

Amplificatori operazionali

Parte 1

www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm

(versione del 15-5-2017)

Amplificatori operazionali in LTspice

- In LTspice è disponibile un modello funzionale denominato Universal Opamp 2
- Per utilizzarlo, dopo aver premuto il pulsante “Component” si deve accedere alla cartella “Opamps” (nella quale sono disponibili anche modelli di amplificatori operazionali commerciali)
- Il modello dispone di 4 livelli
 - ◆ per specificare il livello si deve aprire la finestra di dialogo con i parametri del componente (cliccando con il tasto destro sul simbolo del componente) e quindi cliccare su “level” per fare comparire il menù che mostra i livelli disponibili
 - ◆ il livello 1 corrisponde a un modello a un polo lineare
 - ◆ il livello 2 corrisponde a un modello a un polo non lineare
 - ◆ i livelli 3a e 3b aggiungono un secondo polo e la possibilità di definire il margine di stabilità
- Di seguito saranno considerati solo i livelli 1 e 2

Parametri del modello – Livello 1

- I parametri utilizzati dal modello di livello 1 sono

Nome	Parametro	Val. predefinito
Avol	Guadagno ad anello aperto in continua	10^6
GBW	Prodotto guadagno-larghezza di banda (Hz)	10 MHz
Vos	Tensione di offset (V)	0
Rin	Resistenza di ingresso (Ω)	500 M Ω

- Il modello è lineare e quindi, in particolare, non include la saturazione
- Le tensioni di polarizzazione non sono considerate, quindi non è necessario che i terminali di alimentazione vengano collegati

3

Parametri del modello – Livello 2

- Il modello di livello 2 aggiunge al modello di livello 1: saturazione, limitazione della corrente di uscita e limitazione di slew rate
- Ai parametri del livello 1 si aggiungono

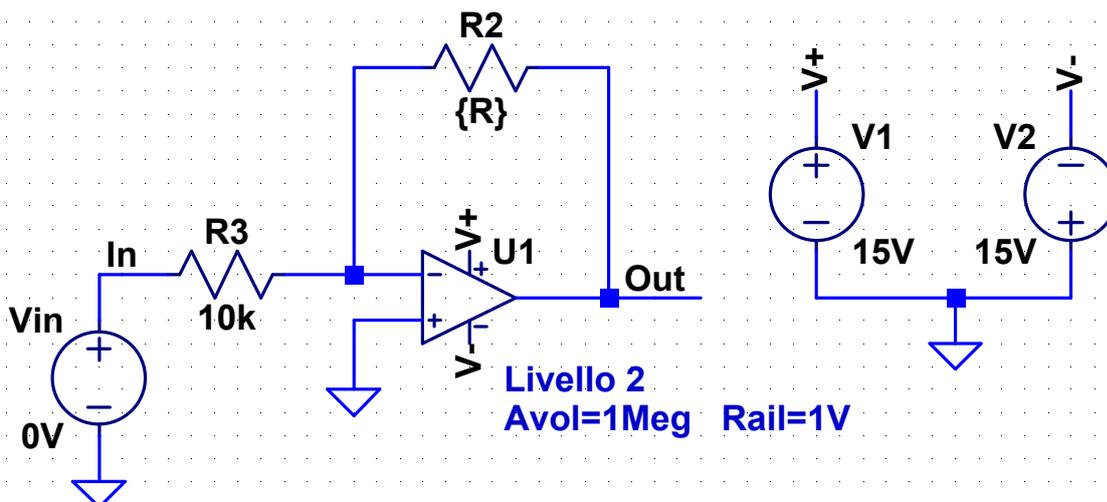
Nome	Parametro	Val. predefinito
Rail	Tensione di alimentazione – V_{sat} (V)	0
Ilimit	Massima corrente di uscita (A)	25 mA
Slew	Slew rate (V/s)	10 MV/s

- In questo caso, per utilizzare il modello è necessario che i terminali di alimentazione siano collegati

4

01-Amp-inv.asc

Caratteristica ingresso uscita dall'amplificatore invertente



.Step param R list 100k 50k 20k 10k

.dc Vin -20V 20V

Guadagno: -10, -5, -2, -1

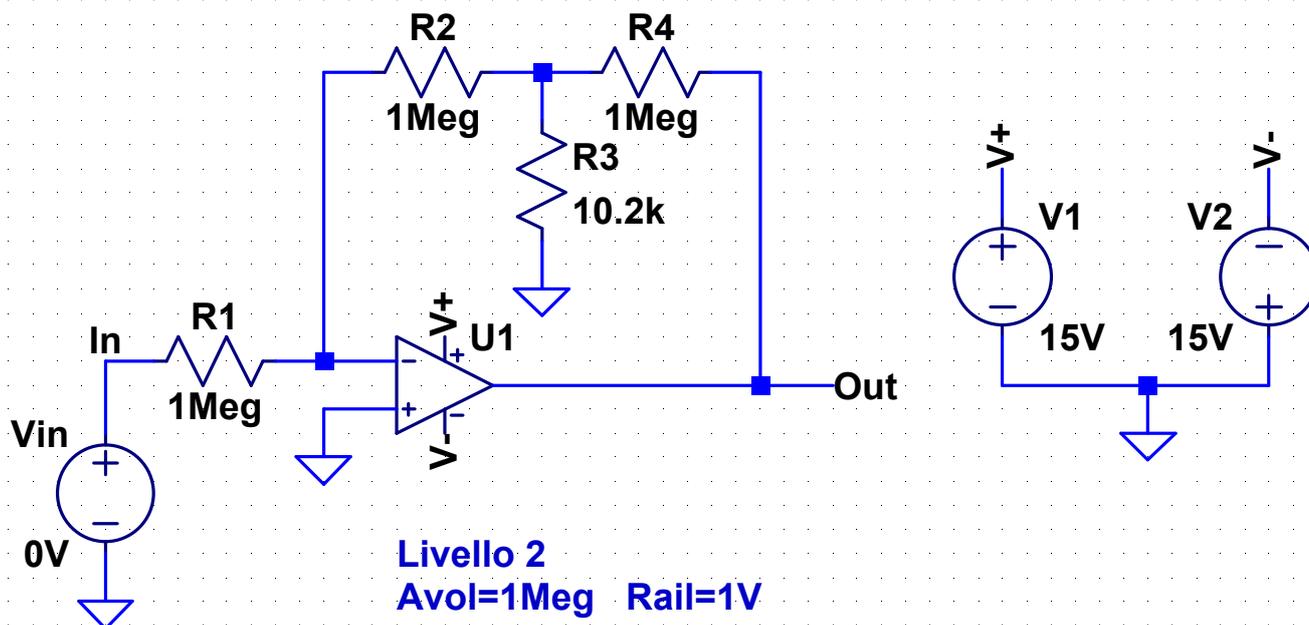
L'amplificatore satura per $|V_{in}| = 1.4V, 2.8V, 7V, 14V$

