

## CONVERTITORI TENSIONE/CORRENTE (V/I)

### GENERALITÀ

I convertitori tensione/corrente (V/I) sono utilizzati per ottenere in un carico una corrente proporzionale alla tensione di ingresso e indipendente dal carico stesso.

Per convertire una tensione in una corrente ad essa proporzionale è sufficiente una resistenza in derivazione alla tensione di ingresso da convertire.

Qualora sia invece necessario convertire un generatore reale in uno ideale di corrente, si può utilizzare un amplificatore di transconduttanza con amplificatore operazionale.



Viene detto amplificatore di transconduttanza in quanto la sua funzione di trasferimento è, dimensionalmente, una conduttanza.

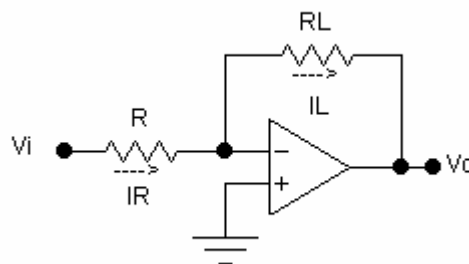
Tali circuiti sono essenzialmente di due tipi:

- con carico non collegato a massa (flottante);
- con carico collegato a massa.

## CONVERTITORI V/I CON CARICO NON COLLEGATO A MASSA

### Convertitore V/I invertente

Il circuito di figura mostra un convertitore V/I in cui la resistenza di carico  $R_L$  è flottante, cioè non collegata a massa.



Considerando gli ingressi equipotenziali,  $V_- = V_+ = 0$ , e trascurando la corrente di polarizzazione assorbita dall'ingresso invertente, si ha:

$$I_L = I_R = \frac{V_i}{R} \Rightarrow I_L = \frac{V_i}{R} .$$

Da ciò risulta provato che la corrente  $I_L$  non dipende dal carico  $R_L$ , ma dalla tensione di ingresso. Fissato il valore di  $R$ , la corrente  $I_L$  verrà univocamente determinata dal valore della tensione  $V_i$  di ingresso.

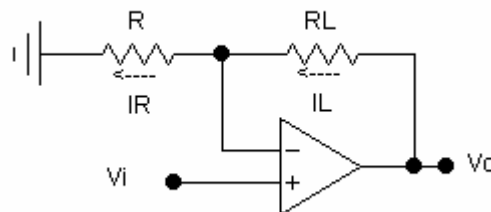
Il circuito viene detto invertente nel senso che, se  $V_i > 0$ , la corrente va dall'ingresso invertente all'uscita, che risulta a potenziale negativo rispetto massa.

La dipendenza della corrente  $I_L$  da  $V_i$  si mantiene finché il circuito funziona linearmente, ossia finché la tensione di uscita, che dipende dalla tensione di ingresso, si mantiene al di sotto del valore di saturazione (oltre il quale  $V_o$  non può più aumentare) e la corrente erogata dall'uscita non superi i  $5 \div 10\text{mA}$ , oltre i quali inizia a entrare in funzione la limitazione interna della corrente di uscita dell'amplificatore operazionale.

$$V_o = -\frac{R_L}{R} \cdot V_i < V_{oSAT} .$$

Se l'uscita satura, la corrente non dipenderà più dalla tensione d'ingresso.

### Convertitore V/I non invertente



Considerando gli ingressi equipotenziali,  $V_- = V_+ = V_i$ , e trascurando le correnti di polarizzazione, si ha:

$$\left. \begin{array}{l} V_- = V_+ = V_i \\ I_L = I_R \end{array} \right\} \Rightarrow I_R = \frac{V_-}{R} = \frac{V_i}{R} \Rightarrow I_L = \frac{V_i}{R} .$$

Una volta fissato il valore di  $R$ , la corrente dipende solo dalla tensione  $V_i$  di ingresso, ed è indipendente dal valore del carico  $R_L$ .

Il circuito viene detto non invertente nel senso che, se  $V_i > 0$ , la corrente va dall'uscita all'ingresso invertente; la tensione di uscita risulta positiva rispetto massa.

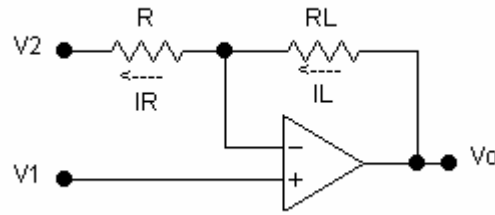
La corrente in questo convertitore V/I non invertente ha verso opposto rispetto alla corrente del convertitore V/I invertente prima visto.

La dipendenza della corrente  $I_L$  da  $V_i$  si mantiene finché il circuito funziona linearmente, ossia finché la tensione di uscita, che dipende dalla tensione di ingresso, si mantiene al di sotto del valore di saturazione (oltre il quale  $V_o$  non può più aumentare) e la corrente erogata dall'uscita non superi i  $5 \div 10\text{mA}$ , oltre i quali inizia a entrare in funzione la limitazione interna della corrente di uscita dell'amplificatore operazionale.

$$V_o = \left(1 + \frac{R_L}{R}\right) \cdot V_i < V_{oSAT} .$$

Se l'uscita satura, la corrente non dipenderà più dalla tensione d'ingresso.

## Convertitore V/I differenziale



Considerando gli ingressi equipotenziali, si ha:

$$\left. \begin{array}{l} V_- = V_+ = V_1 \\ I_L = I_R \end{array} \right| \Rightarrow I_R = \frac{V_1 - V_2}{R} \Rightarrow I_L = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{V_d}{R} .$$

La corrente sul carico risulta proporzionale alla differenza delle tensioni sui due ingressi. Il segno + o - di  $I_L$ , a seconda che prevalga  $V_1$  o  $V_2$ , ne definisce il verso:

- se  $V_1 > V_2$ ,  $V_d > 0$ , il verso della corrente  $I_L$  è quello di figura;
- se  $V_1 < V_2$ ,  $V_d < 0$ , il verso della corrente  $I_L$  è quello opposto.

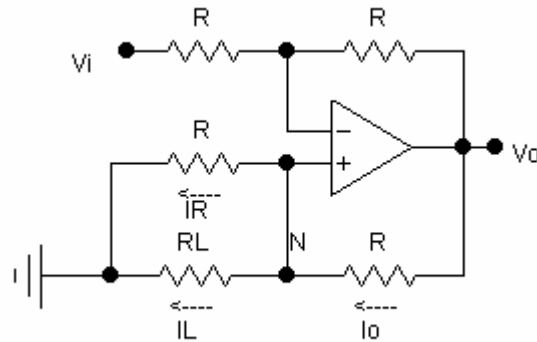
La dipendenza della corrente  $I_L$  da  $V_d$  si mantiene finché il circuito funziona linearmente, ossia finché la tensione di uscita, che dipende dalla tensione di ingresso, si mantiene al di sotto del valore di saturazione (oltre il quale  $V_o$  non può più aumentare) e la corrente erogata dall'uscita non superi i  $5 \div 10\text{mA}$ , oltre i quali inizia a entrare in funzione la limitazione interna della corrente di uscita dell'amplificatore operazionale.

La dipendenza della tensione d'uscita  $V_o$  dalla tensione si ottiene applicando il principio di sovrapposizione degli effetti e sommando i contributi dei due ingressi:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_L}{R}\right) \cdot V_1 - \frac{R_L}{R} \cdot V_2 = \frac{R_L}{R} \cdot (V_1 - V_2) + V_1 = \frac{R_L}{R} \cdot V_d + V_1 < V_{o\text{SAT}} .$$

## CONVERTITORE V/I CON CARICO COLLEGATO A MASSA

### Convertitore V/I invertente



Perché tale circuito risulti un convertitore V/I, la corrente  $I_L$  nel carico deve dipendere dalla tensione di ingresso  $V_i$  ed essere indipendente dal carico stesso.

Per dimostrare ciò si parte dall'equipotenzialità degli ingressi e dalla relazione delle correnti al nodo N

$$V_- = V_+ \quad I_L = I_o - I_R$$

Alla tensione  $V_-$  contribuiscono due cause:  $V_i$  e  $V_o$ . Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, si ottiene:

$$V_- = \frac{R}{R+R} \cdot V_i + \frac{R}{R+R} \cdot V_o = \frac{V_i}{2} + \frac{V_o}{2} = V_+$$

Per le correnti  $I_o$  e  $I_R$ , applicando la legge di Ohm, si ha:

$$I_o = \frac{V_o - V_+}{R} \quad I_R = \frac{V_+}{R}$$

Sostituendo nell'equazione di  $I_L$ , si ha:

$$I_L = I_o - I_R = \frac{V_o - V_+}{R} - \frac{V_+}{R} = \frac{V_o}{R} - \frac{2V_+}{R}$$

Per esprimere  $I_L$  in funzione di  $V_i$ , si sostituisce al posto di  $V_+$  l'espressione ottenuta per  $V_-$ :

$$I_L = \frac{V_o}{R} - \frac{2V_+}{R} = \frac{V_o}{R} - \frac{2}{R} \cdot \left( \frac{V_i}{2} + \frac{V_o}{2} \right) = -\frac{V_i}{R}$$

Il segno meno sta ad indicare che il verso della corrente è quello opposto a quello riportato in figura.

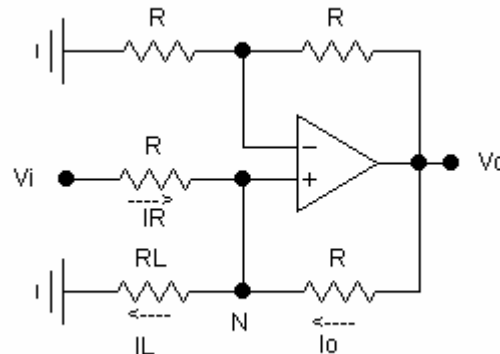
Se si utilizza un amplificatore operazionale con ingresso JFET si può fissare per R un valore superiore a  $10M\Omega$ , potendosi ottenere valori di  $I_L$  dell'ordine di  $10nA$ , con buone condizioni di stabilità. Al contrario, nel caso di amplificatore operazionale con ingresso BJT è prudente limitare il valore di R a  $100K\Omega$ . Inoltre, più è alto il valore di R rispetto a  $R_L$  e maggiore sarà l'intervallo delle tensioni d'ingresso utilizzabili, cui, però, corrisponderanno correnti di valore molto piccolo.

Il massimo valore di  $I_L$  è limitato a qualche mA, a causa dell'autoprotezione che limita la corrente di uscita degli amplificatori operazionali integrati.

La dipendenza della corrente  $I_L$  da  $V_d$  si mantiene finché il circuito funziona linearmente, ossia finché la tensione di uscita, che dipende dalla tensione di ingresso, si mantiene al di sotto del valore di saturazione (oltre il quale  $V_o$  non può più aumentare). Per calcolare  $V_o$  si parte dall'equipotenzialità degli ingressi:

$$\begin{aligned}
 V_- = V_+ &\Rightarrow V_- = \frac{R}{R+R} \cdot V_i + \frac{R}{R+R} \cdot V_o = \frac{R // R_L}{R + R // R_L} \cdot V_o = V_+ \Rightarrow \\
 \Rightarrow \frac{V_i}{2} + \frac{V_o}{2} &= \frac{\frac{R R_L}{R + R_L}}{R + \frac{R R_L}{R + R_L}} \cdot V_o = \frac{\frac{R_L}{R + R_L}}{\frac{R + R_L + R_L}{R + R_L}} \cdot V_o = \frac{R_L}{R + 2R_L} \cdot V_o \Rightarrow \\
 \Rightarrow \frac{V_o}{2} - \frac{R_L}{R + 2R_L} \cdot V_o &= -\frac{V_i}{2} \Rightarrow \frac{R + 2R_L - 2R_L}{2 \cdot (R + 2R_L)} \cdot V_o = -\frac{V_i}{2} \Rightarrow \\
 \Rightarrow \frac{R}{2 \cdot (R + 2R_L)} \cdot V_o &= -\frac{V_i}{2} \Rightarrow V_o = -\left(1 + \frac{2R_L}{R}\right) \cdot V_i < V_{oSAT}
 \end{aligned}$$

### Convertitore V/I non invertente



Per dimostrare che  $I_L$  è funzione di  $V_i$  e non del carico si parte dall'equipotenzialità degli ingressi e dalla relazione delle correnti al nodo N:

$$V_- = V_+ \quad I_L = I_o + I_R$$

Per  $V_-$  si ha:

$$V_- = \frac{R}{R+R} \cdot V_o = \frac{V_o}{2} = V_+$$

Per le correnti  $I_o$  e  $I_R$ , applicando la legge di Ohm, si ha:

$$I_o = \frac{V_o - V_+}{R} \quad I_R = \frac{V_i - V_+}{R}$$

Sostituendo nell'equazione di  $I_L$ , si ha:

$$I_L = I_o + I_R = \frac{V_o - V_+}{R} + \frac{V_i - V_+}{R} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_i}{R} - \frac{2V_+}{R}$$

Per esprimere  $I_L$  in funzione di  $V_i$ , si sostituisce al posto di  $V_+$  l'espressione ottenuta per  $V_-$ :

$$I_L = \frac{V_o}{R} + \frac{V_i}{R} - \frac{2V_+}{R} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_i}{R} - \frac{2}{R} \cdot \frac{V_o}{2} = \frac{V_i}{R}$$

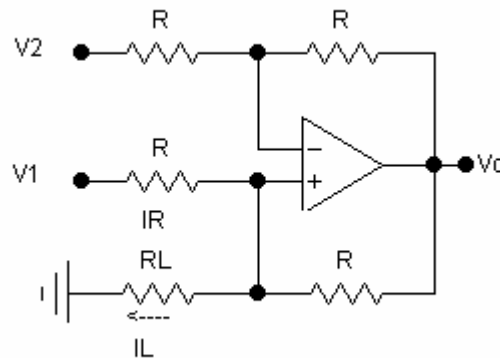
La positività di  $I_L$  sta ad indicare che il verso della corrente è concorde con quello riportato in figura, ed opposto al verso della corrente del circuito invertente.

