

## INDICE

### TEORIA

#### LIMITATORE SEMPLICE

Limitazione della parte positiva della tensione d'uscita .....pag. 1

Limitazione della parte positiva della tensione d'uscita a un generico valore.....pag. 3

#### LIMITATORE DOPPIO

Limitazione della parte negativa della tensione d'uscita e limitazione della parte positiva dell'uscita a un generico valore.....pag. 5

Limitazione della tensione d'uscita tra due generici valori.....pag. 8

#### LIMITAZIONE DELLA PENDENZA

Limitazione della pendenza della curva caratteristica della tensione d'uscita per un determinato (determinati) valore (valori) della tensione d'uscita.....pag. 10

### LABORATORIO

Verifica in continua e in alternata di circuiti limitatori semplici e doppi con diodi.....pag. 15

Limitazione della parte positiva della tensione d'uscita .....pag. 17

Limitazione della parte positiva della tensione d'uscita a un generico valore.....pag. 24

Limitazione della parte negativa della tensione d'uscita e limitazione della parte positiva dell'uscita a un generico valore.....pag. 32

Limitazione della tensione d'uscita tra due generici valori.....pag. 40

Considerazioni sull'impiego dei diodi zener nei limitatori.....pag. 47

Limitazione della parte positiva della tensione d'uscita a un generico valore con diodo zener 6,8V.....pag. 48

Limitazione della parte negativa della tensione d'uscita e limitazione della parte positiva dell'uscita a un generico valore con diodo zener 6,8V.....pag. 51

Limitazione della tensione d'uscita tra due generici valori con diodo zener 6,8V.....pag. 56

Limitazione della pendenza della curva caratteristica della tensione d'uscita ad iniziare da quando l'uscita assume il valore  $V_{\gamma}$ . Circuito con un solo diodo.....pag. 61

# LIMITATORI SEMPLICI E DOPPI CON DIODI

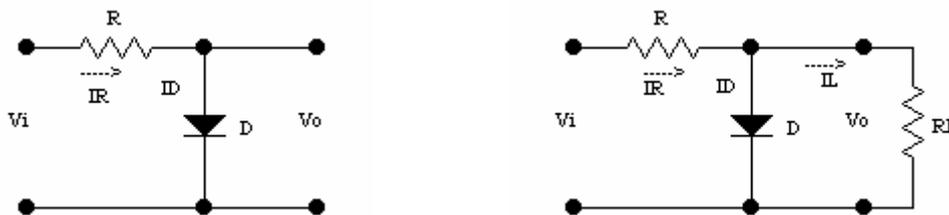
## TEORIA E VERIFICHE DI LABORATORIO

### TEORIA

Un limitatore è un circuito che limita la tensione d'uscita al di sopra o al di sotto di un valore o tra due valori. Nel primo caso si parla di limitatore semplice, nel secondo caso di limitatore doppio.

### LIMITATORE SEMPLICE - LIMITAZIONE DELLA PARTE POSITIVA DELLA TENSIONE D'USCITA

Si inserisce, in derivazione ai morsetti d'uscita, un diodo, come in figura.



Sia con carico, sia senza carico, la tensione d'uscita (positiva) verrà limitata al valore  $V_\gamma \approx 0,7V$ , tensione di soglia di conduzione del diodo. Poiché la corrente nel diodo dipende esponenzialmente dalla tensione ai suoi capi, si può assumere tale differenza di potenziale pressoché costante al variare della corrente che attraversa il diodo (purché le variazioni della corrente non siano troppo ampie).

Si esamina il circuito prima a vuoto (senza carico  $R_L$ ), poi con l'uscita chiusa su un carico  $R_L$ .

Lo studio dei circuiti limitatori (circuiti con diodi) si basa, essenzialmente, sulla determinazione della tensione (o delle tensioni) alla quale viene limitata l'uscita (condizione di conduzione del ramo con diodi) e della tensione (o delle tensioni) di ingresso (tensione di soglia d'ingresso) alla quale (o alle quali) il ramo con i diodi entra in conduzione.

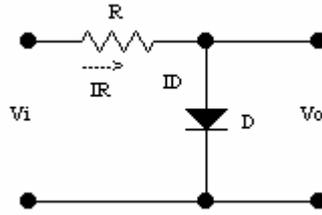
Al fine di determinare la tensione (o le tensioni) di soglia d'ingresso, si suppone di essere nella condizione di ramo con i diodi interdetto. Si determina la funzione d'uscita in tale condizione.

La tensione d'uscita coincide sempre con quella agli estremi del ramo contenente i diodi; pertanto, si impone, nella funzione d'uscita con ramo con diodi interdetto, che la tensione d'uscita raggiunga il valore a cui viene limitata per un preciso valore  $V_{is}$  della tensione d'ingresso e si risolve rispetto a  $V_{is}$ .  $V_{is}$  è la tensione di soglia d'ingresso, ossia quella tensione d'ingresso alla quale il ramo con i diodi arriva alla soglia di conduzione.

La funzione d'uscita cambia in dipendenza del confronto della tensione d'ingresso  $V_i$  con la tensione di soglia d'ingresso  $V_{is}$ .

#### Senza carico

Quando il diodo è interdetto non circola corrente e non si ha alcuna caduta di tensione sulla resistenza  $R$ : la tensione d'uscita coincide con la tensione d'ingresso,  $V_o = V_i$ .



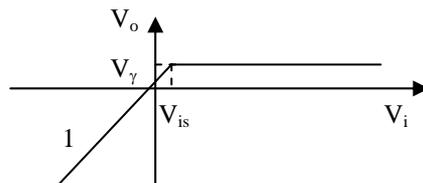
$V_o = V_i$  è la funzione d'uscita con diodo interdetto.