Il grafico di $-V(in)/i(Vin)$ mostra che nella regione lineare, la resistenza di ingresso è 10 kohm,

5

02-Amp-inv2.asc

Ampificatore invertente con $R_{in} = 1$ Megaohm e guadagno -100 realizzato con resistenze di valore non superiore a 1 Megaohm

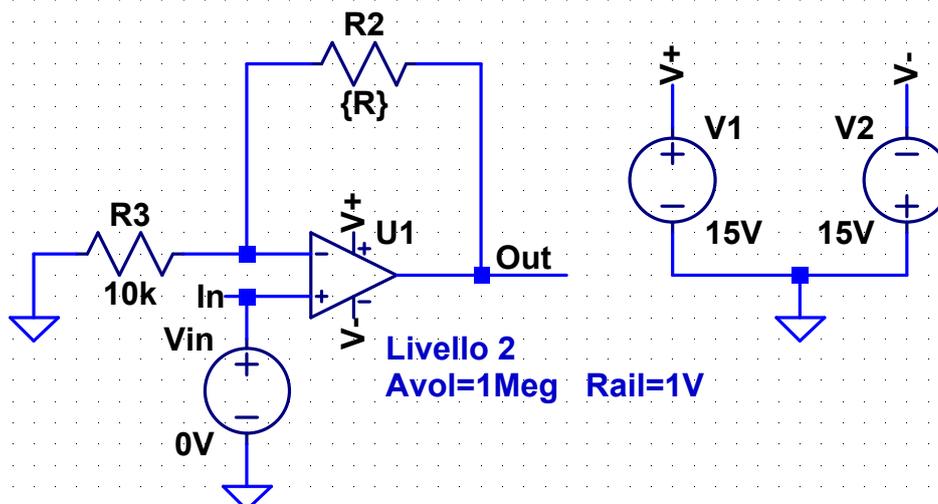


.dc Vin -200mV 200mV

6

03-Amp-non-inv.asc

Caratteristica ingresso uscita dall'amplificatore non invertente



.Step param R list 90k 40k 10k 1n

.dc Vin -20V 20V

Guadagno: 10, 5, 2, 1

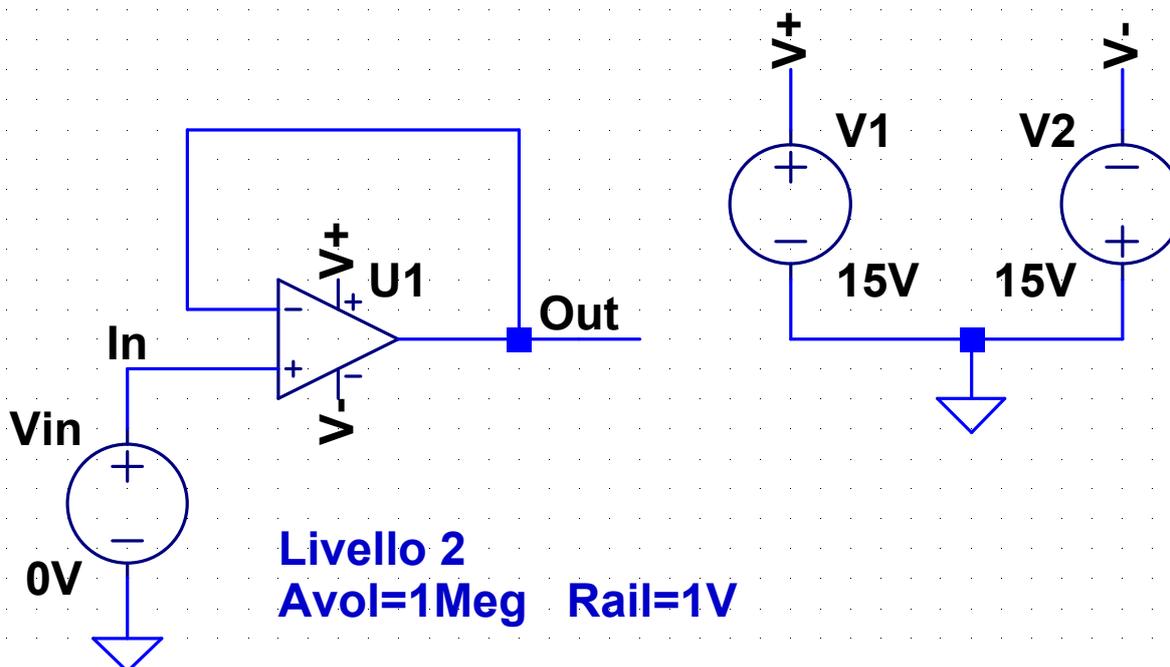
L'amplificatore satura per $|V_{in}| = 1.4V, 2.8V, 7V, 14V$

Il grafico di $-V(in)/i(Vin)$ mostra che la resistenza di ingresso, ha un valore costante pari a $R_{in} = 500$ megaohm