Il massimo valore di  $I_L$  è limitato a qualche mA, a causa dell'autoprotezione che limita la corrente di uscita degli amplificatori operazionali integrati.

La dipendenza della corrente  $I_L$  da  $V_d$  si mantiene finché il circuito funziona linearmente, ossia finché la tensione di uscita, che dipende dalla tensione di ingresso, si mantiene al di sotto del valore di saturazione (oltre il quale  $V_o$  non può più aumentare). Per calcolare  $V_o$  si parte dall'equipotenzialità degli ingressi:

$$\begin{aligned} V_- = V_+ &\Rightarrow V_- = \frac{R}{R+R} \cdot V_o = \frac{R // R_L}{R + R // R_L} \cdot V_i + \frac{R // R_L}{R + R // R_L} \cdot V_o = V_+ \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{V_o}{2} &= \frac{\frac{RR_L}{R+R_L}}{R + \frac{RR_L}{R+R_L}} \cdot V_i + \frac{\frac{RR_L}{R+R_L}}{R + \frac{RR_L}{R+R_L}} \cdot V_o = \frac{R_L}{R+2R_L} \cdot V_i + \frac{R_L}{R+2R_L} \cdot V_o \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{V_o}{2} - \frac{R_L}{R+2R_L} \cdot V_o &= \frac{R_L}{R+2R_L} \cdot V_i \Rightarrow \frac{R+2R_L-2R_L}{2 \cdot (R+2R_L)} \cdot V_o = \frac{R_L}{R+2R_L} \cdot V_i \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{R}{2} \cdot V_o &= R_L \cdot V_i \Rightarrow V_o = \frac{2R_L}{R} \cdot V_i < V_{oSAT} \end{aligned}$$

### Convertitore V/I differenziale



Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, si ha:

$$I_L = I_{L1} + I_{L2} = \frac{V_1}{R} - \frac{V_2}{R} = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{V_d}{R}$$

La corrente sul carico risulta proporzionale alla differenza delle tensioni sui due ingressi.

Il segno  $+$  o  $-$  di  $I_L$ , a seconda che prevalga  $V_1$  o  $V_2$ , ne definisce il verso:

- se  $V_1 > V_2$ ,  $V_d > 0$ , il verso della corrente  $I_L$  è quello di figura;
- se  $V_1 < V_2$ ,  $V_d < 0$ , il verso della corrente  $I_L$  è quello opposto.

Il massimo valore di  $I_L$  è limitato a qualche mA, a causa dell'autoprotezione che limita la corrente di uscita degli amplificatori operazionali integrati.

La dipendenza della corrente  $I_L$  da  $V_d$  si mantiene finché il circuito funziona linearmente, ossia finché la tensione di uscita, che dipende dalla tensione di ingresso, si mantiene al di sotto del valore di saturazione (oltre il quale  $V_o$  non può più aumentare). Per calcolare  $V_o$  si utilizza il principio di sovrapposizione degli effetti:

$$V_o = V_{o1} + V_{o+} = \frac{2R_L}{R} \cdot V_1 - \left(1 + \frac{2R_L}{R}\right) \cdot V_2 = \frac{2R_L}{R} \cdot (V_1 - V_2) - V_2 = \frac{2R_L}{R} \cdot V_d - V_2 < V_{oSAT}$$

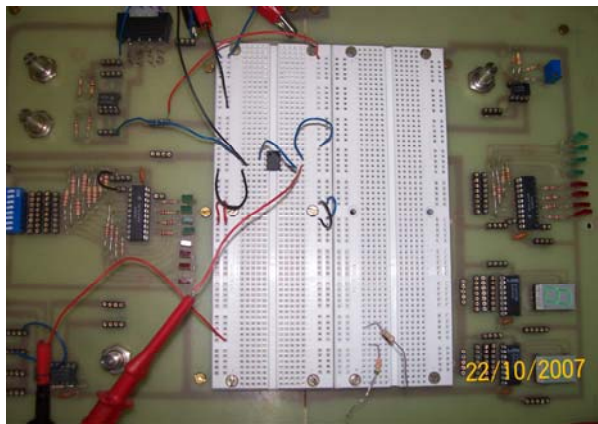
## VERIFICA DI CONVERTITORI TENSIONE/CORRENTE (V/I)

### GENERALITÀ

Si utilizzerà l'amplificatore operazionale TL081 alimentato con tensione duale  $V_{CC} = \pm 12V$ .

Come strumenti di misura si utilizzeranno quattro multimetri digitali 4½ digit.

I circuiti saranno montati su una piastra sperimentale (figura) che dispone delle alimentazioni, di due generatori di tensione continua di precisione variabili da  $-10V$  a  $+10V$ , un generatore di tensione di riferimento di precisione regolabile da 0 a 9V. Tali generatori variabili consentono di regolare la tensione con una precisione del millesimo di volt.



Di ogni circuito si è preventivato il funzionamento, verificando poi sperimentalmente l'esattezza delle previsioni.

I risultati sperimentali sono stati tabulati e, ove possibile, quantizzati mediante grafici. Nelle tabelle sono anche riportati i valori teorici aspettati, sia per il funzionamento lineare sia per quello non lineare.

Dato che la tensione di uscita dipende dal valore della tensione di ingresso, e che non potrà mai essere superiore alla tensione di saturazione, esiste una limitazione al valore sia della resistenza  $R_L$  sia della tensione  $V_i$  d'ingresso oltre il quale la corrente  $I_L$  perde la sua dipendenza da  $V_i$ .

Scopo della verifica è quello di evidenziare la costanza della corrente  $I_L$  al variare della resistenza di carico  $R_L$  e la dipendenza della corrente  $I_L$  dalla tensione d'ingresso  $V_i$  nella zona di funzionamento lineare del circuito (tensione d'uscita compresa tra le due tensioni di saturazione). Verificare, inoltre, che, quando l'uscita satura, la corrente  $I_L$  non dipende più da  $V_i$ .

### Criteri di progetto

Nel dimensionare i circuiti bisogna tenere conto dei valori di tensione d'ingresso e di resistenza di carico che saturano l'uscita; inoltre, il valore della corrente deve risultare inferiore a 5mA ad evitare che entri in funzione la protezione interna verso i corto circuiti.

Si procede nel seguente modo:



1. si fissa la massima corrente nel carico  $I_{LMAX}$  (4mA) in corrispondenza di un massimo valore di tensione d'ingresso ( $V_{iMAX}$ ) al quale deve saturare l'uscita ( $V_o = V_{oSAT} = 10V$ );
2. con i valori fissati al punto 1, si determina il valore della resistenza R;
3. avendo fissato il valore della tensione di saturazione dell'uscita, e utilizzando i valori al punto 1 e 2, si determina il valore della resistenza del carico  $R_L$  al quale si ha la saturazione dell'uscita quando  $V_i = V_{iMAX}$ ;
4. si fissa il valore della resistenza  $R_L$ , tenendo conto del valore che si utilizzerà per  $V_i$ .

Tutto ciò consente di dimensionare le resistenze in modo da ottenere una verifica più significativa possibile, anche per quanto riguarda l'interpretazione dei valori misurati.

Particolare attenzione bisognerà porre nel dimensionare i valori delle resistenze per i circuiti con risposta differenziale; i valori, in questo caso, dipendono dalla differenza delle tensioni d'ingresso.

### Amplificatore operazionale utilizzato

L'amplificatore operazionale usato per realizzare i circuiti è il TL081, con ingresso bi-FET.

Le caratteristiche fondamentali sono alto slew-rate, bassa corrente di polarizzazione e di offset, bassa deriva termica, alta impedenza di ingresso.

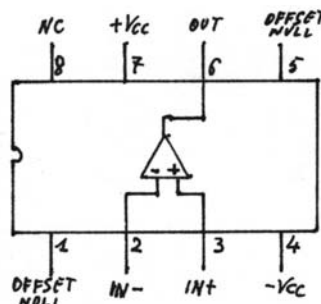
#### Caratteristiche

- Bassa dissipazione di potenza.
- Ampi intervalli della tensione di modo comune e differenziale.
- Bassa corrente di offset e di polarizzazione.
- Protezione dai corto circuiti dell'uscita.
- Bassa distorsione armonica.
- Basso rumore.
- Alta impedenza di ingresso, stadio di ingresso JFET.
- Compensazione interna di frequenza.
- Alto slew-rate, 13 V/ $\mu$ s.

Valori massimi assoluti, alla temperatura ambiente di 25°C

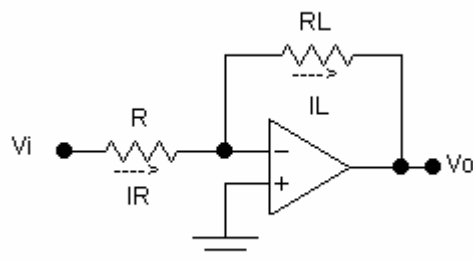
- |                                                  |               |
|--------------------------------------------------|---------------|
| - Tensione di alimentazione positiva, $+V_{CC}$  | 18V           |
| - Tensione di alimentazione negativa, $-V_{CC}$  | -18V          |
| - Tensione differenziale di ingresso             | $\pm 30V$     |
| - Durata del corto circuito d'uscita             | illimitata    |
| - Dissipazione totale di potenza continua a 25°C | 680mW         |
| - Intervallo delle temperature di funzionamento  | da 0°C a 70°C |

Diagramma delle connessioni



## CONVERTITORI V/I CON CARICO NON COLLEGATO A MASSA

### CONVERTITORE V/I INVERTENTE



#### Dimensionamento del circuito

Si fissa  $I_{LMAX} = 4\text{mA}$  e  $V_{iMAX} = 6\text{V}$  e si calcola  $R = \frac{V_{iMAX}}{I_{LMAX}} = \frac{6}{4 \cdot 10^{-3}} = 1,5\text{k}\Omega$ .

Assumendo  $V_{oSAT} = 10\text{V}$ , si calcola  $R'_L$  dalla funzione d'uscita nelle condizioni di saturazione:

$$V_{oSAT} = -\frac{R'_L}{R} \cdot V_{iMAX} \Rightarrow R'_L = -\frac{V_{oSAT}}{V_{iMAX}} \cdot R = -\frac{-10}{6} \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 2,5\text{k}\Omega$$

- Verifica della indipendenza di  $I_L$  da  $R_L$ : si fissano  $V_i = 2\text{V}$  e  $R = 1,5\text{k}\Omega$ . La corrente  $I_L$  ha un valore sicuramente inferiore a  $I_{LMAX} = 4\text{mA}$  e la saturazione dell'uscita si avrà per un valore di  $R_L$  maggiore di  $R'_L$ :

$$R_{LMAX} = -\frac{V_{oSAT}}{V_i} \cdot R = -\frac{-10}{2} \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 7,5\text{k}\Omega$$

Si utilizzeranno i seguenti valori di  $R_L$ : 0,22K $\Omega$ ; 0,47K $\Omega$ ; 0,68K $\Omega$ ; 1K $\Omega$ ; 1,8K $\Omega$ ; 2,2K $\Omega$ ; 3,3K $\Omega$ ; 3,9K $\Omega$ ; 4,7K $\Omega$ ; 5,6K $\Omega$ ; 6,8K $\Omega$ ; 8,2K $\Omega$ ; 10K $\Omega$ .