L'uscita viene limitata al valore di conduzione  $V_\gamma$  del diodo. Pertanto, imponendo nella funzione d'uscita  $V_o = V_\gamma$  per il valore  $V_{is}$  d'ingresso, si ha:  $V_{is} = V_\gamma$ ; la tensione di soglia d'ingresso coincide con la tensione a cui viene limitata l'uscita.

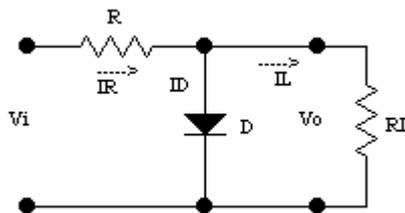
Confrontando  $V_i$  e  $V_{is}$ , si ha:

- se  $V_i < V_{is} = V_\gamma \approx 0,7V \Rightarrow$  D interdetto  $\Rightarrow V_o = V_i$  retta passante per l'origine con pendenza 1
- se  $V_i \geq V_{is} = V_\gamma \approx 0,7V \Rightarrow$  D in conduzione  $\Rightarrow V_o = V_\gamma$  retta parallela all'asse  $V_i$

La caratteristica d'uscita ha il seguente andamento:



### Con carico



La tensione d'uscita viene limitata, ancora, al valore  $V_\gamma$ . Col diodo interdetto, si ha:

$$V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i.$$

Imponendo che alla tensione d'ingresso  $V_{is}$  la tensione d'uscita assume il valore  $V_\gamma$ , si calcola la tensione di soglia d'ingresso:

$$V_\gamma = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is} \Rightarrow V_{is} = \frac{R + R_L}{R_L} V_\gamma = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_\gamma.$$

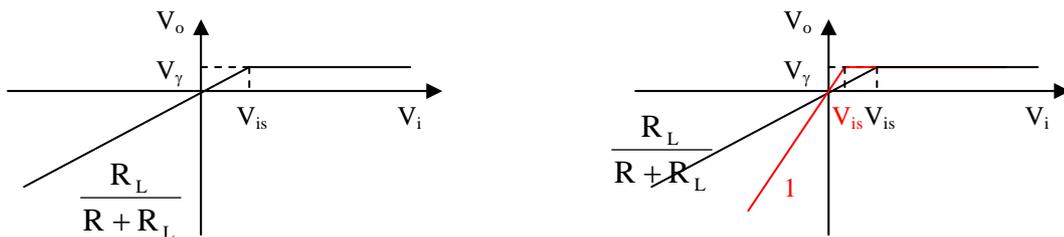
Confrontando  $V_i$  e  $V_{is}$ , si ha:

– se  $V_i < V_{is} \Rightarrow D$  interdetto  $\Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i$  retta passante per l'origine con pendenza

$$\frac{R_L}{R + R_L} < 1$$

– se  $V_i \geq V_{is} \Rightarrow D$  in conduzione  $\Rightarrow V_o = V_\gamma$  retta parallela all'asse  $V_i$

La caratteristica d'uscita ha il seguente andamento (vengono riportate anche le due caratteristiche sovrapposte per evidenziarne le differenze):

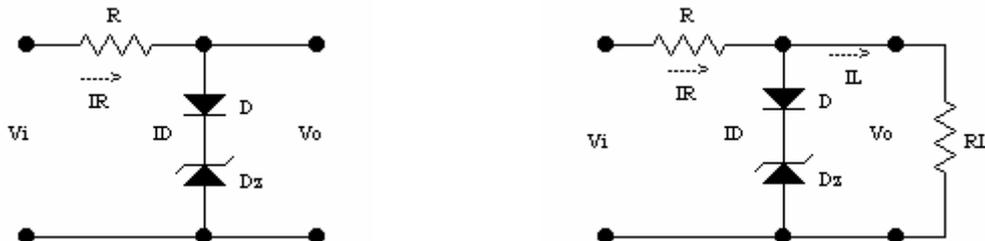


L'inserimento del carico non modifica il valore della tensione alla quale viene limitata l'uscita, ma modifica sia la tensione di soglia d'ingresso, sia la pendenza della curva caratteristica relativa all'uscita non limitata; aumenta la tensione di soglia d'ingresso e diminuisce la pendenza della curva caratteristica.

Volendo limitare la parte negativa della tensione d'uscita è sufficiente invertire il diodo. Verrà limitata la parte negativa al valore  $-V_\gamma$ .

### LIMITATORE SEMPLICE - LIMITAZIONE DELLA PARTE POSITIVA DELLA TENSIONE D'USCITA A UN GENERICO VALORE

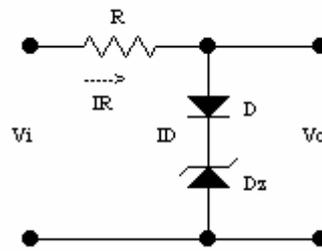
In tale caso si utilizza, in serie al diodo, un diodo zener di opportuno valore, come riportato in figura.



La tensione d'uscita viene limitata al valore di conduzione del ramo contenente i diodi. Il diodo  $D$  dovrà risultare polarizzato direttamente, il diodo zener inversamente; in caso contrario il ramo è interdetto.

Il ramo inizia a condurre quando la differenza di potenziale ai suoi capi è positiva e raggiunge la tensione somma delle soglie di conduzione di entrambi i diodi:  $V_z + V_\gamma$ .