7

04-Buffer.asc

Inseguitore di tensione

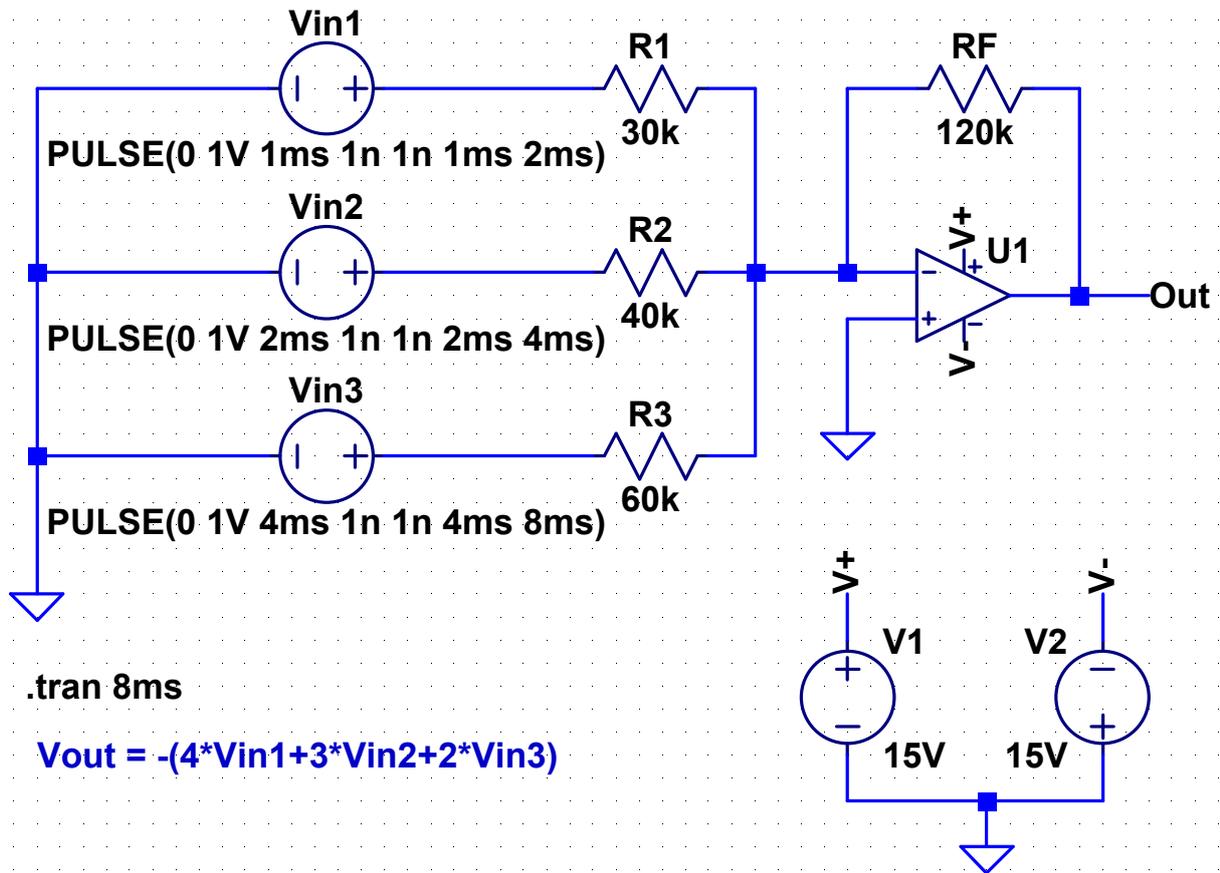


.dc Vin -20V 20V

8

05-Sum.asc

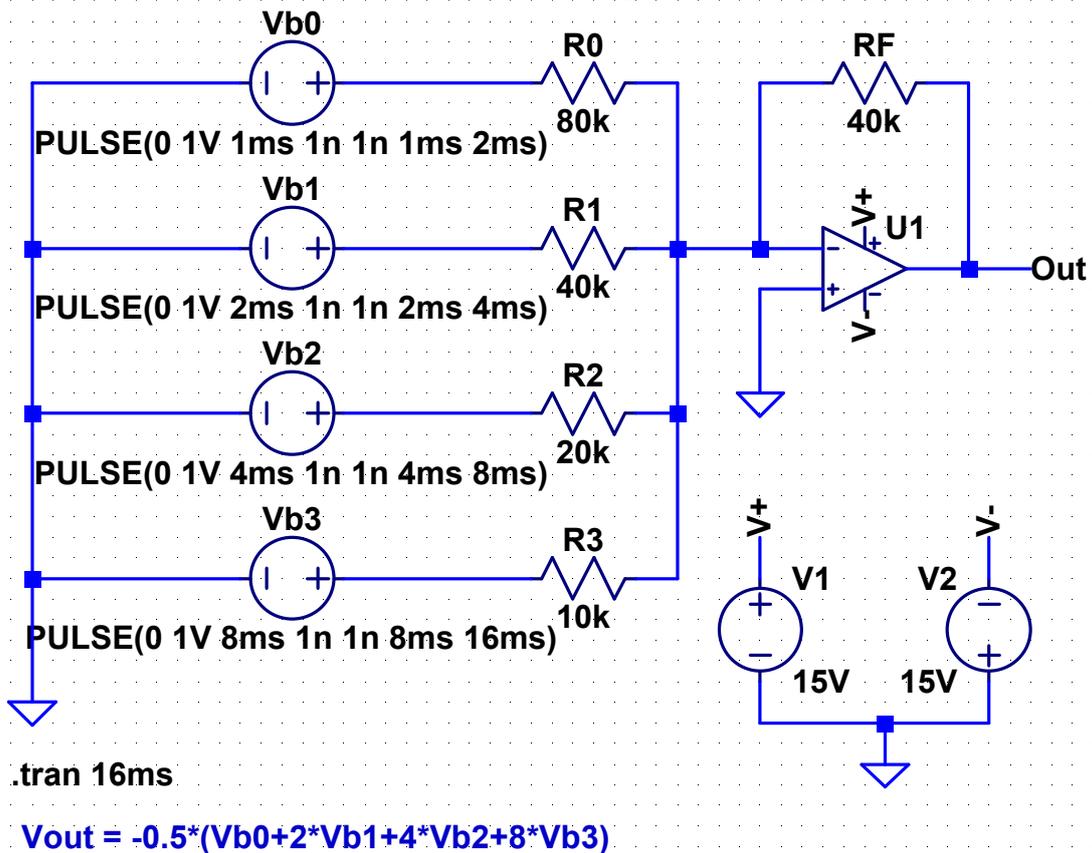
Sommatore invertente



9

06-DAC.asc

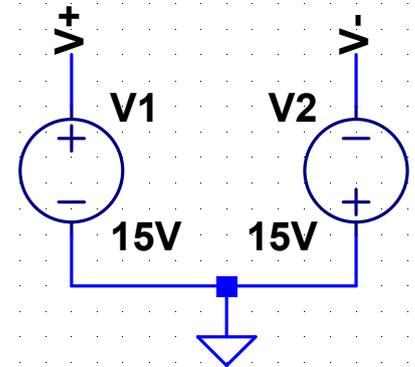
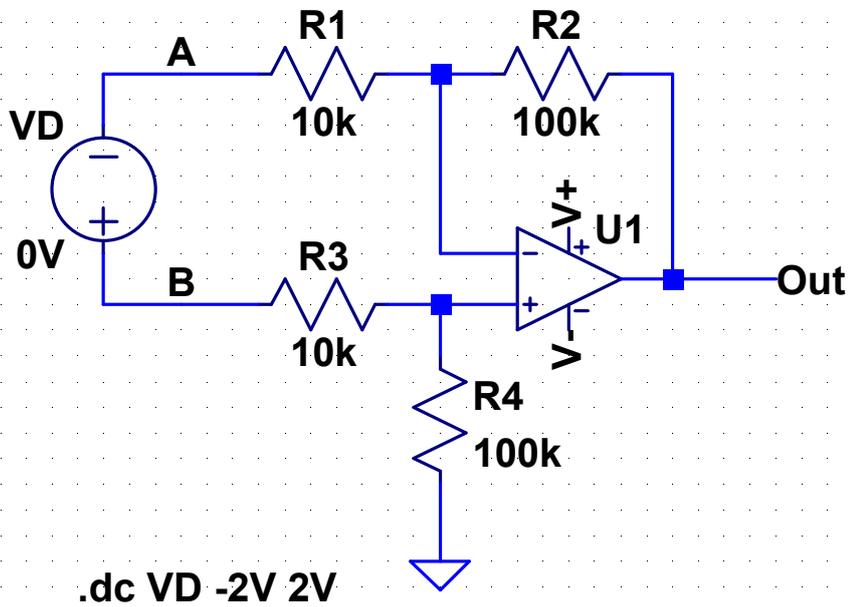
Convertitore digitale-analogico a 4 bit



