R_1 ed R_2 ad esso collegate. Si avra' allora:

$$V_u'' = V_+ \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = V_+ \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (10)$$

Con

$$V_+ = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (11)$$

Sostituendo la (11) nella (10) otteniamo:

$$V_u'' = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{R_1 + R_2}{R_1} = V_1 \frac{R_2}{R_1}$$

In definitiva dalla (9) la V_u sara'

$$V_u = V_u' + V_u'' = - \frac{R_2}{R_1} V_2 + \frac{R_2}{R_1} V_1 = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

Se facciamo in modo che $R_1 = R_2$ vediamo subito che la tensione di uscita sara' la differenza fra le due tensioni di ingresso,

$$V_u = V_1 - V_2$$

da questo viene il nome differenziale per questo circuito.