## Senza carico



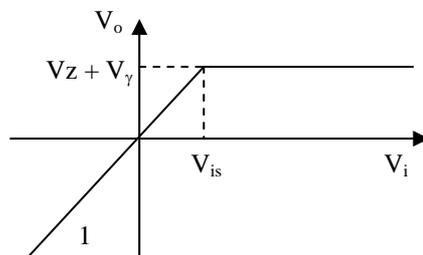
Quando il ramo con i diodi è interdetto, non circolando corrente, la funzione d'uscita è:  $V_o = V_i$ .  
Imponendo  $V_o = V_z + V_\gamma$  quando  $V_i = V_{is}$ , si ha:

$$V_o = V_i \Rightarrow V_z + V_\gamma = V_{is} \Rightarrow V_{is} = V_z + V_\gamma ;$$

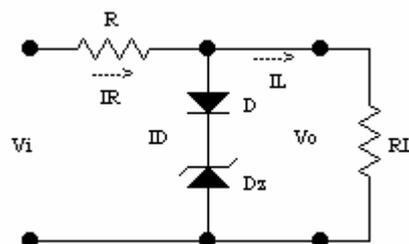
la tensione di soglia d'ingresso coincide con la tensione a cui viene limitata l'uscita.  
Confrontando  $V_i$  e  $V_{is}$ , si ha:

- se  $V_i < V_{is} = V_z + V_\gamma \Rightarrow$  ramo diodi interdetto  $\Rightarrow V_o = V_i$  retta passante per l'origine con pendenza 1
- se  $V_i \geq V_{is} = V_z + V_\gamma \Rightarrow$  ramo diodi in conduzione  $\Rightarrow V_o = V_z + V_\gamma$  retta parallela all'asse  $V_i$

La caratteristica d'uscita ha il seguente andamento:



## Con carico



La tensione d'uscita viene limitata, ancora, al valore  $V_z + V_\gamma$ . Col diodo interdetto, si ha:

$$V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i .$$

Imponendo che alla tensione d'ingresso  $V_{is}$  la tensione d'uscita assume il valore  $V_z + V_\gamma$ , si calcola la tensione di soglia d'ingresso:

$$V_z + V_\gamma = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is} \Rightarrow V_{is} = \frac{R + R_L}{R_L} (V_z + V_\gamma) = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) (V_z + V_\gamma).$$

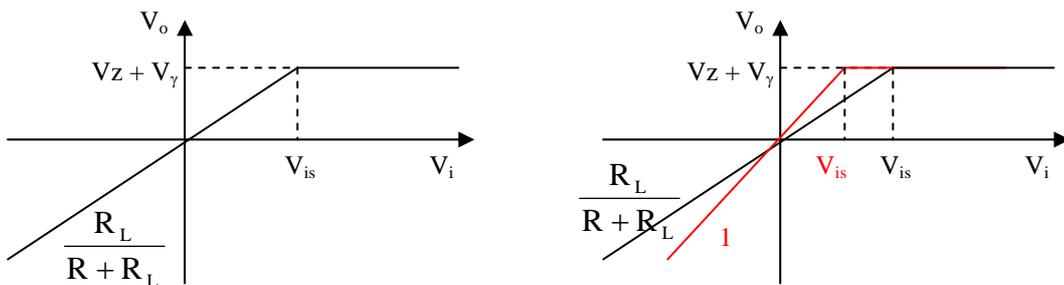
Confrontando  $V_i$  e  $V_{is}$ , si ha:

– se  $V_i < V_{is} \Rightarrow$  ramo diodi interdetto  $\Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i$  retta passante per l'origine con

$$\text{pendenza } \frac{R_L}{R + R_L} < 1$$

– se  $V_i \geq V_{is} \Rightarrow$  ramo diodi in conduzione  $\Rightarrow V_o = V_z + V_\gamma$  retta parallela all'asse  $V_i$

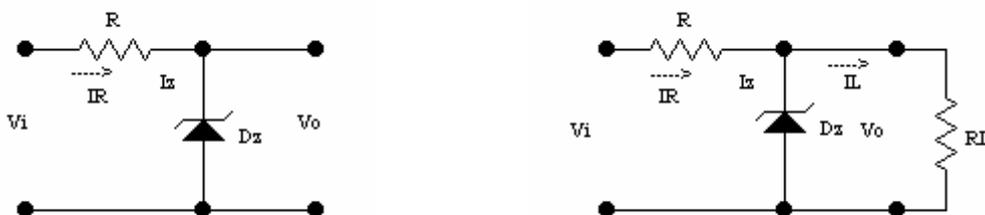
La caratteristica d'uscita ha il seguente andamento (vengono riportate anche le due caratteristiche sovrapposte per evidenziarne le differenze):



Stessa tensione di limitazione dell'uscita senza carico; aumenta la tensione di soglia d'ingresso. Volendo limitare la parte negativa della tensione d'uscita è sufficiente invertire i diodi. Verrà limitata la parte negativa al valore  $-(V_z + V_\gamma)$ .

### LIMITATORE DOPPIO - LIMITAZIONE DELLA PARTE NEGATIVA DELLA TENSIONE D'USCITA E LIMITAZIONE DELLA PARTE POSITIVA DELL'USCITA A UN GENERICO VALORE

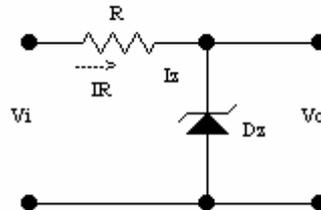
È sufficiente utilizzare solo un diodo zener, come riportato in figura.



La tensione d'uscita viene limitata tra  $-V_\gamma$  e  $V_z$ . Quando, con  $V_i < 0$ , il diodo zener è polarizzato direttamente ed entra in conduzione alla tensione  $-V_\gamma$ , limitando la tensione d'uscita a tale valore; quando viene polarizzato inversamente entra in conduzione alla tensione  $V_z$ , limitando l'uscita a tale valore.

Si hanno due soglie di conduzione:  $V_{is1}$  quando  $V_o = -V_\gamma$  e  $V_{is2}$  quando  $V_o = V_z$ .