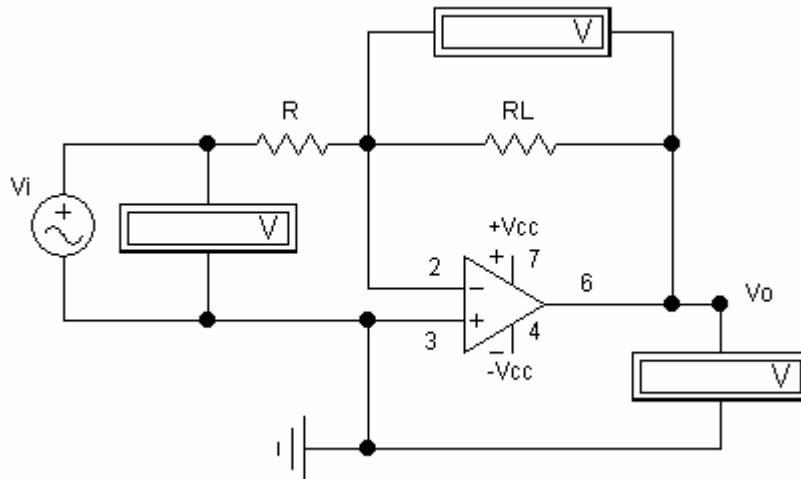
- Verifica della dipendenza di  $I_L$  da  $V_i$ : si fissano  $R_L = 2,2\text{k}\Omega$  e  $R = 1,5\text{k}\Omega$ . Avendo scelto un valore commerciale di  $R_L$  inferiore a  $R'_L$ , l'uscita saturerà per un valore maggiore di 6V e una corrente  $I_{LMAX}$  maggiore di 4mA. Infatti:

$$V_{oSAT} = -\frac{R_L}{R} \cdot V_{iMAX} \Rightarrow V_{iMAX} = -\frac{V_{oSAT}}{R_L} \cdot R = -\frac{-10}{2,2 \cdot 10^3} \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 6,82\text{V}$$

Cui corrisponde una corrente  $I_{LMAX} = \frac{V_{iMAX}}{R} = \frac{6,82}{1,5 \cdot 10^3} = 4,55mA$ .

Per  $V_i$  si utilizzeranno i seguenti valori: 1V; 1,5V; 2V; 2,5V; 3V; 3,5V; 4V; 4,5V; 5V; 5,5V; 6V; 6,5V; 6,8V; 7V; 8V; 9V; 10V.

### Circuito di misura



Si misurano  $V_i$ ,  $V_o$ ,  $V_{RL}$ , e si calcola, con il valore misurato di  $V_{RL}$ , il valore di  $I_L$ , applicando la legge di Ohm ai capi di  $R_L$ :  $I_L = \frac{V_{RL}}{R_L}$ .

Nella tabella vengono riportati anche i valori calcolati di  $V_o$  e di  $I_L$ . Nei casi in cui l'uscita è saturata, il valore calcolato di  $I_L$  è quello nelle condizioni di uscita saturata, negli altri casi è quello imposto dalla resistenza  $R$  e dalla tensione d'ingresso.

Quando  $|V_o| < |V_{oSAT}|$ , la corrente è data da  $I_L = \frac{V_i}{R}$ .

Quando  $|V_o| = |V_{oSAT}|$ , la corrente  $I_L$  non è più funzione lineare di  $V_i$ . La corrente  $I_L$  attraversa la serie  $R + R_L$  che è sottoposta alla differenza di potenziale  $V_{oSAT} - V_i$ . Applicando la legge di Ohm ai capi della serie si ha:  $I_L = \frac{V_{oSAT} - V_i}{R + R_L}$ . Poiché il valore della tensione di saturazione risulta anche

sensibilmente diverso da quello reale, come valore di saturazione si assumerà quello rilevato sperimentalmente; ciò consente di calcolare valori molto prossimi a quelli misurati. Inoltre, il valore di tensione di saturazione positiva risulterà diverso da quella di saturazione negativa.

La tensione  $V_o$  si calcola dall'espressione  $V_o = -\frac{R_L}{R} \cdot V_i$

**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $R_L$ :**  $V_i = 2V$  ;  $R = 1,5k\Omega$  :  $R_{LMAX} = 7,5k\Omega$ .

N	K $\Omega$	Volt			mA		Volt	mA
	$R_L$	$V_i$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$		$V_o$ calc	$I_L$ calc
1	0,22	2	-0,301	-0,299	-1,359		-0,290	-1,333
2	0,47	2	-0,628	-0,626	-1,359		-0,627	-1,333
3	0,68	2	-0,930	-0,928	-1,364		-0,907	-1,333
4	1	2	-1,341	-1,339	-1,339		-1,333	-1,333
5	1,8	2	-2,378	-2,376	-1,320		-2,400	-1,333
6	2,2	2	-2,961	-2,959	-1,345		-2,933	-1,333
7	3,3	2	-4,378	-4,376	-1,326		-4,400	-1,333
8	3,9	2	-5,184	-5,182	-1,329		-5,200	-1,333
9	4,7	2	-6,282	-6,279	-1,336		-6,267	-1,333
10	5,6	2	-7,444	-7,442	-1,329		-7,467	-1,333
11	6,8	2	-9,199	-9,197	-1,3525		-9,067	-1,333
12	8,2	2	-10,322	-10,403	-1,270		-10,93	-1,237
13	10	2	-10,438	-10,817	-1,082		-13,33	-1,043

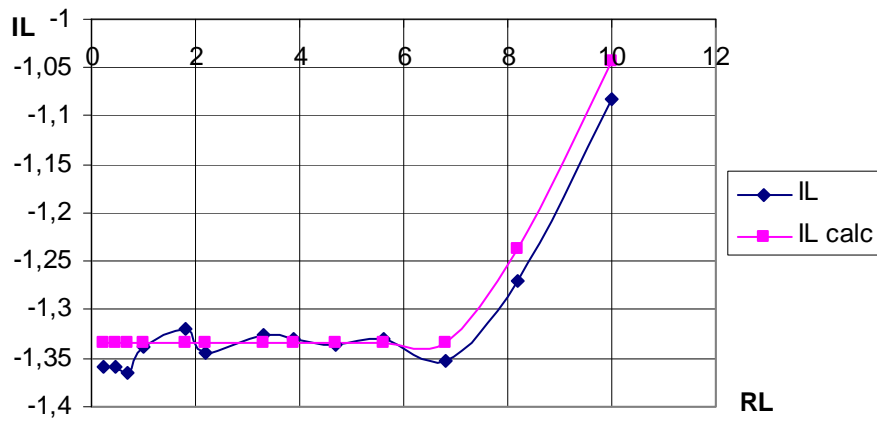
Il valore della tensione di saturazione risulta di  $-10V$  (valore che verrà usato nel calcolo di  $I_L$  in saturazione).

**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $V_i$ :**  $V_{iMAX} = 6,82V$  ;  $R = 1,5k\Omega$  :  $R_L = 2,2k\Omega$ .

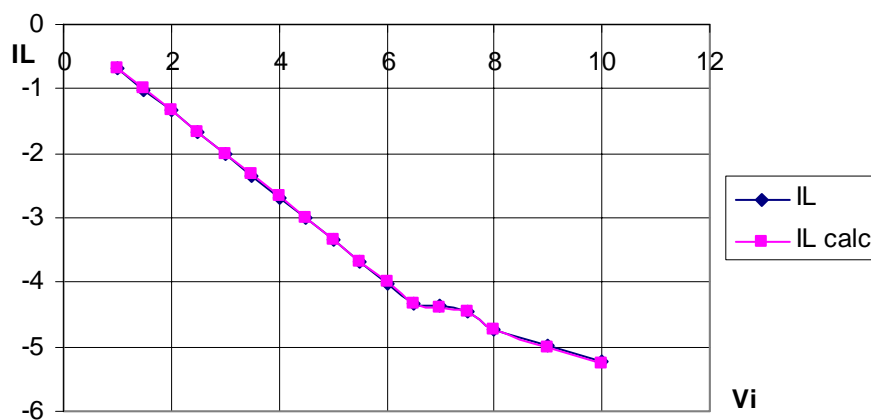
N	K $\Omega$	Volt			mA		Volt	mA
	$R_L$	$V_i$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$		$V_o$ calc	$I_L$ calc
1	2,2	1	-1,483	-1,480	-0,67		-1,47	-0,67
2	2,2	1,5	-2,225	-2,222	-1,01		-2,2	-1
3	2,2	2	-2,955	-2,952	-1,34		-2,93	-1,33
4	2,2	2,5	-3,699	-3,696	-1,68		-3,66	-1,67
5	2,2	3	-4,425	-4,423	-2,01		-4,4	-2
6	2,2	3,5	-5,167	-5,165	-2,35		-5,13	-2,33
7	2,2	4	-5,902	-5,900	-2,68		-5,87	-2,67
8	2,2	4,5	-6,633	-6,630	-3,01		-6,6	-3
9	2,2	5	-7,377	-7,374	-3,35		-7,33	-3,33
10	2,2	5,5	-8,104	-8,101	-3,68		-8,08	-3,67
11	2,2	6	-8,845	-8,841	-4,018		-8,8	-4
12	2,2	6,5	-9,452	-9,498	-4,32		-9,53	-4,33
13	2,2	7	-9,480	-9,695	-4,375		-9,97	-4,405
14	2,2	7,5	-9,483	-9,818	-4,463		-10,27	-4,46
15	2,2	8	-9,448	-10,389	-4,722		-11,73	-4,73
16	2,2	9	-9,365	-10,937	-4,97		-13,2	-5
17	2,2	10	-9,295	-11,491	-5,22		-15,6	-5,27

Il valore della tensione di saturazione risulta di  $-9,5V$  (valore che verrà usato nel calcolo di  $I_L$  in saturazione).

Si riportano i grafici di  $I_L$  e di  $I_L$  calcolata in funzione di  $R_L$  e in funzione di  $V_i$ .

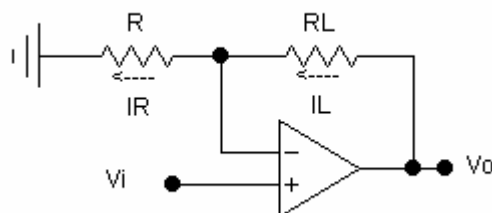


Il grafico evidenzia che la corrente si mantiene praticamente costante al variare di  $R_L$  fino al valore  $6,8k\Omega$ , oltre il quale l'uscita satura con conseguente variazione di  $I_L$ .



Il grafico evidenzia che la corrente dipende linearmente da  $V_i$  fino ad una tensione d'ingresso di circa  $6,8V$ . Oltre questo valore l'uscita satura e si perde la dipendenza da  $V_i$ .

### CONVERTITORE V/I NON INVERTENTE



#### Dimensionamento del circuito

Si fissa  $I_{LMAX} = 4mA$  e  $V_{iMAX} = 6V$  e si calcola  $R = \frac{V_{iMAX}}{I_{LMAX}} = \frac{6}{4 \cdot 10^{-3}} = 1,5k\Omega$ .

Assumendo  $V_{oSAT} = 10V$ , si calcola  $R'_L$  dalla funzione d'uscita nelle condizioni di saturazione:

$$V_{oSAT} = \left(1 + \frac{R'_L}{R}\right) \cdot V_{iMAX} \Rightarrow R'_L = \left(\frac{V_{oSAT}}{V_{iMAX}} - 1\right) \cdot R = \left(\frac{10}{6} - 1\right) \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 1k\Omega$$

- Verifica della indipendenza di  $I_L$  da  $R_L$ : si fissano  $V_i = 2V$  e  $R = 1,5k\Omega$ . La corrente  $I_L$  ha un valore sicuramente inferiore a  $I_{LMAX} = 4mA$  e la saturazione dell'uscita si avrà per un valore di  $R_L$  maggiore di  $R'_L$ :

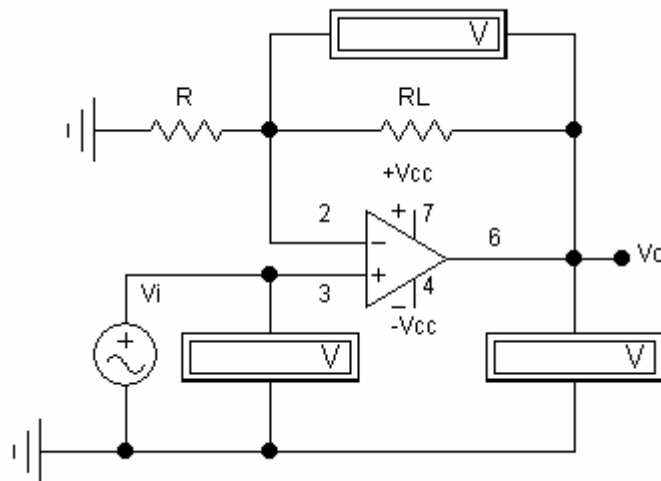
$$R_{LMAX} = \left(\frac{V_{oSAT}}{V_i} - 1\right) \cdot R = \left(\frac{10}{2} - 1\right) \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 6k\Omega$$

Si utilizzeranno i seguenti valori di  $R_L$ : 0,68K $\Omega$ ; 0,82K $\Omega$ ; 1K $\Omega$ ; 1,2K $\Omega$ ; 1,5K $\Omega$ ; 1,8K $\Omega$ ; 2,2K $\Omega$ ; 2,7K $\Omega$ ; 3,3K $\Omega$ ; 3,9K $\Omega$ ; 4,7K $\Omega$ ; 5,6K $\Omega$ ; 6,8K $\Omega$ ; 8,2K $\Omega$ ; 10K $\Omega$ .