10

07-Amp-diff1.asc

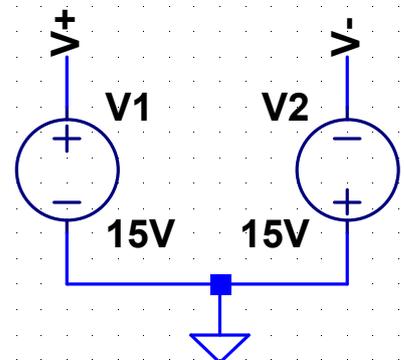
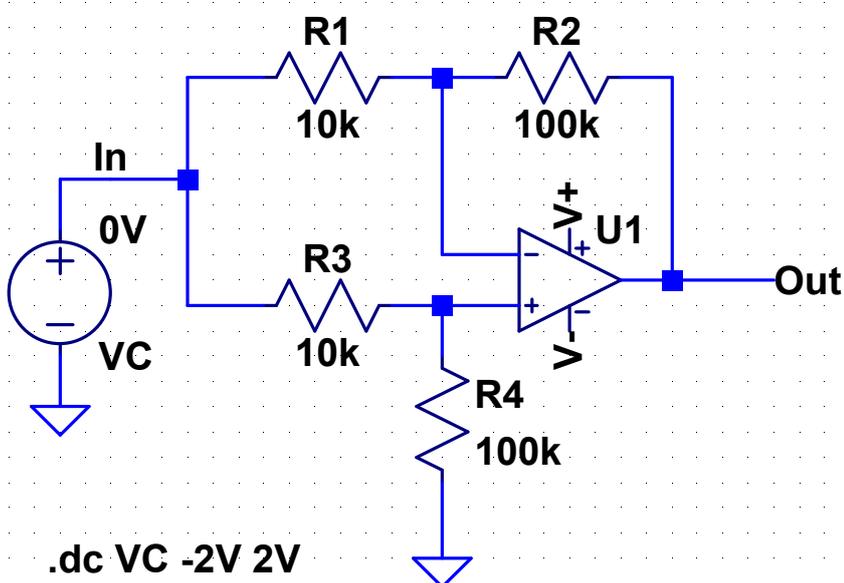
Amplificatore differenziale Valutazione del guadagno differenziale