### Senza carico



Quando il ramo col diodo zener è interdetto, non circolando corrente, la funzione d'uscita è:  $V_o = V_i$ . Imponendo, rispettivamente,  $V_o = -V_\gamma$  quando  $V_i = V_{is1}$  e  $V_o = V_z$  quando  $V_i = V_{is2}$ , si calcolano le due soglie:

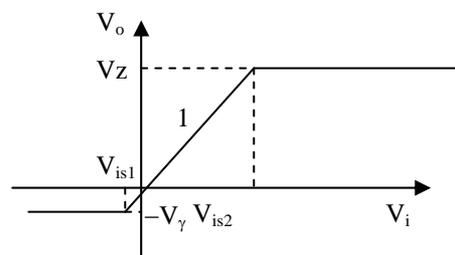
$$V_o = V_i \Rightarrow \begin{cases} -V_\gamma = V_{is1} \Rightarrow V_{is1} = -V_\gamma \\ V_z = V_{is2} \Rightarrow V_{is2} = V_z \end{cases} ;$$

le tensioni di soglia d'ingresso coincidono con le tensioni a cui viene limitata l'uscita.

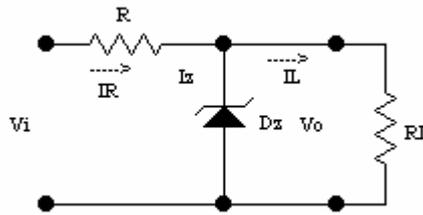
Confrontando  $V_i$  con  $V_{is1}$  e  $V_{is2}$ , si ha:

- se  $V_i < V_{is1} = -V_\gamma \Rightarrow D_z$  in conduzione diretta  $\Rightarrow V_o = -V_\gamma$  retta parallela all'asse  $V_i$
- se  $-V_\gamma = V_{is1} \leq V_i \leq V_{is2} = V_z \Rightarrow D_z$  interdetto  $\Rightarrow V_o = V_i$  retta passante per l'origine con pendenza 1
- se  $V_i > V_{is2} = V_z \Rightarrow D_z$  in conduzione inversa  $\Rightarrow V_o = V_z$  retta parallela all'asse  $V_i$

La caratteristica d'uscita ha il seguente andamento:



## Con carico



La tensione d'uscita viene limitata, ancora, tra i valori  $-V_\gamma$  e  $V_z$ . Col diodo interdetto, si ha:

$$V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i.$$

Imponendo che alle tensioni d'ingresso  $V_{is1}$  e  $V_{is2}$  la tensione d'uscita assume, rispettivamente, i valori  $-V_\gamma$  e  $V_z$ , si calcolano le tensioni di soglia d'ingresso:

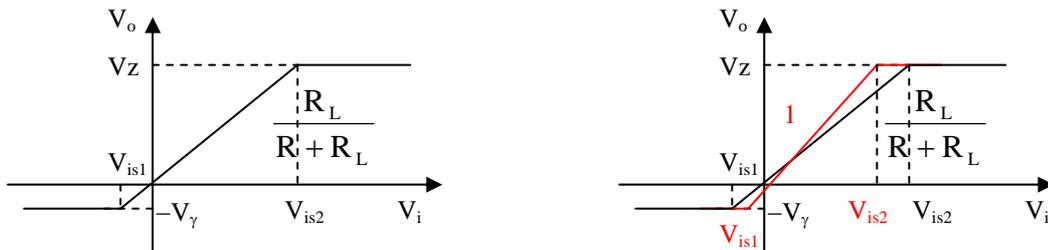
$$-V_\gamma = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is1} \Rightarrow V_{is1} = \frac{R + R_L}{R_L} (-V_\gamma) = -\left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_\gamma.$$

$$V_z = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is2} \Rightarrow V_{is2} = \frac{R + R_L}{R_L} V_z = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_z.$$

Confrontando  $V_i$  con  $V_{is1}$  e  $V_{is2}$ , si ha:

- se  $V_i < V_{is1} \Rightarrow D_z$  in conduzione diretta  $\Rightarrow V_o = -V_\gamma$  retta parallela all'asse  $V_i$
- se  $V_{is1} \leq V_i \leq V_{is2} \Rightarrow D_z$  interdetto  $\Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i$  retta passante per l'origine con  
pendenza  $\frac{R_L}{R + R_L} < 1$
- se  $V_i > V_{is2} \Rightarrow D_z$  in conduzione inversa  $\Rightarrow V_o = V_z$  retta parallela all'asse  $V_i$

La caratteristica d'uscita ha il seguente andamento (vengono riportate anche le due caratteristiche sovrapposte per evidenziarne le differenze):

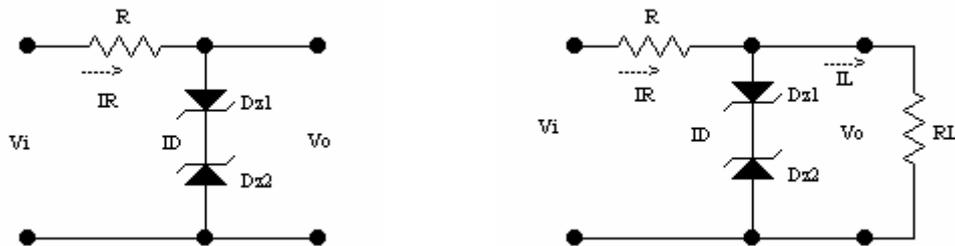


Stesse tensioni di limitazione dell'uscita senza carico; aumentano, in valore assoluto, le tensioni di soglia d'ingresso.

Volendo limitare la parte positiva della tensione d'uscita e la parte negativa ad un generico valore, è sufficiente invertire il diodo. Verrà limitata la parte negativa al valore  $-V_z$  e la parte positiva al valore  $V_\gamma$ .

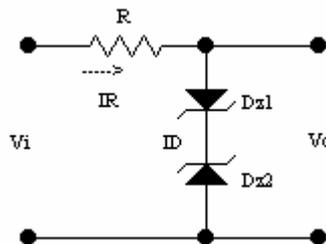
### LIMITATORE DOPPIO - LIMITAZIONE DELLA TENSIONE D'USCITA TRA DUE GENERICI VALORI

Si utilizzano due diodi zener in antiserie, come in figura.