- Verifica della dipendenza di  $I_L$  da  $V_i$ : si fissano  $R_L = 1k\Omega$  e  $R = 1,5k\Omega$ . Avendo scelto un valore commerciale di  $R_L$  uguale a  $R'_L$ , l'uscita saturerà quando la tensione d'ingresso assumerà il valore di 6V e la corrente  $I_{LMAX}$  risulterà di 4mA.

Per  $V_i$  si utilizzeranno i seguenti valori: 0,5V; 1V; 1,5V; 2V; 2,5V; 3V; 3,5V; 4V; 4,5V; 5V; 5,5V; 6V; 6,5V; 7V; 7,5V; 8V; 8,5V; 9V.

### Circuito di misura



Si misurano  $V_i$ ,  $V_o$ ,  $V_{RL}$ , e si calcola, con il valore misurato di  $V_{RL}$ , il valore di  $I_L$ , applicando la legge di Ohm ai capi di  $R_L$ :  $I_L = \frac{V_{RL}}{R_L}$ .

Nella tabella vengono riportati anche i valori calcolati di  $V_o$  e di  $I_L$ . Nei casi in cui l'uscita è satura, il valore calcolato di  $I_L$  è quello nelle condizioni di uscita satura, negli altri casi è quello imposto dalla resistenza  $R$  e dalla tensione d'ingresso.

Quando  $|V_o| < |V_{oSAT}|$ , la corrente è data da  $I_L = \frac{V_i}{R}$ .

Quando  $|V_o| = |V_{oSAT}|$ , la corrente  $I_L$  non è più funzione lineare di  $V_i$ . L'equipotenzialità degli ingressi si mantiene anche quando l'uscita satura. La corrente  $I_L$  si calcola applicando la legge di Ohm ai capi della resistenza  $R_L$ , che è sottoposta alla differenza di potenziale  $V_{oSAT} - V_i$ , si ha:

$I_L = \frac{V_{oSAT} - V_i}{R_L}$ . Poiché il valore della tensione di saturazione risulta anche sensibilmente diverso

da quello reale, come valore di saturazione si assumerà quello rilevato sperimentalmente; ciò consente di calcolare valori molto prossimi a quelli misurati. Inoltre, il valore di tensione di saturazione positiva risulta diverso da quella di saturazione negativa.

La tensione  $V_o$  si calcola dall'espressione  $V_o = \left(1 + \frac{R_L}{R}\right) \cdot V_i$

**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $R_L$ :  $V_i = 2V$ ;  $R = 1,5k\Omega$ ;  $R_{LMAX} = 6k\Omega$ .**

N	K $\Omega$		Volt			mA	
	$R_L$	$V_i$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$	$V_o$ calc	$I_L$ calc
1	0,68	2	2,928	0,923	1,357	2,907	1,333
2	0,82	2	3,091	1,086	1,324	3,093	1,333
3	1	2	3,336	1,331	1,331	3,333	1,333
4	1,2	2	3,586	1,582	1,318	3,6	1,333
5	1,5	2	3,981	1,977	1,318	4	1,333
6	1,8	2	4,370	2,364	1,313	4,4	1,333
7	2,2	2	4,949	2,944	1,338	4,93	1,333
8	2,7	2	5,579	3,574	1,324	5,6	1,333
9	3,3	2	6,370	4,366	1,323	6,4	1,333
10	3,9	2	7,179	5,174	1,327	7,2	1,333
11	4,7	2	8,373	6,268	1,334	8,27	1,333
12	5,6	2	9,431	7,427	1,326	9,47	1,333
13	6,8	2	10,990	8,986	1,321	11,066	1,333
14	8,2	2	11,036	9,031	1,101	12,93	1,097
15	10	2	11,086	9,082	0,9082	15,33	0,9

Il valore della tensione di saturazione risulta di 11V (valore che verrà usato nel calcolo di  $I_L$  in condizioni di saturazione).

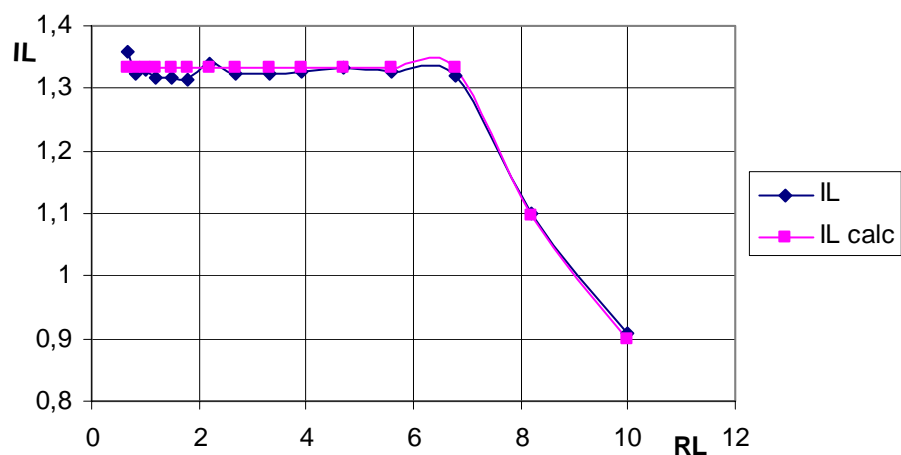
**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $V_i$ :  $V_{iMAX} = 6V$ ;  $R = 1,5k\Omega$ ;  $R_L = 1k\Omega$ .**

N	K $\Omega$		Volt			mA	
	$R_L$	$V_i$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$	$V_o$ calc	$I_L$ calc
1	1	0,5	0,835	0,331	0,331	0,833	0,333
2	1	1	1,672	0,666	0,666	1,667	0,667
3	1	1,5	2,504	0,999	0,999	2,5	1
4	1	2	3,334	1,331	1,331	3,333	1,333
5	1	2,5	4,176	1,668	1,668	4,167	1,667

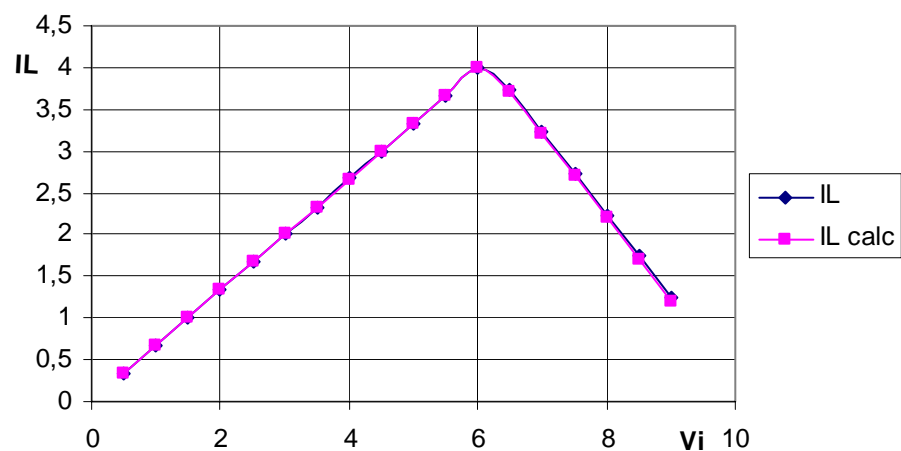
6	1	3	5,009	2,002	2,002		3	2
7	1	3,5	5,838	2,333	2,333		5,833	2,333
8	1	4	6,683	2,672	2,672		6,667	2,667
9	1	4,5	7,503	3,000	3,000		7,5	3
10	1	5	8,348	3,338	3,338		8,333	3,333
11	1	5,5	9,179	3,671	3,671		9,167	3,667
12	1	6	10,008	4,003	4,003		10	4
13	1	6,5	10,245	3,736	3,736		10,83	3,7
14	1	7	10,244	3,231	3,231		11,67	3,2
15	1	7,5	10,243	2,730	2,730		12,5	2,7
16	1	8	10,243	2,233	2,233		13,33	2,2
17	1	8,5	10,243	1,736	1,736		14,67	1,7
18	1	9	10,243	1,235	1,235		15	1,2

Il valore della tensione di saturazione risulta di 10,2V (valore che verrà usato nel calcolo di  $I_L$  in condizioni di saturazione).

Si riportano i grafici di  $I_L$  e di  $I_L$  calcolata in funzione di  $R_L$  e in funzione di  $V_i$ .



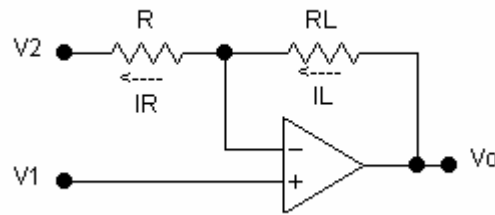
Il grafico evidenzia che la corrente si mantiene praticamente costante al variare di  $R_L$  fino al valore 6,8kΩ, oltre il quale l'uscita satura con conseguente variazione di  $I_L$ .



Il grafico evidenzia che la corrente dipende linearmente da  $V_i$  fino ad una tensione d'ingresso di circa 6V. Oltre questo valore l'uscita satura e si perde la dipendenza da  $V_i$ .



## CONVERTITTORE V/I DIFFERENZIALE



$$\text{Poiché } V_o = \frac{R_L}{R} \cdot V_d + V_1 \Rightarrow \begin{cases} V_d = \frac{R}{R_L} \cdot (V_o - V_1) \Rightarrow V_{d\text{MAX}} = \frac{R}{R_L} \cdot (V_{o\text{SAT}} - V_1) \\ R_L = \frac{V_o - V_1}{V_d} \cdot R \Rightarrow R_{L\text{MAX}} = \frac{V_{o\text{SAT}} - V_1}{V_d} \cdot R \end{cases}$$

In questa applicazione, i valori  $V_{d\text{MAX}}$  e  $R_{L\text{MAX}}$ , oltre che dipendere da  $V_{o\text{SAT}}$ , dipendono dal valore di  $V_1$ ; quindi, per uno stesso valore di  $V_1$ , dipendendo la tensione differenziale tra i due ingressi anche da  $V_2$ , l'uscita può risultare sia satura sia non satura. Per tale motivo nelle tabelle compare anche una colonna in cui si riporta il valore di  $V_{d\text{MAX}}$  calcolato dall'espressione sopra riportata.

Si fissa  $I_{L\text{MAX}} = 4\text{mA}$  e  $V_{d\text{MAX}} = 6\text{V}$  e si calcola  $R = \frac{V_{d\text{MAX}}}{I_{L\text{MAX}}} = \frac{6}{4 \cdot 10^{-3}} = 1,5\text{k}\Omega$ .

- Verifica della indipendenza di  $I_L$  da  $R_L$ : si fissano  $V_d = 2\text{V}$ ,  $V_1 = 1\text{V}$ ,  $V_2 = -1\text{V}$ ,  $V_{o\text{SAT}} = 10\text{V}$  e  $R = 1,5\text{k}\Omega$ . La corrente  $I_L$  ha un valore sicuramente inferiore a  $I_{L\text{MAX}} = 4\text{mA}$  e la saturazione dell'uscita si avrà per un valore di  $R_L$ :

$$R_{L\text{MAX}} = \frac{V_{o\text{SAT}} - V_1}{V_d} \cdot R = \frac{10 - 1}{2} \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 6,75\text{k}\Omega$$

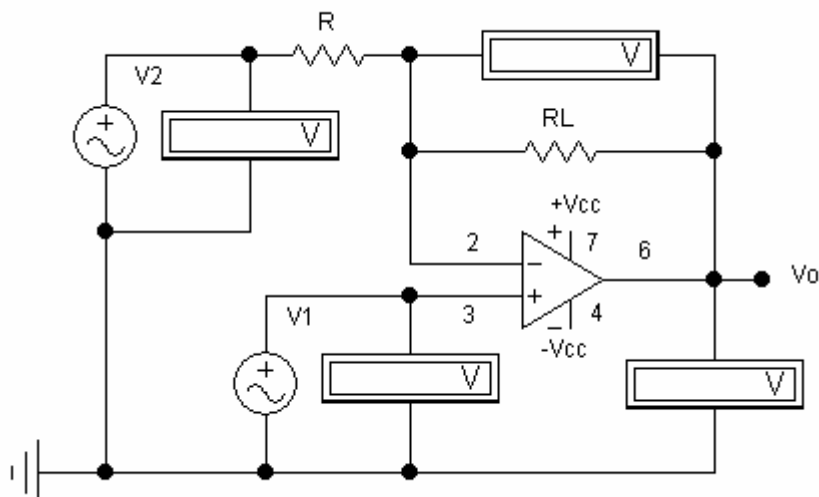
Si utilizzeranno i seguenti valori di  $R_L$ : 1,2K $\Omega$ ; 1,5K $\Omega$ ; 1,8K $\Omega$ ; 2,2K $\Omega$ ; 2,7K $\Omega$ ; 3,3K $\Omega$ ; 3,9K $\Omega$ ; 4,7K $\Omega$ ; 5,6K $\Omega$ ; 6,8K $\Omega$ ; 8,2K $\Omega$ .