11

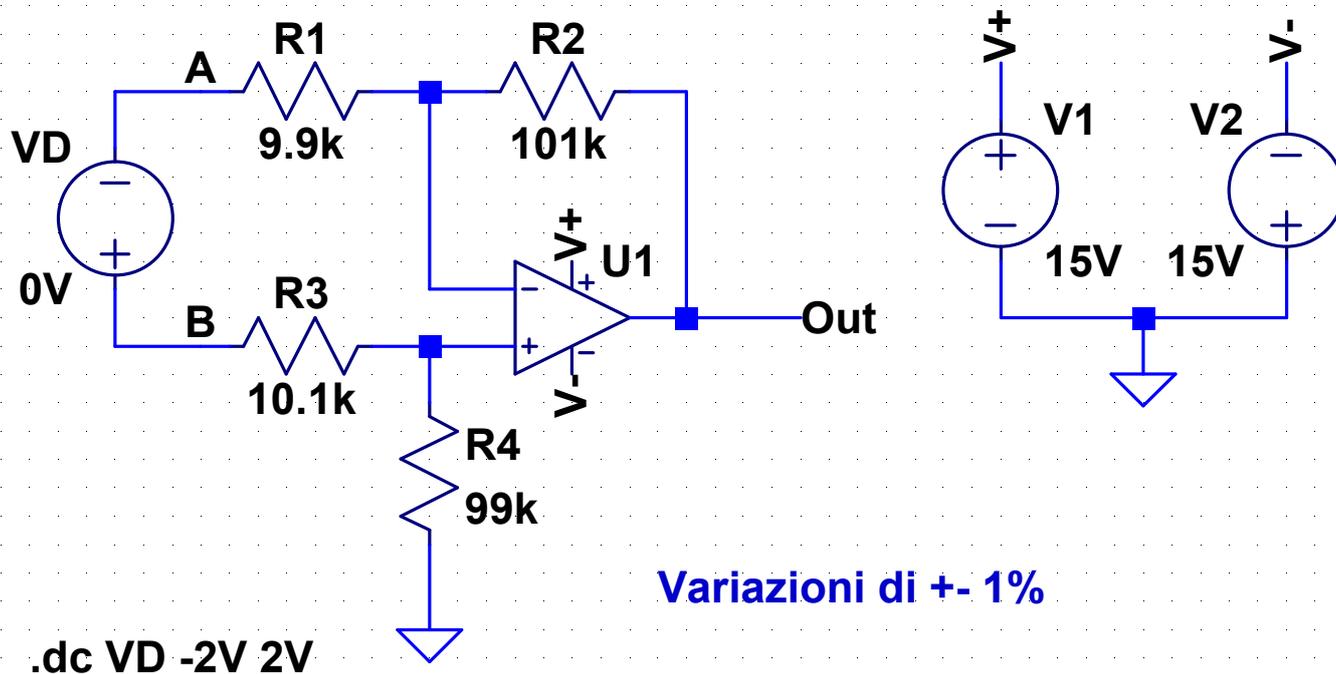
08-Amp-diff1.asc

Amplificatore differenziale Valutazione del guadagno di modo comune

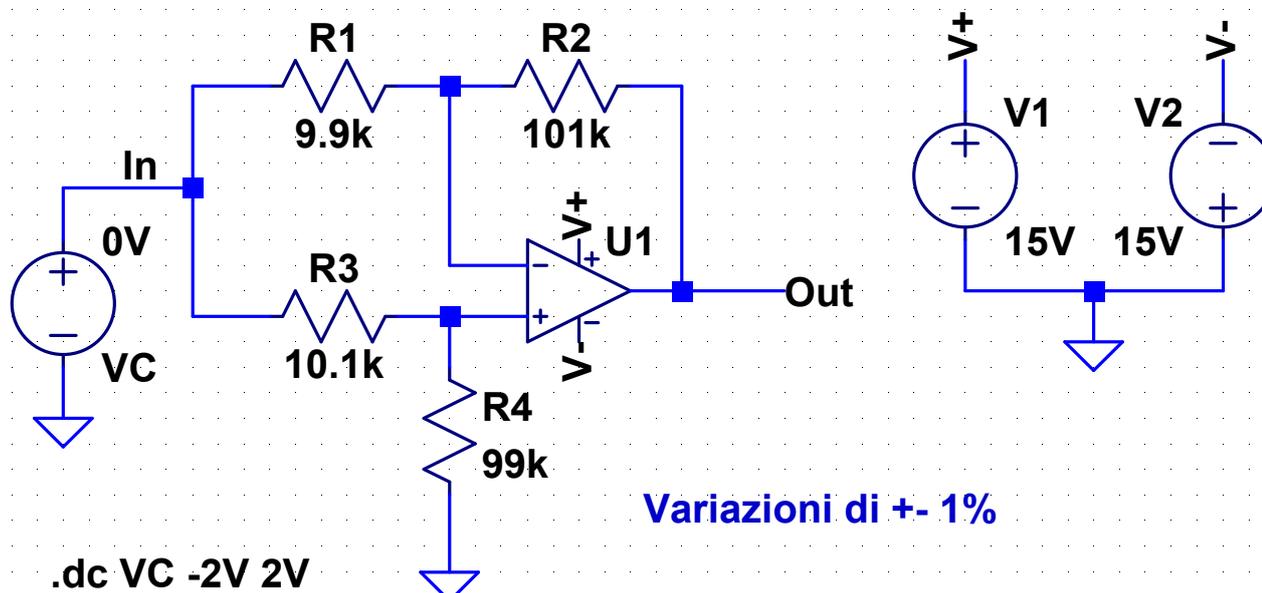


12

Amplificatore differenziale
Valutazione del guadagno differenziale
Effetto delle tolleranze dei resistori



Amplificatore differenziale
Valutazione del guadagno di modo comune
Effetto delle tolleranze dei resistori



Calcolo del CMRR

- Valori delle resistenze:

$$R_1 = 9.9 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 101 \text{ k}\Omega \quad R_3 = 10.1 \text{ k}\Omega \quad R_4 = 99 \text{ k}\Omega$$

- Guadagno di modo comune

$$A_c = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)} = -0.037$$

- Guadagno differenziale

$$A_d = \frac{R_1 R_4 + R_2 R_3 + 2R_2 R_4}{2R_1 (R_3 + R_4)} = 10.184$$

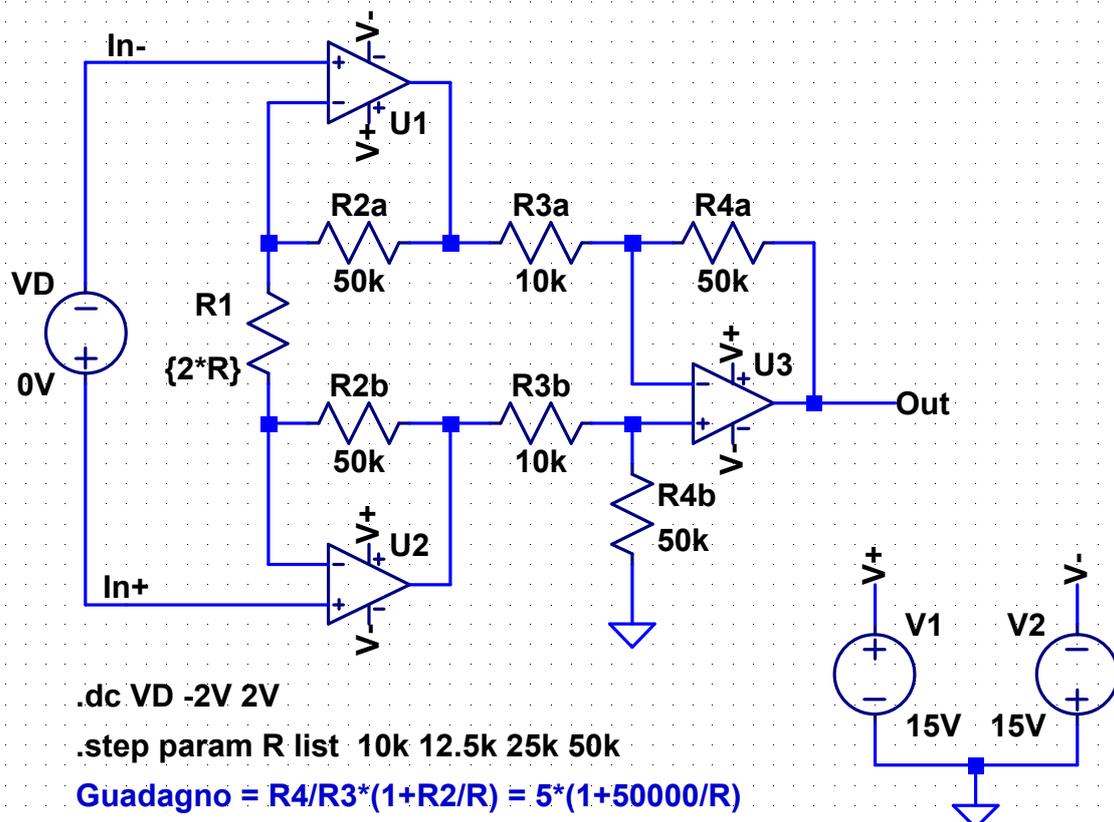
- Rapporto di reiezione di modo comune

$$\text{CMRR}_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \frac{|A_d|}{|A_c|} = 48.79 \text{ dB}$$