La tensione d'uscita viene limitata tra  $-(V_{z1} + V_{\gamma2})$  e  $V_{z2} + V_{\gamma1}$ . Si hanno due soglie di conduzione:  $V_{is1}$  quando  $V_o = -(V_{z1} + V_{\gamma2})$  e  $V_{is2}$  quando  $V_o = V_{z2} + V_{\gamma1}$ .

#### Senza carico



Quando il ramo con i diodi zener è interdetto, non circolando corrente, la funzione d'uscita è:  $V_o = V_i$ . Imponendo, rispettivamente,  $V_o = -(V_{z1} + V_{\gamma2})$  quando  $V_i = V_{is1}$  e  $V_o = V_{z2} + V_{\gamma1}$  quando  $V_i = V_{is2}$ , si calcolano le due soglie:

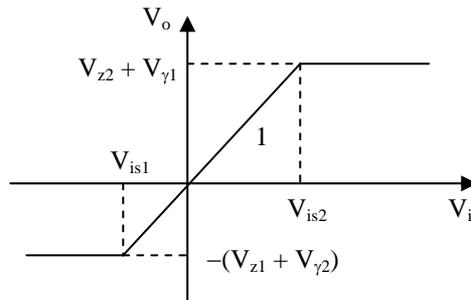
$$V_o = V_i \Rightarrow \begin{cases} -(V_{z1} + V_{\gamma2}) = V_{is1} \Rightarrow V_{is1} = -(V_{z1} + V_{\gamma2}) \\ V_{z2} + V_{\gamma1} = V_{is2} \Rightarrow V_{is2} = V_{z2} + V_{\gamma1} \end{cases} ;$$

le tensioni di soglia d'ingresso coincidono con le tensioni a cui viene limitata l'uscita. Confrontando  $V_i$  con  $V_{is1}$  e  $V_{is2}$ , si ha:

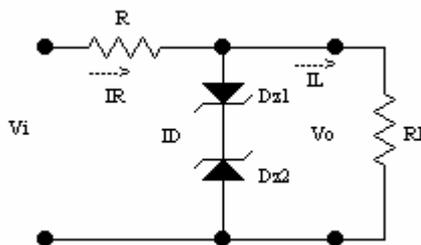
- se  $V_i < V_{is1} \Rightarrow D_{z1}$  in conduzione inversa e  $D_{z2}$  in conduzione diretta (ramo in conduzione)  $\Rightarrow V_o = -(V_{z1} + V_{\gamma2})$  retta parallela all'asse  $V_i$

- se  $V_{is1} \leq V_i \leq V_{is2} \Rightarrow$  ramo con diodi zener interdetti  $\Rightarrow V_o = V_i$  retta passante per l'origine con pendenza 1
- se  $V_i > V_{is2} \Rightarrow D_{z1}$  in conduzione diretta e  $D_{z2}$  in conduzione inversa (ramo in conduzione)  $\Rightarrow V_o = V_{z2} + V_{\gamma1}$  retta parallela all'asse  $V_i$

La caratteristica d'uscita ha il seguente andamento:



### Con carico



La tensione d'uscita viene limitata, ancora, tra i valori  $-(V_{z1} + V_{\gamma2})$  e  $V_{z2} + V_{\gamma1}$ . Col diodo interdetti, si ha:

$$V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i.$$

Imponendo che alle tensioni d'ingresso  $V_{is1}$  e  $V_{is2}$  la tensione d'uscita assume, rispettivamente, i valori  $-(V_{z1} + V_{\gamma2})$  e  $V_{z2} + V_{\gamma1}$ , si calcolano le tensioni di soglia d'ingresso:

$$-(V_{z1} + V_{\gamma2}) = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is1} \Rightarrow V_{is1} = \frac{R + R_L}{R_L} [-(V_{z1} + V_{\gamma2})] = -\left(1 + \frac{R}{R_L}\right) (V_{z1} + V_{\gamma2}).$$

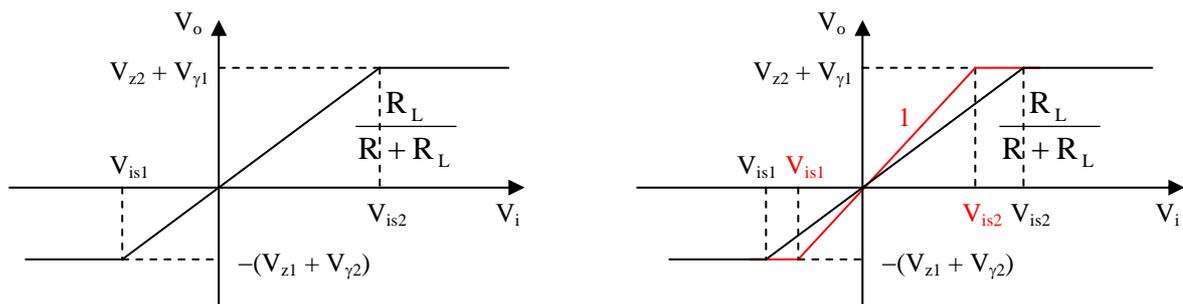
$$V_{z2} + V_{\gamma1} = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is2} \Rightarrow V_{is2} = \frac{R + R_L}{R_L} (V_{z2} + V_{\gamma1}) = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) (V_{z2} + V_{\gamma1}).$$

Confrontando  $V_i$  con  $V_{is1}$  e  $V_{is2}$ , si ha:

- se  $V_i < V_{is1} \Rightarrow D_{z1}$  in conduzione inversa e  $D_{z2}$  in conduzione diretta (ramo in conduzione)  $\Rightarrow V_o = -(V_{z1} + V_{\gamma2})$  retta parallela all'asse  $V_i$