- Verifica della dipendenza di  $I_L$  da  $V_d$ : si fissano  $R_L = 2,2\text{k}\Omega$  e  $R = 1,2\text{k}\Omega$ . Con tali valori si ha:

$$V_{d\text{MAX}} = R \cdot I_{L\text{MAX}} = 1,2 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 4,8\text{V}$$

Per  $V_1$  e  $V_2$  si utilizzeranno le seguenti coppie di valori: 1V e 0,5V (0,5V); 2V e 1V (1V); 3V e 1V (2V); 3V e 0,5V (2,5V); 2V e -1V (3V); 2V e -2V (4V); 3V e -1,5V (4,5V); 6V e 1V (5V); 6V e 0,5V (5,5V); 2V e 4V (-2V); 1V e 4V (-3V); -2V e 2V (-4V); -2V e 2,5V (-4,5V); -3V e 2,5V (-5,5V); -3V e 3V (-6V); -3,5V e 3V (-6,5V); -4V e 3V (-7V).

## Circuito di misura



Si misurano  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_o$ ,  $V_{RL}$ , e si calcola, con il valore misurato di  $V_{RL}$ , il valore di  $I_L$ , applicando la legge di Ohm ai capi di  $R_L$ :  $I_L = \frac{V_{RL}}{R_L}$ .

Nella tabella vengono riportati anche i valori calcolati di  $V_{dMAX}$ ,  $V_o$  e  $I_L$ . Nei casi in cui l'uscita è satura, il valore calcolato di  $I_L$  è quello nelle condizioni di uscita satura, negli altri casi è quello imposto dalla resistenza  $R$  e dalla tensione d'ingresso.

Quando  $|V_o| < |V_{oSAT}|$ , la corrente è data da  $I_L = \frac{V_d}{R}$ .

Quando  $|V_o| = |V_{oSAT}|$ , la corrente perde la sua dipendenza da  $V_d$ . La corrente  $I_L$  attraversa la serie  $R + R_L$  che è sottoposta alla differenza di potenziale  $V_2 - V_{oSAT}$ . Applicando la legge di Ohm ai capi della serie si ha:  $I_L = \frac{V_2 - V_{oSAT}}{R + R_L}$ , valore che dipende sia da  $V_{oSAT}$  sia da  $V_2$ .

Le tensioni  $V_o$  e  $V_{dMAX}$  si calcola da  $V_o = \frac{R_L}{R} \cdot V_d + V_1$  e  $V_{dMAX} = \frac{R}{R_L} \cdot (V_{oSAT} - V_1)$ .

**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $R_L$ :**  $V_d = 2V$ ;  $R = 1,5k\Omega$ ;  $R_{LMAX} = 6k\Omega$ .

N	K $\Omega$	Volt					mA	Volt			mA
	$R_L$	$V_1$	$V_2$	$V_d$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$	$V_{dMAX}$	$V_o$ calc	$I_L$ calc	
1	1,2	1	-1	2	2,588	1,594	1,328	11,25	2,6	1,333	
2	1,5	1	-1	2	2,984	1,989	1,326	9	3	1,333	
3	1,8	1	-1	2	3,371	2,375	1,319	7,5	3,4	1,333	
4	2,2	1	-1	2	3,947	2,953	1,342	6,14	3,93	1,333	
5	2,7	1	-1	2	4,579	3,584	1,327	5	4,6	1,333	
6	3,3	1	-1	2	5,374	4,379	1,327	4,091	5,4	1,333	
7	3,9	1	-1	2	6,180	5,185	1,329	3,46	6,2	1,333	
8	4,7	1	-1	2	7,278	6,283	1,337	2,87	7,27	1,333	
9	5,6	1	-1	2	8,434	7,439	1,328	2,41	8,47	1,333	
10	6,8	1	-1	2	10,177	9,182	1,350	1,985	10,07	1,333	
11	8,2	1	-1	2	11,013	10,142	1,237	1,65	11,93	1,237	

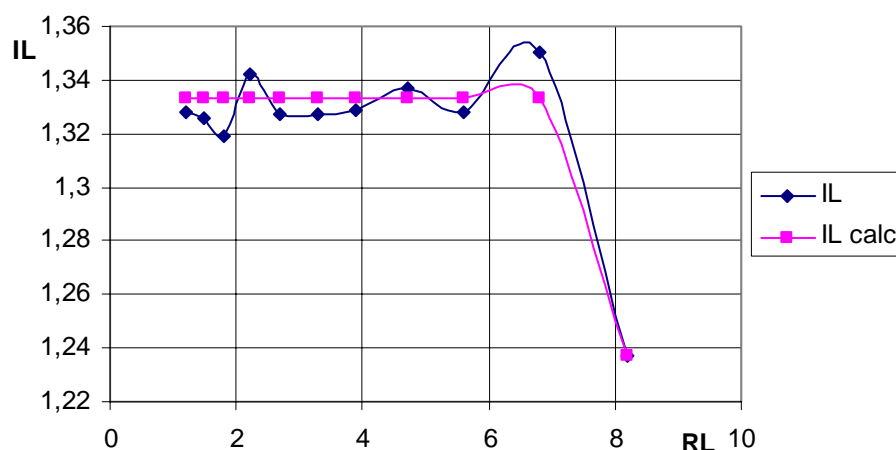
Il valore della tensione di saturazione risulta di 11V (valore che verrà usato nel calcolo di  $I_L$  in condizioni di saturazione).

**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $V_d$ :  $R = 1,2k\Omega$  :  $R_L = 2,2k\Omega$ .**

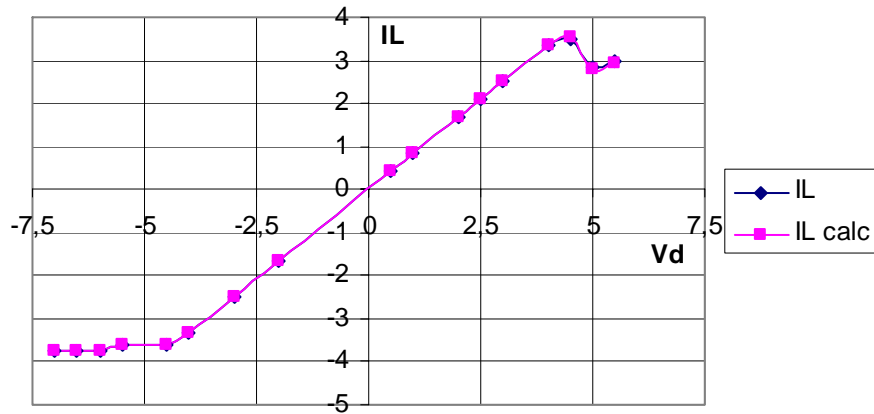
N	K $\Omega$	Volt					mA	Volt			mA
	$R_L$	$V_1$	$V_2$	$V_d$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$	$V_{dMAX}$	$V_o$ calc	$I_L$ calc	
1	2,2	1	0,5	0,5	1,921	0,926	0,420	4,91	1,92	0,42	
2	2,2	2	1	1	3,826	1,834	0,834	4,36	3,83	0,83	
3	2,2	3	1	2	6,677	3,680	1,67	3,82	6,67	1,668	
4	2,2	3	0,5	2,5	7,596	4,600	2,091	3,82	7,58	2,08	
5	2,2	2	-1	3	7,516	5,524	2,51	4,36	7,5	2,5	
6	2,2	2	-2	4	9,347	7,356	3,34	4,36	9,33	3,33	
7	2,2	3	-1,5	4,5	10,411	7,723	3,51	3,82	11,25	3,529	
8	2,2	6	1	5	10,590	6,215	2,825	2,18	15,17	2,794	
9	2,2	6	0,5	5,5	10,554	6,514	2,961	2,18	16,08	2,941	
10	2,2	2	4	-2	-1,684	-3,679	-1,67	4,36	-1,67	-1,67	
11	2,2	1	4	-3	-4,508	-5,506	-2,50	4,91	-4,5	-2,5	
12	2,2	-2	2	-4	-9,370	-7,360	-3,345	-4,60	-9,33	-3,33	
13	2,2	-2	2,5	-4,5	-9,709	-7,905	-3,59	-4,60	-10,25	-3,59	
14	2,2	-3	2,5	-5,5	-9,758	-7,937	-3,61	-3,82	-13,08	-3,59	
15	2,2	-3	3	-6	-9,714	-8,237	-3,74	-3,82	-14	-3,74	
16	2,2	-3,5	3	-6,5	-9,714	-8,232	-3,74	-3,54	-15,42	-3,74	
17	2,2	-4	3	-7	-9,714	-8,232	-3,74	-3,27	-16,03	-3,74	

Il valore delle tensioni di saturazione sono +10,5V e -9,7V (valori che verranno usati nel calcolo di  $I_L$  in condizioni di saturazione).

Si riportano i grafici di  $I_L$  e di  $I_L$  calcolata in funzione di  $R_L$  e in funzione di  $V_d$ .



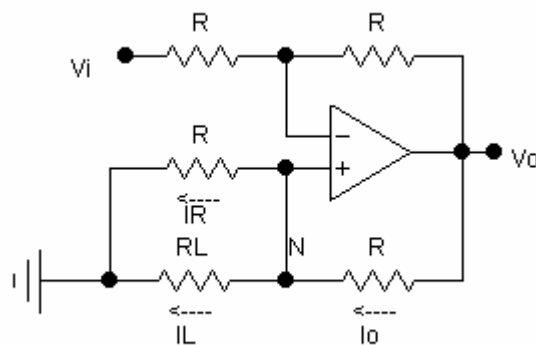
Il grafico evidenzia che la corrente si mantiene praticamente costante al variare di  $R_L$  fino al valore 6,8K $\Omega$ , oltre il quale l'uscita satura con conseguente variazione di  $I_L$ .



Il grafico evidenzia che la corrente dipende linearmente da  $V_d$  fino ad una tensione differenziale d'ingresso di circa  $\pm 4,5V$ , cui corrisponde una corrente di circa  $\pm 3,5mA$ . Oltre questo valore l'uscita satura e si perde la dipendenza da  $V_i$ .

## CONVERTITORE V/I CON CARICO COLLEGATO A MASSA

### CONVERTITORE V/I INVERTENTE



#### Dimensionamento del circuito

Si fissa  $I_{LMAX} = 4mA$  e  $V_{iMAX} = 5V$  e si calcola  $R = \frac{V_{iMAX}}{I_{LMAX}} = \frac{5}{4 \cdot 10^{-3}} = 1,25k\Omega \rightarrow R = 1,2k\Omega$ .

Assumendo  $V_{oSAT} = 10V$ , si calcola  $R'_L$  dalla funzione d'uscita nelle condizioni di saturazione:

$$-V_{oSAT} = -\left(1 + \frac{2R'_L}{R}\right) \cdot V_{iMAX} \Rightarrow R'_L = \left(\frac{V_{oSAT}}{V_{iMAX}} - 1\right) \cdot \frac{R}{2} = \left(\frac{10}{5} - 1\right) \cdot \frac{1,2 \cdot 10^3}{2} = 0,6k\Omega$$

- Verifica della indipendenza di  $I_L$  da  $R_L$ : si fissano  $V_i = 2V$  e  $R = 1,2k\Omega$ . La corrente  $I_L$  ha un valore sicuramente inferiore a  $I_{LMAX} = 4mA$  e la saturazione dell'uscita si avrà per un valore di  $R_L$  maggiore di  $R'_L$ :

$$R_{LMAX} = \left( \frac{V_{oSAT}}{V_i} - 1 \right) \cdot \frac{R}{2} = \left( \frac{10}{2} - 1 \right) \cdot \frac{1,2 \cdot 10^3}{2} = 2,4k\Omega$$

Si utilizzeranno i seguenti valori di  $R_L$ : 0,47K $\Omega$ ; 0,68K $\Omega$ ; 0,82K $\Omega$ ; 1K $\Omega$ ; 1,2K $\Omega$ ; 1,5K $\Omega$ ; 1,8K $\Omega$ ; 2,2K $\Omega$ ; 2,7K $\Omega$ ; 3,3K $\Omega$ ; 4,7K $\Omega$ .