15

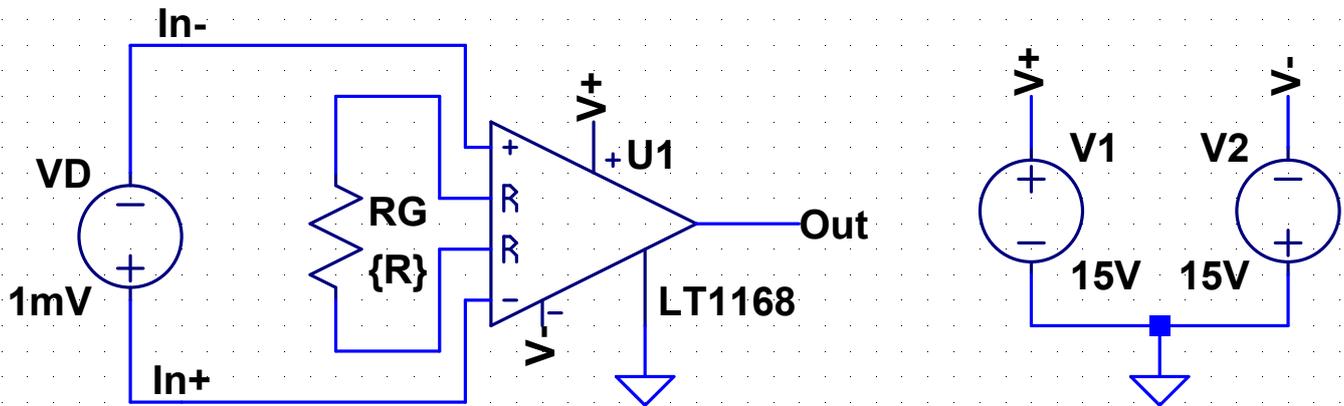
11-Amp-strum-1.asc

Amplificatore per strumentazione



16

Amplificatore per strumentazione integrato



.op

.step param R 1k 50k 1k

Guadagno = $1+49400/R$

17

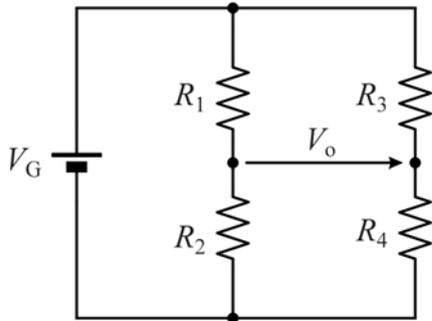
Sensori resistivi

- Un **sensore resistivo** è un dispositivo la cui resistenza varia per effetto della variazione di una particolare grandezza fisica
- **Esempi**
 - ◆ temperatura ➔ termistori, termoresistori (RTD)
 - ◆ intensità luminosa ➔ fotoresistori
 - ◆ deformazione elastica ➔ estensimetri
 - ◆ pressione ➔ trasduttori piezoresistivi
- Si indica con R la resistenza del dispositivo in una condizione di riferimento e con ΔR la variazione dovuta alla variazione, rispetto a tale condizione, della grandezza fisica a cui il dispositivo è sensibile
- La variazione ΔR può essere una piccola percentuale del valore R (per es. nel caso degli estensimetri si hanno tipicamente variazioni relative inferiori all'1%)

18

Ponte di Wheatstone

- Per convertire la variazione di resistenza in una variazione di tensione, si può utilizzare un **ponte di Wheatstone**, cioè un circuito formato da 4 resistori collegati nel modo seguente



$$V_o = V_G \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$V_o = 0 \text{ per } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

- Se i rapporti tra le resistenze dei due rami (R_1/R_2 e R_3/R_4) sono uguali il ponte è in equilibrio e la tensione V_o è nulla
- Se uno dei resistori del ponte è sostituito da un sensore resistivo e per $\Delta R \neq 0$ il ponte è in equilibrio, alle variazioni della resistenza del sensore corrisponde una tensione di uscita diversa da zero

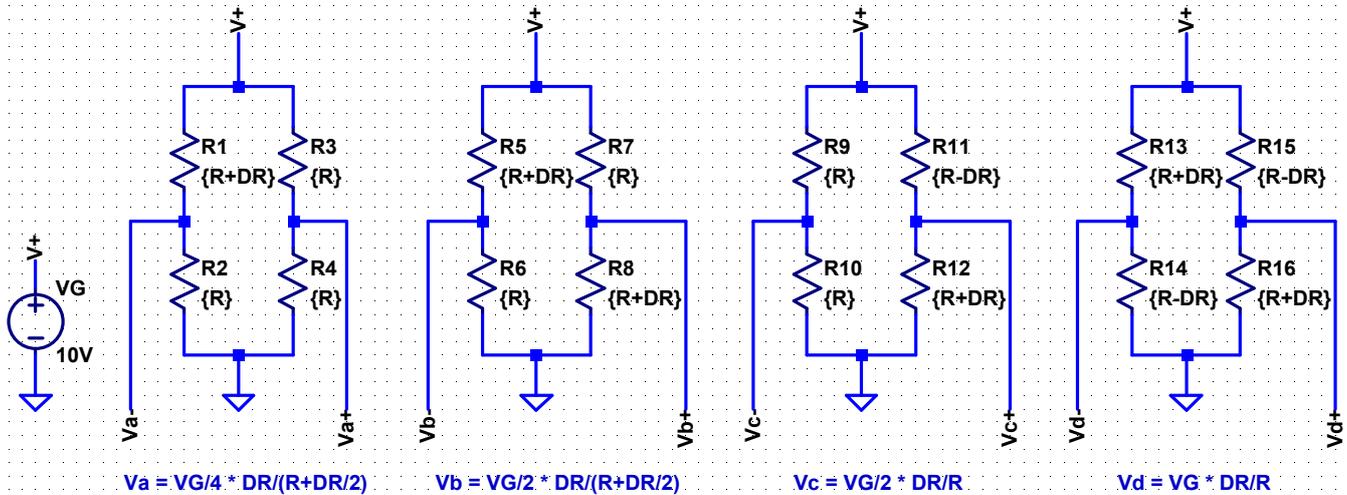
19

Ponte di Wheatstone

- Nell'esempio seguente si considerano ponti formati da 4 resistenze uguali (come spesso avviene nella pratica)
 - ◆ Nel caso a) l'unico elemento sensibile è R_1
 - ◆ Nel caso b) si hanno 2 elementi sensibili con variazioni uguali
 - ◆ Nel caso c) si hanno 2 elementi sensibili con variazioni uguali e opposte (come avviene, per es., nel caso di due estensimetri disposti in modo da subire deformazioni di segno opposto)
 - ◆ Nel caso d) tutti gli elementi sono sensibili (2 con variazioni positive e 2 con variazioni negative, tutte uguali in valore assoluto)
- Nei casi a) e b) la relazione tra ΔR e V_o è non lineare, ma può essere considerata praticamente lineare se $\Delta R \ll R$
- Nei casi c) e d) (cioè quando sono presenti sensori con variazioni di segno opposto) la relazione è lineare
- In generale si nota che aumentando il numero di elementi sensibili si ha un aumento della tensione

20

Ponti di Wheatstone alimentati in tensione



```

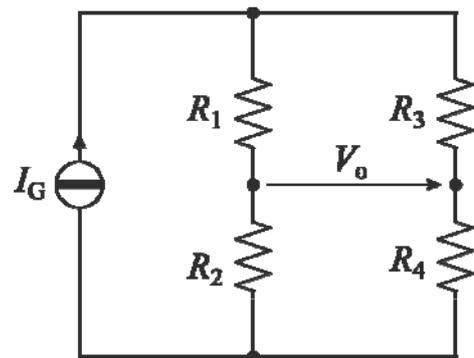
.param R=1k DR=a*R
.step param a=0 0.5 0.01
.op
    
```

Ponte di Wheatstone alimentato in corrente

- Nell'esempio seguente i ponti vengono alimentati in corrente
- In questo caso la tensione di uscita è data da