- se  $V_{is1} \leq V_i \leq V_{is2} \Rightarrow$  ramo con diodi zener interdetti  $\Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i$  retta passante per l'origine con pendenza  $\frac{R_L}{R + R_L} < 1$
- se  $V_i > V_{is2} \Rightarrow D_{z1}$  in conduzione diretta e  $D_{z2}$  in conduzione inversa (ramo in conduzione)  $\Rightarrow V_o = V_{z2} + V_{\gamma1}$  retta parallela all'asse  $V_i$

La caratteristica d'uscita ha il seguente andamento (vengono riportate anche le due caratteristiche sovrapposte per evidenziarne le differenze):



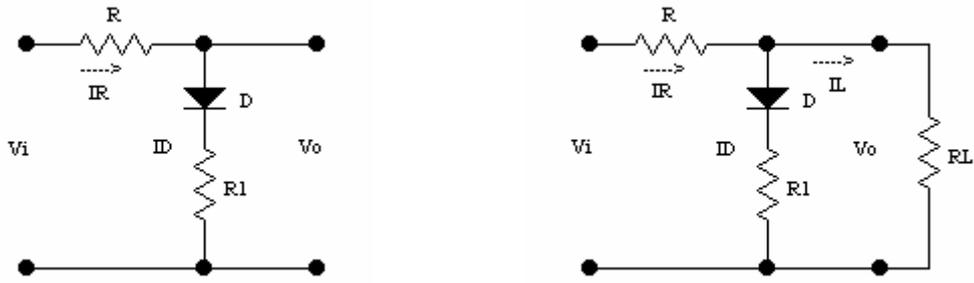
Stesse tensioni di limitazione dell'uscita senza carico; aumentano, in valore assoluto, le tensioni di soglia d'ingresso.

### LIMITAZIONE DELLA PENDENZA DELLA CURVA CARATTERISTICA DELLA TENSIONE D'USCITA PER UN DETERMINATO (DETERMINATI) VALORE (VALORI) DELLA TENSIONE D'USCITA

Inserendo una resistenza nel ramo contenente i diodi di uno dei limitatori su visti, la tensione d'uscita, quando il ramo con i diodi va in conduzione, non rimarrà costante, ma varierà linearmente, con variazione funzione della tensione che si ripartisce su essa. Ciò risulterà graficamente dalla variazione della pendenza della curva caratteristica in corrispondenza della tensione di conduzione del ramo con i diodi. In presenza del carico il ramo con i diodi risulterà elettricamente in parallelo al carico  $R_L$ . La presenza del carico non modifica il funzionamento del circuito, ma ne modificherà solo pendenze e tensioni di soglia d'ingresso.

Prendiamo in esame il caso del primo limitatore con diodo (l'estensione agli altri limitatori è immediata).

Il circuito è il seguente, senza carico e con carico.



### Senza carico

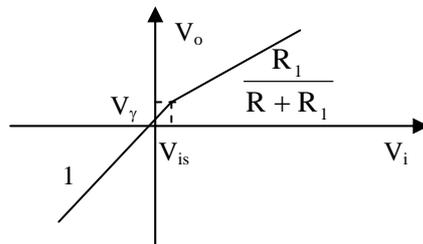
Il diodo entra in conduzione quando  $V_o = V_{is} = V_\gamma$ .

- se  $V_i < V_{is} = V_\gamma \approx 0,7V \Rightarrow$  D interdetto  $\Rightarrow V_o = V_i$  retta passante per l'origine con pendenza 1
- se  $V_i \geq V_{is} = V_\gamma \approx 0,7V \Rightarrow$  D in conduzione  $\Rightarrow$

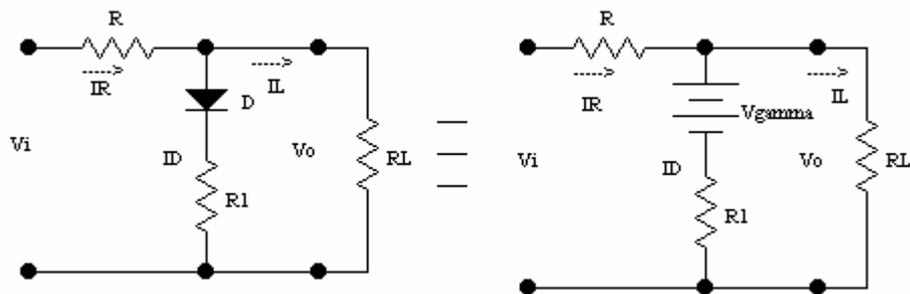
$$V_o = \frac{R_1}{R + R_1}(V_i - V_\gamma) + V_\gamma = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_1}} V_i + \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R}} V_\gamma \text{ retta con pendenza } \frac{R_1}{R + R_1} < 1$$

la pendenza diminuisce

La caratteristica d'uscita ha il seguente andamento:



### Con carico



Quando il diodo è interdetto, la tensione  $V_o$  si calcola applicando la regola di partizione alla serie  $R-R_L$ :

$$V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i.$$

Il diodo entra in conduzione al valore  $V_{is}$  della tensione d'ingresso che porta l'uscita al valore  $V_\gamma$ :

$$V_\gamma = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is} \Rightarrow V_{is} = \frac{R + R_L}{R_L} V_\gamma = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_\gamma.$$

L'inserimento del carico provoca un aumento del valore della tensione di soglia d'ingresso al quale il diodo entra in conduzione.