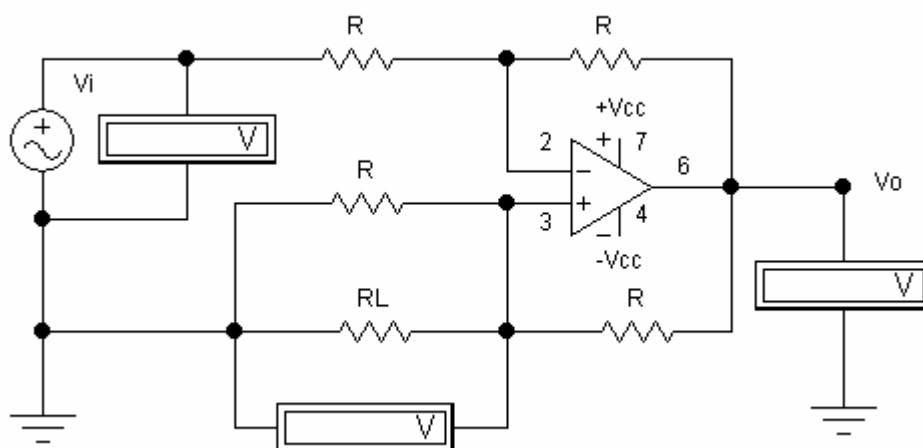
- Verifica della dipendenza di  $I_L$  da  $V_i$ : si fissano  $R_L = 1,2k\Omega$  e  $R = 1,2k\Omega$ . L'uscita saturerà per:

$$-V_{oSAT} = -\frac{R + 2R_L}{R} \cdot V_{iMAX} \Rightarrow V_{iMAX} = \frac{R}{R + 2R_L} \cdot V_{oSAT} = \frac{1,2 \cdot 10^3}{1,2 \cdot 10^3 + 2 \cdot 1,2 \cdot 10^3} \cdot 10 = 3,33V$$

Cui corrisponde una corrente  $I_{LMAX} = \frac{V_{iMAX}}{R} = \frac{3,33}{1,2 \cdot 10^3} = 2,775mA$ .

Per  $V_i$  si utilizzeranno i seguenti valori: 0,3V; 0,5V; 0,8V; 1V; 1,3V; 1,5V; 1,8V; 2V; 2,3V; 2,5V; 2,8V; 3V; 3,3V; 3,5V; 3,8V; 4V; 4,3V; 4,5V.

### Circuito di misura



Si misurano  $V_i$ ,  $V_o$ ,  $V_{RL}$ , e si calcola, con il valore misurato di  $V_{RL}$ , il valore di  $I_L$ , applicando la legge di Ohm ai capi di  $R_L$ :  $I_L = \frac{V_{RL}}{R_L}$ .

Nella tabella vengono riportati anche i valori calcolati di  $V_o$  e di  $I_L$ . Nei casi in cui l'uscita è saturata, il valore calcolato di  $I_L$  è quello nelle condizioni di uscita saturata, negli altri casi è quello imposto dalla resistenza  $R$  e dalla tensione d'ingresso.

Quando  $|V_o| < |V_{oSAT}|$ , la corrente è data da  $I_L = \frac{V_i}{R}$ .

Quando  $|V_o| = |V_{oSAT}|$ , la corrente  $I_L$  non è più funzione lineare di  $V_i$ . La corrente  $I_L$  si calcola applicando la legge di Ohm ai capi della resistenza  $R_L$ , che è sottoposta alla differenza di potenziale  $V_{oSAT}$  che si ripartisce ai capi del parallelo  $R//R_L$ , si ha:

$$I_L = \frac{V_{RL}}{R_L} = \frac{R // R_L}{R + R // R_L} \cdot V_{oSAT} \cdot \frac{1}{R_L} = \frac{R_L}{R + 2R_L} \cdot V_{oSAT} \cdot \frac{1}{R_L} = \frac{V_{oSAT}}{R + 2R_L}$$

Poiché il valore della tensione di saturazione risulta anche sensibilmente diverso da quello reale, come valore di saturazione si assumerà quello rilevato sperimentalmente; ciò consente di calcolare valori molto prossimi a quelli misurati. Inoltre, il valore di tensione di saturazione positiva risulta diverso da quella di saturazione negativa.

La tensione  $V_o$  si calcola dall'espressione  $V_o = -\left(1 + \frac{2R_L}{R}\right) \cdot V_i$

**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $R_L$ :**  $V_i = 2V$  ;  $R = 1,2k\Omega$  :  $R_{LMAX} = 2,4k\Omega$ .

N	K $\Omega$	Volt			mA	Volt		mA
	$R_L$	$V_i$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$	$V_o$ calc	$I_L$ calc	
1	0,47	2	-3,518	-0,776	-1,65	-3,567	-1,67	
2	0,68	2	-4,247	-1,143	-1,68	-4,267	-1,67	
3	0,82	2	-4,647	-1,343	-1,64	-4,733	-1,67	
4	1	2	-5,245	-1,643	-1,643	-5,33	-1,67	
5	1,2	2	-5,852	-1,947	-1,62	-6	-1,67	
6	1,5	2	-6,805	-2,427	-1,618	-7	-1,67	
7	1,8	2	-8,333	-2,947	-1,64	-8	-1,67	
8	2,2	2	-8,284	-3,259	-1,48	-9,33	-1,48	
9	2,7	2	-8,334	-3,407	-1,262	-11	-1,26	
10	3,3	2	-8,370	-3,539	-1,072	-13	-1,064	
11	4,7	2	-8,418	-3,734	-0,794	-17,67	-0,783	

Il valore della tensione di saturazione risulta di  $-8,3V$  (valore che verrà usato nel calcolo di  $I_L$  in condizioni di saturazione). Tale valore risulta sensibilmente inferiore a quello preventivato di  $-10V$ .

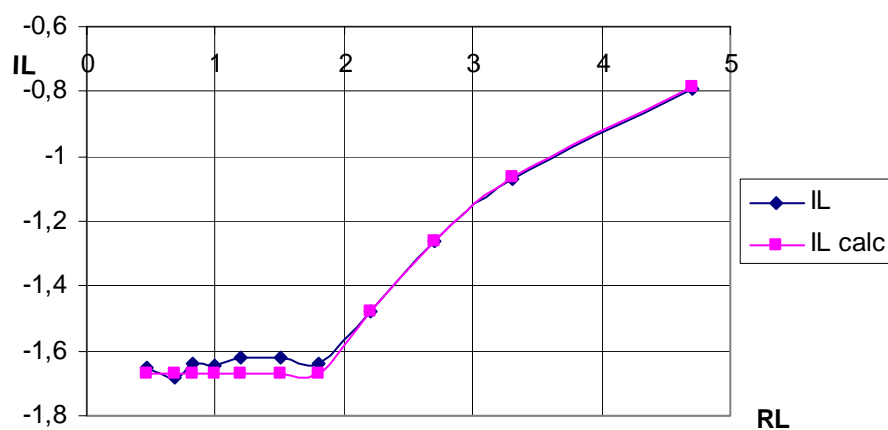
**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $V_i$ :**  $R = 1,2k\Omega$  :  $R_L = 2,2k\Omega$ .

N	K $\Omega$	Volt			mA	Volt		mA
	$R_L$	$V_i$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$	$V_o$ calc	$I_L$ calc	
1	1,2	0,3	-0,911	-0,312	-0,26	-0,9	-0,25	
2	1,2	0,5	-1,505	-0,510	-0,425	-1,5	-0,42	
3	1,2	0,8	-2,383	-0,803	-0,669	-2,4	-0,67	
4	1,2	1	-2,917	-1,002	-0,835	-3	-0,833	
5	1,2	1,3	-3,870	-1,300	-1,083	-3,9	-1,083	
6	1,2	1,5	-4,458	-1,497	-1,2475	-4,5	-1,25	
7	1,2	1,8	-5,348	-1,795	-1,496	-5,4	-1,5	
8	1,2	2	-5,950	-1,996	-1,663	-6	-1,67	

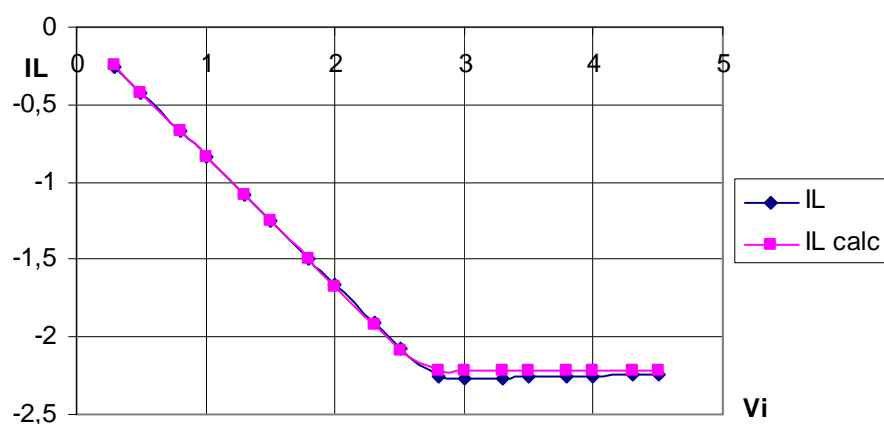
9	1,2	2,3	-6,832	-2,291	-1,909		-6,9	-1,917
10	1,2	2,5	-7,420	-2,488	-2,073		-7,5	-2,083
11	1,2	2,8	-8,089	-2,712	-2,26		-8,4	-2,22
12	1,2	3	-8,104	-2,717	-2,264		-9	-2,22
13	1,2	3,3	-8,097	-2,715	-2,2625		-9,9	-2,22
14	1,2	3,5	-8,087	-2,711	-2,259		-10,5	-2,22
15	1,2	3,8	-8,068	-2,705	-2,254		-11,4	-2,22
16	1,2	4	-8,052	-2,700	-2,25		-12	-2,22
17	1,2	4,3	-8,029	-2,692	-2,243		-12,9	-2,22
18	1,2	4,5	-8,012	-2,686	-2,238		-13,5	-2,22

Il valore della tensione di saturazione risulta di  $-8\text{V}$  (valore che verrà usato nel calcolo di  $I_L$  in condizioni di saturazione). Tale valore risulta sensibilmente inferiore a quello preventivato di  $-10\text{V}$ .

Si riportano i grafici di  $I_L$  e di  $I_L$  calcolata in funzione di  $R_L$  e in funzione di  $V_i$ .

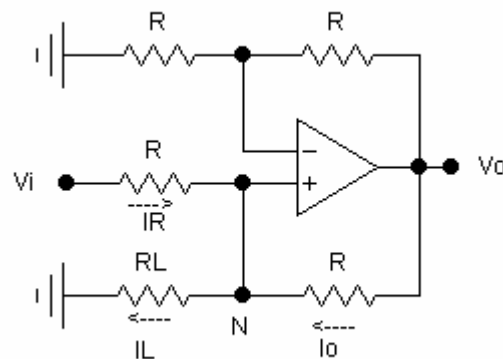


Il grafico evidenzia che la corrente si mantiene praticamente costante al variare di  $R_L$  fino al valore  $1,8\text{k}\Omega$ , oltre il quale l'uscita satura con conseguente variazione di  $I_L$ .



Il grafico evidenzia che la corrente dipende linearmente da  $V_i$  fino ad una tensione d'ingresso di circa  $2,8\text{V}$ . Oltre questo valore l'uscita satura e si perde la dipendenza da  $V_i$ .

## CONVERTITORE V/I NON INVERTENTE



### Dimensionamento del circuito

Si fissa  $I_{LMAX} = 4\text{mA}$  e  $V_{iMAX} = 6\text{V}$  e si calcola  $R = \frac{V_{dMAX}}{I_{LMAX}} = \frac{6}{4 \cdot 10^{-3}} = 1,5\text{k}\Omega$ .

Assumendo  $V_{oSAT} = 10\text{V}$ , si calcola  $R'_L$  dalla funzione d'uscita nelle condizioni di saturazione:

$$V_{oSAT} = \frac{2R'_L}{R} \cdot V_{iMAX} \Rightarrow R'_L = \frac{V_{oSAT}}{V_{iMAX}} \cdot \frac{R}{2} = \frac{10}{6} \cdot \frac{1,5 \cdot 10^3}{2} = 1,25\text{k}\Omega$$

- Verifica della indipendenza di  $I_L$  da  $R_L$ : si fissano  $V_i = 2\text{V}$  e  $R = 1,5\text{k}\Omega$ . La corrente  $I_L$  ha un valore sicuramente inferiore a  $I_{LMAX} = 4\text{mA}$  e la saturazione dell'uscita si avrà per un valore di  $R_L$  maggiore di  $R'_L$ :

$$R_{LMAX} = \frac{V_{oSAT}}{V_i} \cdot \frac{R}{2} = \frac{10}{2} \cdot \frac{1,5 \cdot 10^3}{2} = 3,75\text{k}\Omega$$

Si utilizzeranno i seguenti valori di  $R_L$ : 0,22K $\Omega$ ; 0,47K $\Omega$ ; 0,68K $\Omega$ ; 1K $\Omega$ ; 1,2K $\Omega$ ; 1,5K $\Omega$ ; 1,8K $\Omega$ ; 2,2K $\Omega$ ; 2,7K $\Omega$ ; 3,3K $\Omega$ ; 3,9K $\Omega$ ; 4,7K $\Omega$ ; 5,6K $\Omega$ .