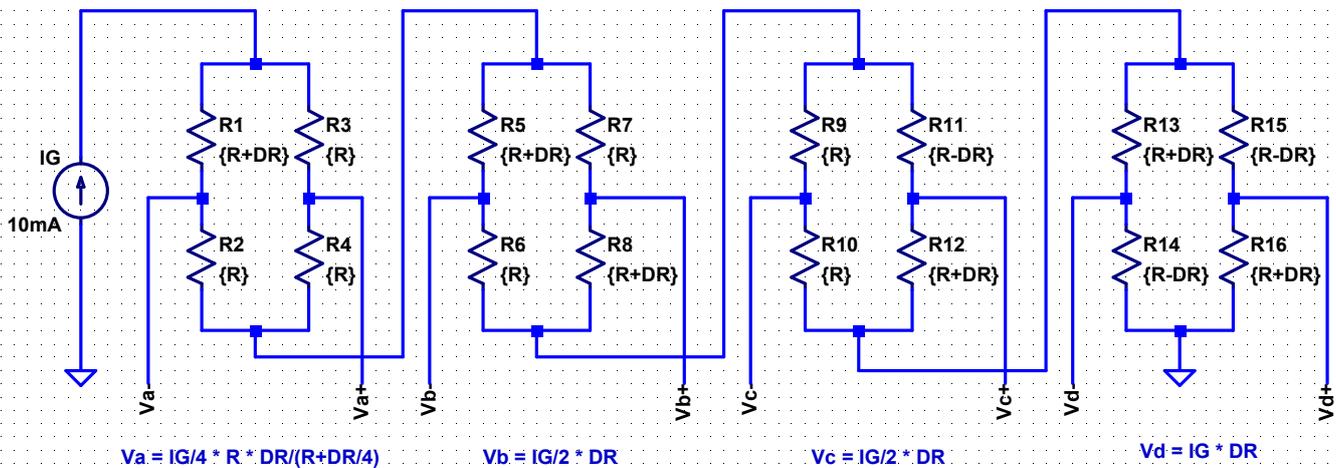
$$V_o = I_G \left[\frac{(R_1 + R_2)R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} - \frac{(R_3 + R_4)R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \right] = I_G \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

- Si può notare che la relazione tra ΔR e V_o risulta sempre lineare tranne che nel caso di un solo sensore
- In questo caso, comunque, l'errore di linearità risulta inferiore rispetto a quello di un ponte alimentato in tensione



14-Wheatstone-2.asc

Ponti di Wheatstone alimentati in corrente



```
.param R=1k DR=a*R  
.step param a=0 0.5 0.01  
.op
```

23

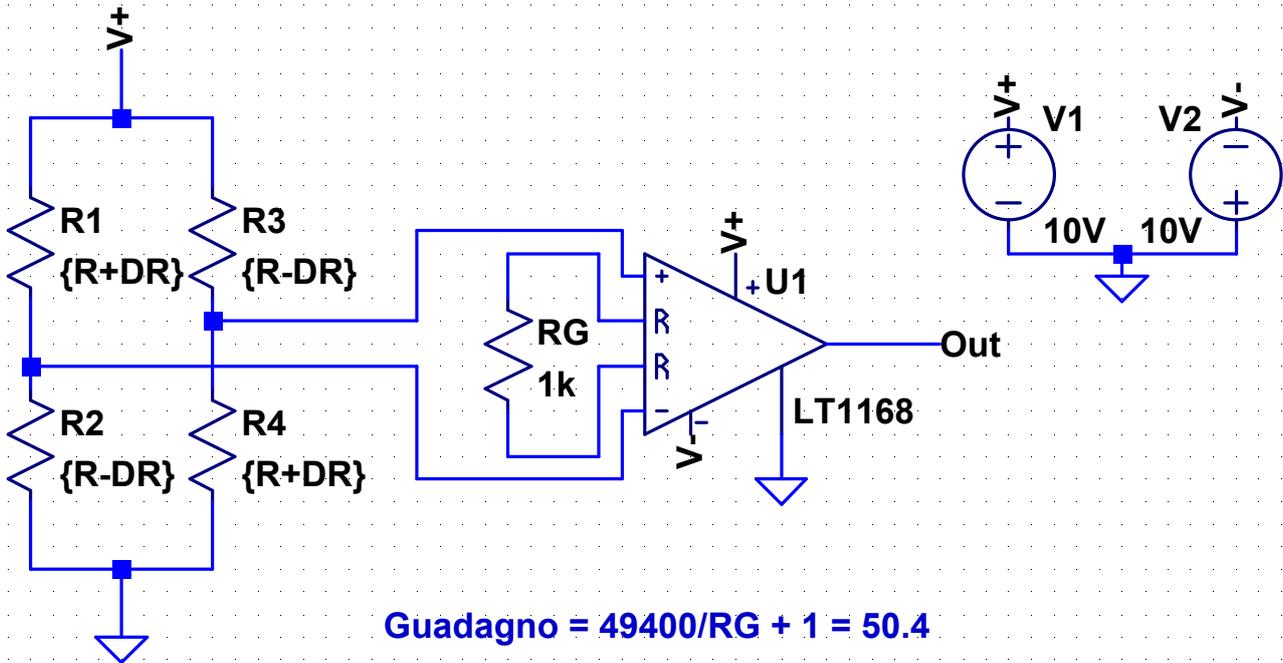
Ponte di Wheatstone e amplificatore differenziale

- All'uscita di un ponte di Wheatstone si hanno tipicamente tensioni dell'ordine di 10-100 mV
- Per amplificare questa tensione si può utilizzare un amplificatore differenziale
- L'amplificatore deve avere un'impedenza di ingresso elevata per non perturbare il ponte, inoltre è necessario un elevato CMRR dato che la tensione di ingresso di modo comune ha un valore relativamente alto (circa $V_G/2$)
- Per questo di solito si fa uso di amplificatori per strumentazione
- Per fornire al ponte un'alimentazione in corrente, si può utilizzare un convertitore tensione-corrente realizzato con un amplificatore operazionale