– se  $V_i < V_{is} \Rightarrow$  D interdetto  $\Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i$  retta passante per l'origine

$$\text{con pendenza } \frac{R_L}{R + R_L} < 1$$

Quando il diodo entra in conduzione la resistenza  $R_1$  e il diodo risulteranno in parallelo alla resistenza di carico. Se il diodo può essere assimilato ad un corto ci,  $R$  e  $R_L$  si troveranno in parallelo, pertanto:

– se  $V_i \geq V_{is} \Rightarrow$  D in conduzione  $\Rightarrow V_o = \frac{R_1 // R_L}{R + R_1 // R_L} V_i = \frac{\frac{R_1 R_L}{R_1 + R_L}}{R + \frac{R_1 R_L}{R_1 + R_L}} V_i =$

$$= \frac{R_1 R_L}{R R_1 + R R_L + R_1 R_L} V_i = \frac{R_L}{R + \frac{R R_L}{R_1} + R_L} V_i = \frac{R_L}{R + R_L \left(1 + \frac{R}{R_1}\right)} V_i$$

$$\text{retta con pendenza } \frac{R_L}{R + R_L \left(1 + \frac{R}{R_1}\right)} < \frac{R_L}{R + R_L}$$

Quando  $V_i = V_{is} = V_\gamma$ , si ha:

$$V_o = \frac{R_1 R_L}{R R_1 + R R_L + R_1 R_L} \cdot \frac{R + R_L}{R_L} V_\gamma = \frac{R R_1 + R_1 R_L}{R R_1 + R R_L + R_1 R_L} V_\gamma = \frac{1}{1 + \frac{R_1 R_L}{R R_1 + R_1 R_L}} V_\gamma \neq V_\gamma$$

Tale valore provoca una discontinuità nella funzione d'uscita. Quando  $V_i = V_{is} = V_\gamma$  il diodo è polarizzato direttamente ma non conduce e la resistenza  $R_1$  non è ancora elettricamente in parallelo a  $R_L$  e dovrebbe risultare  $V_o = V_\gamma$ .

Se non vogliamo avere discontinuità nella funzione di trasferimento, o se la presenza del diodo influisce sensibilmente sul funzionamento del circuito, si può, commettendo un errore trascurabile, tenere conto della sua tensione di soglia  $V_\gamma$  e considerare nulla la sua resistenza differenziale. Al diodo si sostituisce un generatore continuo di valore  $V_\gamma$ , come in figura.

Si calcola la tensione d'uscita  $V_o$  applicando, tra i due nodi del circuito, il teorema di Millman.

$$V_o = \frac{\frac{V_i}{R} + \frac{V_\gamma}{R_1}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_L}} = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_L}} V_i + \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_L}} V_\gamma =$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{R}{R_1} + \frac{R}{R_L}} V_i + \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R} + \frac{R_1}{R_L}} V_\gamma$$

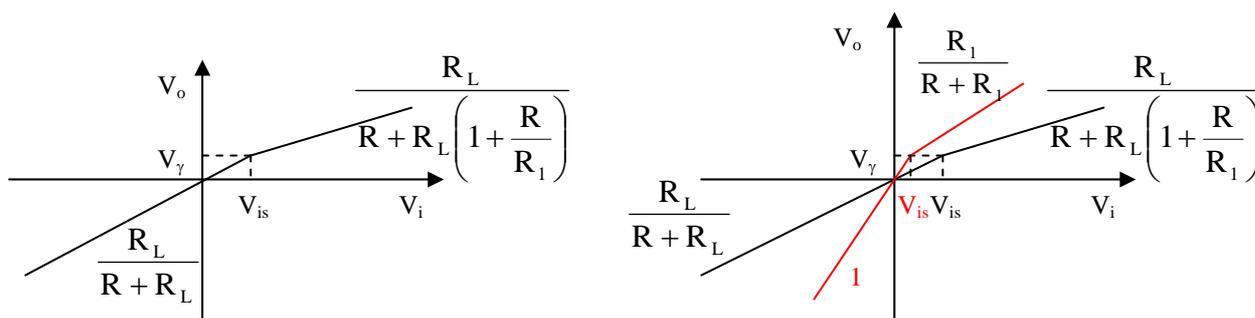
La pendenza è ancora  $\frac{1}{1 + \frac{R}{R_1} + \frac{R}{R_L}} = \frac{R_L}{R + \frac{RR_L}{R_1} + R_L} = \frac{R_L}{R + R_L \left(1 + \frac{R}{R_1}\right)} < \frac{R_L}{R + R_L}$ ,

ma è ora presente nell'equazione un termine costante che tiene conto della presenza del diodo. Quando  $V_i = V_{is} = V_\gamma$ , si ha:

$$V_o = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_1} + \frac{R}{R_L}} \cdot \frac{R + R_L}{R_L} V_\gamma + \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R} + \frac{R_1}{R_L}} V_\gamma =$$

$$= \frac{R + R_L}{\frac{RR_1 + RR_L + R_1R_L}{R_1R_L} \cdot R_L} V_\gamma + \frac{RR_L}{RR_1 + RR_L + R_1R_L} V_\gamma = \frac{RR_1 + RR_L + R_1R_L}{RR_1 + RR_L + R_1R_L} V_\gamma = V_\gamma$$

Non vi sono discontinuità nella funzione d'uscita. Quando  $V_i = V_{is}$  risulta  $V_o = V_\gamma$ . La caratteristica d'uscita ha il seguente andamento (vengono riportate anche le due caratteristiche sovrapposte per evidenziarne le differenze):



L'inserimento del carico non modifica il valore della tensione alla quale viene limitata la pendenza della curva caratteristica d'uscita, ma modifica sia la tensione di soglia d'ingresso, sia la pendenza della curva caratteristica relativa all'uscita non limitata; aumenta la tensione di soglia d'ingresso e diminuisce la pendenza della curva caratteristica.