- Verifica della dipendenza di  $I_L$  da  $V_i$ : si fissano  $R_L = 1,5\text{k}\Omega$  e  $R = 1,5\text{k}\Omega$ . L'uscita saturerà per:

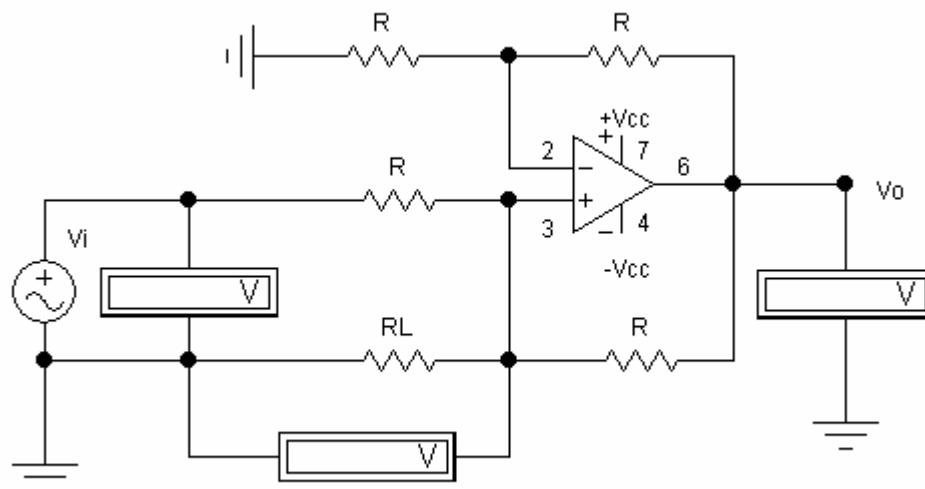
$$V_{oSAT} = \frac{2R_L}{R} \cdot V_{iMAX} \Rightarrow V_{iMAX} = \frac{R}{2R_L} \cdot V_{oSAT} = \frac{1,5 \cdot 10^3}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^3} \cdot 10 = 5\text{V}$$

Cui corrisponde una corrente  $I_{LMAX} = \frac{V_{iMAX}}{R} = \frac{5}{1,5 \cdot 10^3} = 3,33\text{mA}$ .

Per  $V_i$  si utilizzeranno i seguenti valori: 0,5V; 1V; 1,5V; 2V; 2,5V; 3V; 3,5V; 4V; 4,5V; 5V; 5,5V; 6V; 6,5V; 7V; 7,5V.



## Circuito di misura



Si misurano  $V_i$ ,  $V_o$ ,  $V_{RL}$ , e si calcola, con il valore misurato di  $V_{RL}$ , il valore di  $I_L$ , applicando la legge di Ohm ai capi di  $R_L$ :  $I_L = \frac{V_{RL}}{R_L}$ .

Nella tabella vengono riportati anche i valori calcolati di  $V_o$  e di  $I_L$ . Nei casi in cui l'uscita è satura, il valore calcolato di  $I_L$  è quello nelle condizioni di uscita satura, negli altri casi è quello imposto dalla resistenza  $R$  e dalla tensione d'ingresso.

Quando  $|V_o| < |V_{oSAT}|$ , la corrente è data da  $I_L = \frac{V_i}{R}$ .

Quando  $|V_o| = |V_{oSAT}|$ , la corrente  $I_L$  non è più funzione lineare di  $V_i$ . La corrente  $I_L$  si calcola applicando la legge di Ohm ai capi della resistenza  $R_L$ . La differenza di potenziale ai capi di  $R_L$  dipende sia dalla tensione  $V_{oSAT}$  sia dalla tensione  $V_i$ . Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, si ha:

$$V_{RL} = \frac{R // R_L}{R + R // R_L} V_i + \frac{R // R_L}{R + R // R_L} V_{oSAT} = \frac{R_L}{R + 2R_L} V_i + \frac{R_L}{R + 2R_L} V_{oSAT} = \frac{R_L}{R + 2R_L} (V_{oSAT} + V_i)$$

Pertanto

$$I_L = \frac{V_{RL}}{R_L} = \frac{R_L}{R + 2R_L} (V_{oSAT} + V_i) \cdot \frac{1}{R_L} = \frac{V_{oSAT} + V_i}{R + 2R_L}$$

Poiché il valore della tensione di saturazione risulta anche sensibilmente diverso da quello reale, come valore di saturazione si assumerà quello rilevato sperimentalmente; ciò consente di calcolare valori molto prossimi a quelli misurati. Inoltre, il valore di tensione di saturazione positiva risulta diverso da quella di saturazione negativa.

La tensione  $V_o$  si calcola dall'espressione  $V_o = \frac{2R_L}{R} \cdot V_i$

**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $R_L$ :  $V_i = 2V$ ;  $R = 1,5k\Omega$ ;  $R_{LMAX} = 3,75k\Omega$ .**

N	K $\Omega$	Volt			mA	Volt		mA
	$R_L$	$V_i$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$	$V_o$ calc	$I_L$ calc	
1	0,22	2	0,596	0,298	1,354	0,587	1,33	
2	0,47	2	1,225	0,627	1,334	1,253	1,33	
3	0,68	2	1,860	0,930	1,368	1,813	1,33	
4	1	2	2,684	1,342	1,342	2,67	1,33	
5	1,2	2	3,264	1,633	1,361	3,2	1,33	
6	1,5	2	3,985	1,993	1,329	4	1,33	
7	1,8	2	4,750	2,375	1,319	4,8	1,33	
8	2,2	2	5,915	2,959	1,345	5,867	1,33	
9	2,7	2	7,181	3,592	1,33	7,2	1,33	
10	3,3	2	8,753	4,378	1,327	8,8	1,33	
11	3,9	2	9,639	4,880	1,25	10,4	1,258	
12	4,7	2	9,660	5,030	1,07	12,53	1,073	
13	5,6	2	9,676	5,146	0,919	14,93	0,921	

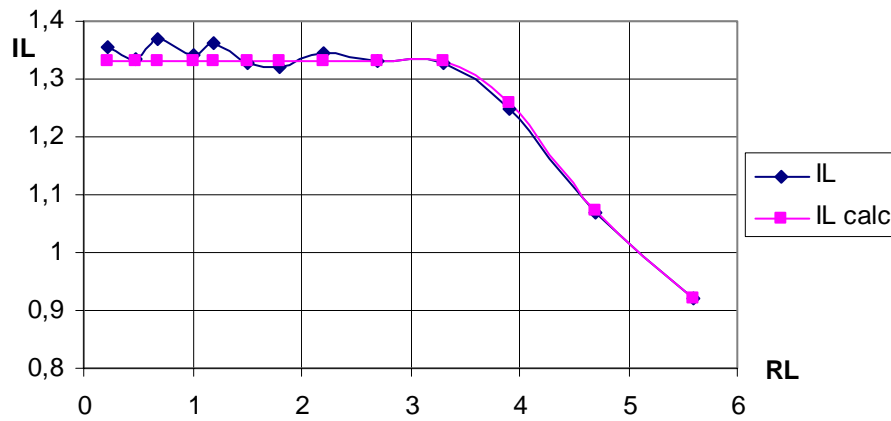
Il valore della tensione di saturazione risulta di 9,7V (valore che verrà usato nel calcolo di  $I_L$  in condizioni di saturazione).

**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $V_i$ :  $R = 1,5k\Omega$ ;  $R_L = 1,5k\Omega$ .**

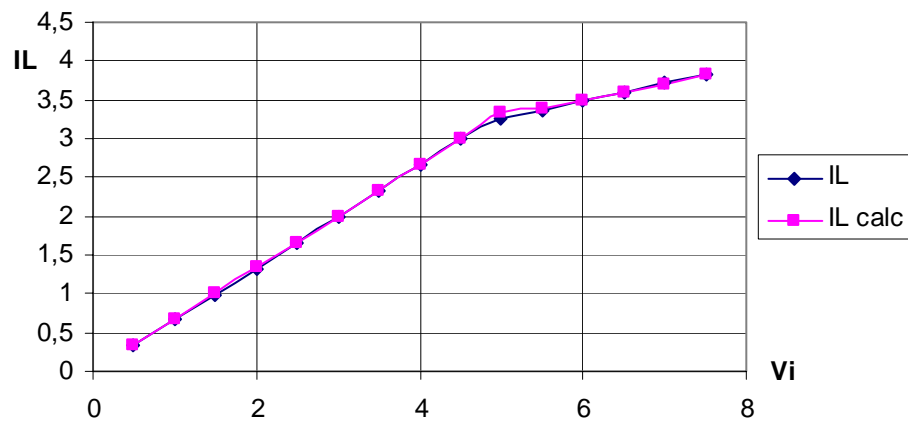
N	K $\Omega$	Volt			mA	Volt		mA
	$R_L$	$V_i$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$	$V_o$ calc	$I_L$ calc	
1	1,5	0,5	0,982	0,492	0,328	1	0,333	
2	1,5	1	1,984	0,992	0,661	2	0,667	
3	1,5	1,5	2,981	1,491	0,994	3	1	
4	1,5	2	3,983	1,992	1,328	4	1,333	
5	1,5	2,5	4,988	2,495	1,663	5	1,667	
6	1,5	3	5,981	2,991	1,994	6	2	
7	1,5	3,5	6,985	3,493	2,328	7	2,333	
8	1,5	4	7,981	3,992	2,661	8	2,667	
9	1,5	4,5	8,979	4,491	2,994	9	3	
10	1,5	5	9,641	4,879	3,253	10	3,333	
11	1,5	5,5	9,664	5,053	3,369	11	3,378	
12	1,5	6	9,688	5,228	3,485	12	3,488	
13	1,5	6,5	9,711	5,402	3,601	13	3,6	
14	1,5	7	9,735	5,578	3,719	14	3,711	
15	1,5	7,5	9,758	5,751	3,834	15	3,82	

Il valore della tensione di saturazione risulta di 11V (valore che verrà usato nel calcolo di  $I_L$  in condizioni di saturazione).

Si riportano i grafici di  $I_L$  e di  $I_L$  calcolata in funzione di  $R_L$  e in funzione di  $V_i$ .

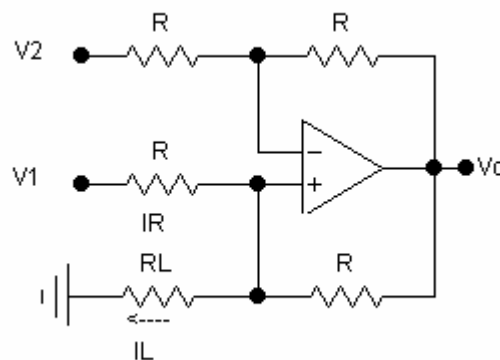


Il grafico evidenzia che la corrente si mantiene praticamente costante al variare di  $R_L$  fino al valore  $3,3K\Omega$ , oltre il quale l'uscita satura con conseguente variazione di  $I_L$ .



Il grafico evidenzia che la corrente dipende linearmente da  $V_i$  fino ad una tensione d'ingresso di circa 5V. Oltre questo valore l'uscita satura e si perde la dipendenza da  $V_i$ .

### CONVERTITORE V/I DIFFERENZIALE



$$\text{Poiché } V_o = \frac{2R_L}{R} \cdot V_d - V_2 \Rightarrow \begin{cases} V_d = \frac{R}{2R_L} \cdot (V_o + V_2) \Rightarrow V_{dMAX} = \frac{R}{2R_L} \cdot (V_{oSAT} + V_2) \\ R_L = \frac{V_o + V_2}{V_d} \cdot \frac{R}{2} \Rightarrow R_{LMAX} = \frac{V_{oSAT} + V_2}{V_d} \cdot \frac{R}{2} \end{cases}$$

In questa applicazione, i valori  $V_{dMAX}$  e  $R_{LMAX}$ , oltre che dipendere da  $V_{oSAT}$ , dipendono dal valore di  $V_2$ ; quindi, per uno stesso valore di  $V_2$ , dipendendo la tensione differenziale tra i due ingressi anche da  $V_1$ , l'uscita può risultare sia satura sia non satura. Per tale motivo nelle tabelle compare anche una colonna in cui si riporta il valore di  $V_{dMAX}$  calcolato dall'espressione sopra riportata.

$$\text{Si fissa } I_{LMAX} = 4\text{mA} \text{ e } V_{dMAX} = 5\text{V} \text{ e si calcola } R = \frac{V_{dMAX}}{I_{LMAX}} = \frac{5}{4 \cdot 10^{-3}} = 1,25\text{k}\Omega \rightarrow R = 1,2\text{k}\Omega.$$

- Verifica della indipendenza di  $I_L$  da  $R_L$ : si fissano  $V_d = 2\text{V}$ ,  $V_1 = 1\text{V}$ ,  $V_2 = -1\text{V}$ ,  $V_{oSAT} = 10\text{V}$  e  $R = 1,2\text{k}\Omega$ . La corrente  $I_L$  ha un valore sicuramente inferiore a  $I_{LMAX} = 4\text{mA}$  e la saturazione dell'uscita si avrà per un valore di  $R_L$ :

$$R_{LMAX} = \frac{V_{oSAT} + V_2}{V_d} \cdot \frac{R}{2} = \frac{10 - 1}{2} \cdot \frac{1,2 \cdot 10^3}{2} = 2,7\text{k}\Omega$$

Si utilizzeranno i seguenti valori di  $R_L$ : 0,22K $\Omega$ ; 0,33K $\Omega$ ; 0,47K $\Omega$ ; 0,56K $\Omega$ ; 0,68K $\Omega$ ; 0,82K $\Omega$ ; 1K $\Omega$ ; 1,2K $\Omega$ ; 1,5K $\Omega$ ; 1,8K $\Omega$ ; 2,2K $\Omega$ ; 2,7K $\Omega$ ; 3,3K $\Omega$ ; 3,9K $\Omega$ ; 4,7K $\Omega$ .