24

15-Wheatstone-3.asc

Ponte di Wheatstone con amplificatore per strumentazione

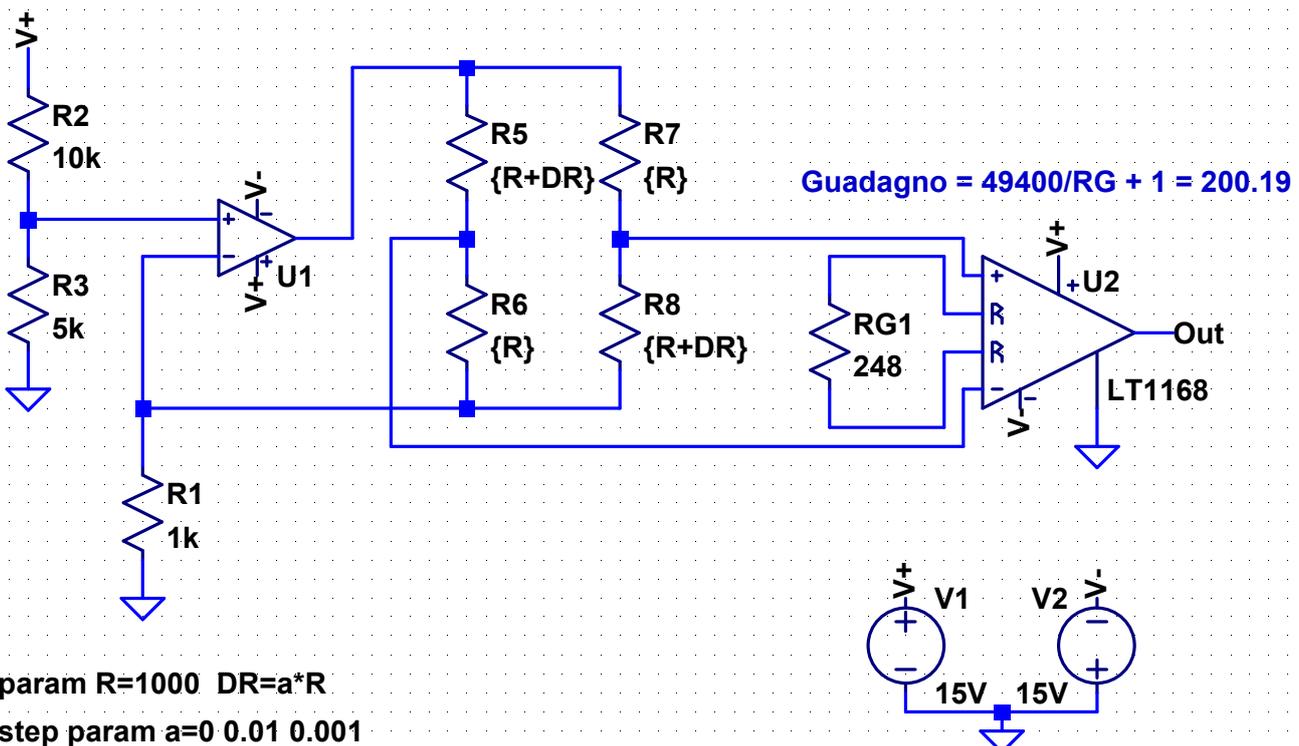


```
.param R=3500 DR=a*R  
.step param a=0 0.01 0.001  
.op
```

25

16-Wheatstone-4.asc

Ponte di Wheatstone alimentato da un convertitore tensione-corrente e collegato ad un amplificatore per strumentazione

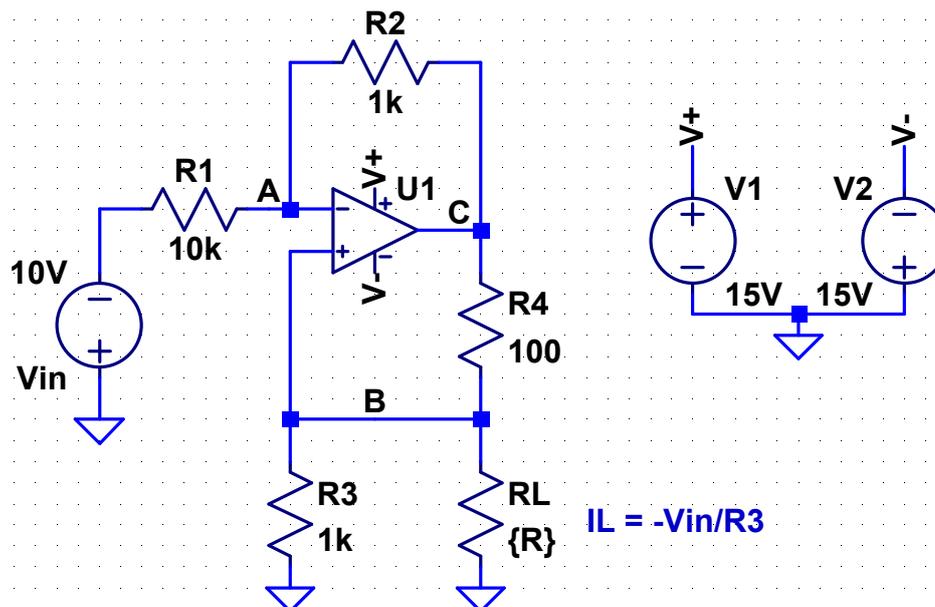


```
.param R=1000 DR=a*R  
.step param a=0 0.01 0.001  
.op
```

26

17-Conv-VI-1.asc

Convertitore tensione-corrente



```
.op  
.step dec param R 1 10k 100
```

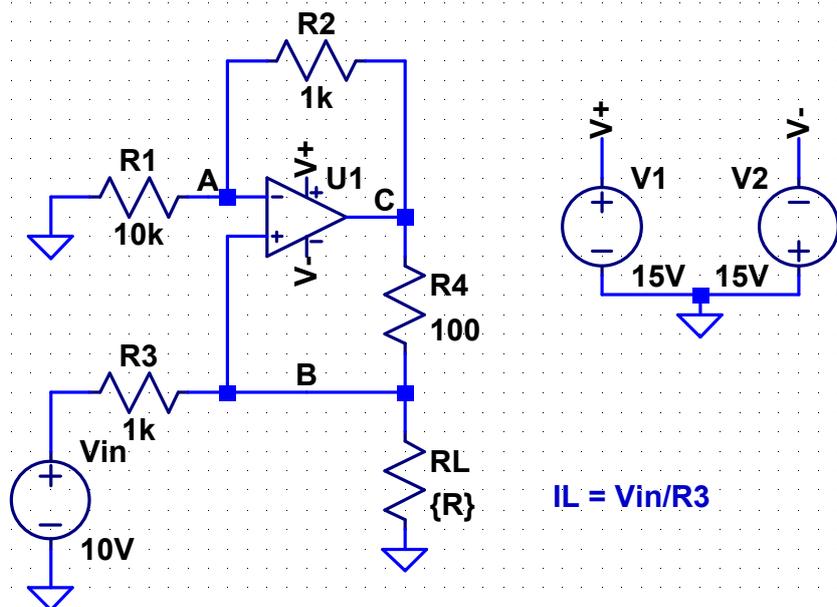
Il circuito fornisce una corrente di 10 mA per valori di R_L fino a circa 1.2 kohm.
Per valori maggiori di R_L l'amplificatore operazionale va in saturazione.

Per visualizzare meglio i risultati impostare la scala logaritmica sull'asse delle ascisse.

27

18-Conv-VI-2.asc

Convertitore tensione-corrente



```
.op  
.step dec param R 1 10k 100
```

Collegando il generatore in serie a R_3 si ottiene un convertitore non invertente.

Per visualizzare meglio i risultati impostare la scala logaritmica sull'asse delle ascisse.

28