- Verifica della dipendenza di  $I_L$  da  $V_d$ : si fissano  $R_L = 1,2\text{k}\Omega$  e  $R = 1,2\text{k}\Omega$ .

Per  $V_1$  e  $V_2$  si utilizzeranno le seguenti coppie di valori: -3V e 1V (-4V); 4V e 1V (3V);

-4V e 1,5V (-5,5V); -1V e 2V (-3V);

2V e 4V (-2V); 3V e -1V (4V);

-3V e -2V (-1V); 2V e -2,5V (4,5V);

3V e -3V (6V); -2V e -3,5V (1,5V);

-2V e -4V (2V); 2V e 2V (0V);

5V e 3V (2V); 2V e 4V (-2V);

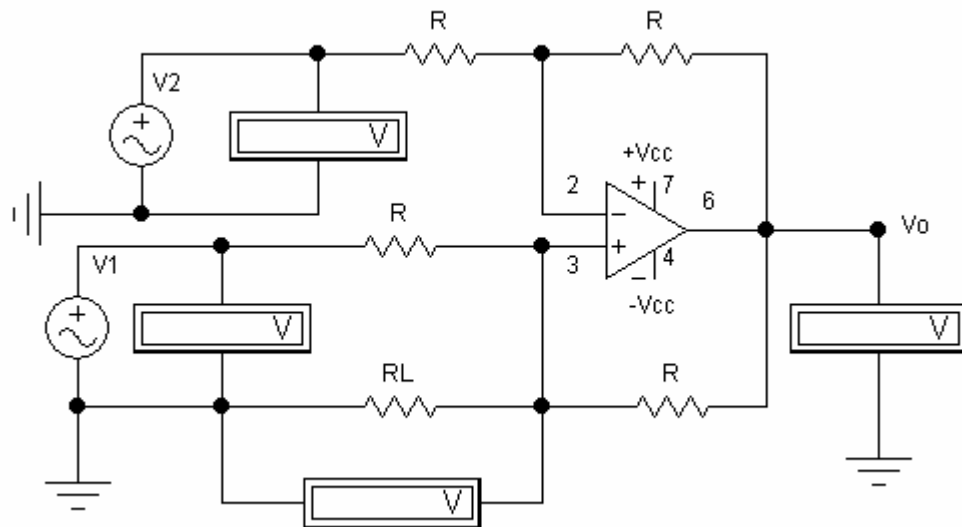
-6V e -2V (-4V); -2V e -3V (1V);

-2V e -4V (2V); 5V e 1V (4V);

-4V e -0,5V (-3,5V); 1V e 2,5V (-1,5V);

6,5V e 3,5V (3V); 3,5V e -1,5V (5V).

## Circuito di misura



Si misurano  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_o$ ,  $V_{RL}$ , e si calcola, con il valore misurato di  $V_{RL}$ , il valore di  $I_L$ , applicando la legge di Ohm ai capi di  $R_L$ :  $I_L = \frac{V_{RL}}{R_L}$ .

Nella tabella vengono riportati anche i valori calcolati di  $V_{dMAX}$ ,  $V_o$  e  $I_L$ . Nei casi in cui l'uscita è satura, il valore calcolato di  $I_L$  è quello nelle condizioni di uscita satura, negli altri casi è quello imposto dalla resistenza  $R$  e dalla tensione d'ingresso.

Quando  $|V_o| < |V_{oSAT}|$ , la corrente è data da  $I_L = \frac{V_d}{R}$ .

Quando  $|V_o| = |V_{oSAT}|$ , la corrente  $I_L$  non è più funzione lineare di  $V_i$ . La corrente  $I_L$  si calcola applicando la legge di Ohm ai capi della resistenza  $R_L$ . La differenza di potenziale ai capi di  $R_L$  dipende sia dalla tensione  $V_{oSAT}$  sia dalla tensione  $V_1$ . Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, si ha:

$$V_{RL} = \frac{V_1 \cdot R // R_L}{R + R // R_L} + \frac{\pm V_{oSAT} \cdot R // R_L}{R + R // R_L} = \frac{V_1 \cdot R_L}{R + 2R_L} + \frac{\pm V_{oSAT} \cdot R_L}{R + 2R_L} = \frac{R_L}{R + 2R_L} (\pm V_{oSAT} + V_1)$$

Pertanto 
$$I_L = \frac{V_{RL}}{R_L} = \frac{R_L}{R + 2R_L} (\pm V_{oSAT} + V_1) \cdot \frac{1}{R_L} = \frac{\pm V_{oSAT} + V_1}{R + 2R_L}$$

Poiché il valore della tensione di saturazione risulta anche sensibilmente diverso da quello reale, come valore di saturazione si assumerà quello rilevato sperimentalmente; ciò consente di calcolare valori molto prossimi a quelli misurati. Inoltre, il valore di tensione di saturazione positiva risulta diverso da quella di saturazione negativa.

Le tensioni  $V_o$  e  $V_{dMAX}$  si calcola da  $V_o = \frac{2R_L}{R} \cdot V_d - V_2$  e  $V_{dMAX} = \frac{R}{2R_L} \cdot (\pm V_{oSAT} + V_2)$ .

**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $R_L$ :  $V_d = 2V$ ;  $R = 1,2k\Omega$ ;  $R_{LMAX} = 2,7k\Omega$ .**

N	K $\Omega$	Volt					mA	Volt			mA
	$R_L$	$V_1$	$V_2$	$V_d$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$	$V_{dMAX}$	$V_o$ calc	$I_L$ calc	
1	0,22	1	-1	2	1,576	0,370	1,682	22,1	1,733	1,67	
2	0,33	1	-1	2	2,112	0,548	1,661	14,73	2,100	1,67	
3	0,47	1	-1	2	2,581	0,782	1,664	10,34	2,567	1,67	
4	0,56	1	-1	2	2,884	0,932	1,664	8,68	2,867	1,67	
5	0,68	1	-1	2	3,347	1,162	1,709	7,15	3,267	1,67	
6	0,82	1	-1	2	3,765	1,370	1,671	5,93	3,733	1,67	
7	1	1	-1	2	4,396	1,684	1,684	4,86	4,333	1,67	
8	1,2	1	-1	2	5,138	2,053	1,711	4,05	5	1,67	
9	1,5	1	-1	2	5,065	2,514	1,676	3,24	6	1,67	
10	1,8	1	-1	2	7,072	3,015	1,675	3,7	7	1,67	
11	2,2	1	-1	2	8,586	3,768	1,713	2,21	8,33	1,67	
12	2,7	1	-1	2	9,128	4,137	1,532	1,8	10	1,530	
13	3,3	1	-1	2	9,152	4,289	1,300	1,47	12	1,295	
14	3,9	1	-1	2	9,168	4,402	1,129	1,246	14	1,122	
15	4,7	1	-1	2	9,185	4,515	0,961	1,034	15,67	0,953	

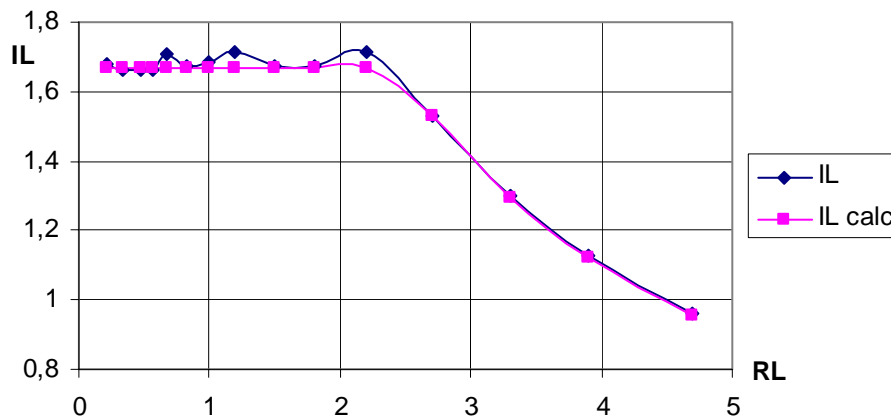
Il valore della tensione di saturazione risulta di 9,1V (valore che verrà usato nel calcolo di  $I_L$  in condizioni di saturazione).

**Tabella delle misure di  $I_L$  con variazione di  $V_d$ :  $R = 1,2k\Omega$ ;  $R_L = 1,2k\Omega$ .**

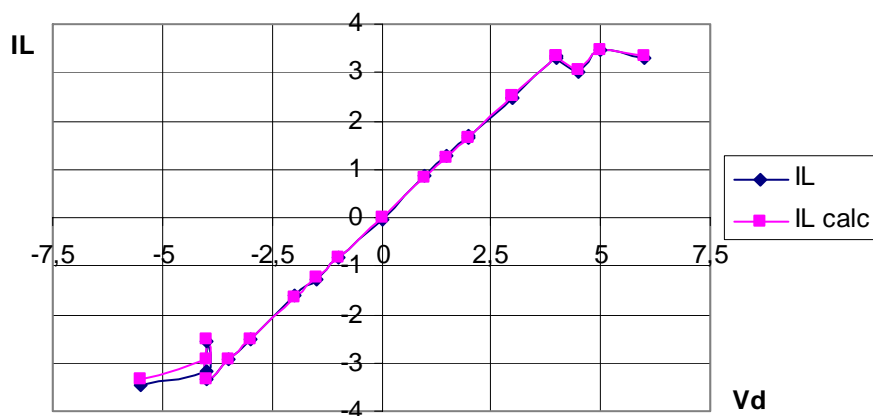
N	K $\Omega$	Volt					mA	Volt			mA
	$R_L$	$V_1$	$V_2$	$V_d$	$V_o$	$V_{RL}$	$I_L$	$V_{dMAX}$	$V_o$ calc	$I_L$ calc	
1	1,2	-4	1,5	-5,5	-8,544	-4,174	-3,478	-3,25	-12,5	-3,333	
2	1,2	-3	1	-4	-8,471	-3,819	-3,183	-3,5	-8,00	-2,917	
3	1,2	-1	3	-4	-8,201	-3,065	-2,554	-2,5	-11	-2,50	
4	1,2	-6	-2	-4	-5,979	-3,984	-3,320	-5	-6	-3,33	
5	1,2	-4	-0,5	-3,5	-6,534	-3,507	-2,922	-4,25	-6,5	-2,917	
6	1,2	-1	2	-3	-8,120	-3,038	-2,532	-3	-8	-2,50	
7	1,2	2	4	-2	-7,847	-1,951	-1,626	-2	-8	-1,67	
8	1,2	1	2,5	-1,5	-5,635	-1,548	-1,290	-2,75	-5,5	-1,250	
9	1,2	-3	-2	-1	0,054	-0,984	-0,820	-5	0	-0,833	
10	1,2	2	2	0	-2,080	-0,035	-0,029	-3	-2	0	
11	1,2	-2	-3	1	5,104	1,028	0,857	6	5	0,833	
12	1,2	-2	-3,5	1,5	6,611	1,530	1,275	2,75	6,5	1,250	
13	1,2	-2	-4	2	8,138	2,037	1,698	2,5	8	1,67	
14	1,2	5	3	2	0,899	1,956	1,630	3	1	1,67	
15	1,2	4	1	3	4,977	2,978	2,482	5	5	2,50	
16	1,2	6,5	3,5	3	2,397	2,950	2,458	2,75	2,5	2,50	
17	1,2	3	-1	4	9,071	4,008	3,340	4	9	3,33	
18	1,2	5	1	4	6,992	3,980	3,317	4	7	3,33	
19	1,2	2	-2,5	4,5	8,914	3,624	3,020	3,25	11,5	3,055	
20	1,2	3,5	-1,5	5	9,087	4,178	3,482	3,75	11,5	3,47	
21	1,2	3	-3	6	8,924	3,958	3,298	3	15	3,33	

Il valore delle tensioni di saturazione sono +9V e -8V (valori che verranno usati nel calcolo di  $I_L$  in condizioni di saturazione).

Si riportano i grafici di  $I_L$  e di  $I_L$  calcolata in funzione di  $R_L$  e in funzione di  $V_d$ .



Il grafico evidenzia che la corrente si mantiene praticamente costante al variare di  $R_L$  fino al valore 2,2K $\Omega$ , oltre il quale l'uscita satura con conseguente variazione di  $I_L$ .



Il grafico evidenzia che la corrente dipende linearmente da  $V_d$  fino ad una tensione differenziale d'ingresso di circa  $\pm 3,5V$ , cui corrisponde una corrente di circa  $\pm 3mA$ . Oltre questo valore l'uscita satura e si perde la dipendenza da  $V_i$ .