**Riassumendo:** il comportamento della funzione d'uscita, sarà:

### **Diodo interdetto**

- Senza carico  $V_o = V_i$ ;  $V_{is} = V_\gamma$
- Col carico  $V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i$ ;  $V_{is} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_\gamma$

### **Diodo in conduzione**

- Senza carico  $V_o = \frac{R_1}{R + R_1} (V_i - V_\gamma) + V_\gamma = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_1}} V_i + \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R}} V_\gamma$
- Col carico  $V_o = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_1} + \frac{R}{R_L}} V_i + \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R} + \frac{R_1}{R_L}} V_\gamma$

## LABORATORIO

### VERIFICA IN CONTINUA E IN ALTERNATA DI CIRCUITI LIMITATORI SEMPLICI E DOPPI CON DIODI

Per ogni circuito limitatore si dovrà fissare, in corrispondenza del massimo valore della tensione d'ingresso, il massimo valore della corrente nel ramo contenente i diodi con uscita aperta (senza carico, condizione più sfavorevole). In base a tali valori ( $I_{D\text{MAX}}$  e  $V_{i\text{MAX}}$ ), note le tensioni di conduzione diretta  $V_\gamma$  dei diodi e delle tensioni di zener  $V_z$  dei diodi zener, si fissa il valore della resistenza  $R$  di limitazione della corrente nel ramo con i diodi con uscita aperta (condizione più sfavorevole).

Ogni limitatore verrà verificato con uscita aperta (senza il carico  $R_L$ ) e col carico  $R_L$ . la presenza del carico in uscita, rispetto al caso di uscita a vuoto, provocherà una variazione della tensione d'ingresso alla quale inizia la limitazione della tensione d'uscita e una diminuzione della pendenza del tratto obliquo della caratteristica d'uscita.

Il valore della resistenza di carico  $R_L$  verrà fissata in modo da ottenere una sensibile variazione della tensione di soglia d'ingresso  $V_{is}$  alla quale inizia la limitazione. Un valore orientativo di  $R_L$  è quello che produce una variazione di circa 2V della tensione di soglia relativa all'uscita aperta.

I circuiti limitatori verranno verificati prima in continua, poi in alternata; prima senza carico, poi col carico.

La **verifica in continua** consiste nel rilevare la tensione d'uscita in corrispondenza di valori continui della tensione d'ingresso variabili tra  $-V_{i\text{MIN}}$  e  $V_{i\text{MAX}}$  (orientativamente tra  $-10\text{V}$  e  $10\text{V}$ ). le coppie di valori ( $V_i$  ;  $V_o$ ) ottenuti verranno riportati su un piano  $V_o$ - $V_i$  ad ottenere la caratteristica d'uscita. Dal grafico si rileveranno le pendenze dei tratti rettilinei della caratteristica.

La **verifica in alternata** consiste nel sollecitare il circuito con segnali sinusoidale, triangolare e quadro di ampiezza 10V e frequenza 1KHz. Si rilevano le risposte oscillografiche e l'oscillogramma della caratteristica d'uscita ottenuta con la scansione xy dell'oscilloscopio. Si riporteranno le foto degli oscillogrammi. Dell'uscita quadra (tranne che per il limitatore con due diodi zener in antiserie) si misurerà anche il valore medio.

Si utilizzeranno il diodo 1N4148 e il diodo zener 4,3V 1/2W.

### PROCEDURA DI VERIFICA

#### Verifica in continua

##### Senza carico

1. Si monta il circuito e si collegano: il generatore di tensione variabile e un multimetro predisposto a voltmetro in ingresso (per ottenere valori di tensione negativi il generatore di tensione deve essere collegato con morsetti invertiti); un multimetro predisposto a voltmetro in uscita.
2. Si regola il generatore continuo al primo valore riportato nella tabella di verifica. Si rileva la tensione d'uscita. Si ricava  $V_R$  come differenza tra  $V_o$  e  $V_i$ . Si calcola  $I_D$  applicando la legge di Ohm ai capi della resistenza  $R$  utilizzando il valore di  $V_R$  prima ottenuto.
3. Si regola il generatore continuo al secondo valore riportato nella tabella di verifica e si ripete il punto 2. Lo stesso per tutti i valori d'ingresso della tabella.
4. Si riportano i valori nella tabella in cui sono riportati anche i valori calcolati teoricamente, per un immediato confronto.

### **Col carico**

5. Si aggiunge al circuito la resistenza di carico  $R_L$  e si regola il generatore continuo al primo valore riportato nella tabella di verifica. Si rileva la tensione d'uscita. Si ricava  $V_R$  come differenza tra  $V_o$  e  $V_i$ . Si calcolano  $I_R$  e  $I_L$  applicando la legge di Ohm ai capi, rispettivamente, delle resistenze  $R$  e  $R_L$ . si calcola  $I_D$  come differenza delle correnti  $I_R$  e  $I_L$  prima calcolate.
6. Si regola il generatore continuo al secondo valore riportato nella tabella di verifica e si ripete il punto 2. Lo stesso per tutti i valori d'ingresso della tabella.
7. Si riportano i valori nella tabella in cui sono riportati anche i valori calcolati teoricamente, per un immediato confronto.

### **Verifica in alternata**

#### **Senza carico**

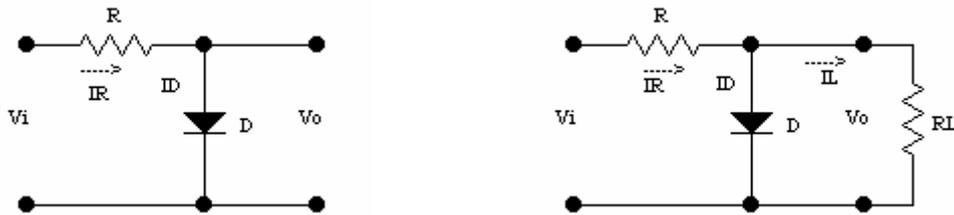
8. Si sostituisce al generatore continuo il generatore di funzioni e ai due multimetri i canali CH1 e CH2 dell'oscilloscopio.
9. Si predispone il generatore di funzioni su segnale sinusoidale e si regola l'ampiezza a 10V e la frequenza a 1KHz.
10. Si visualizzano i segnali d'ingresso e d'uscita sovrapposti (entrambi con asse di riferimento la linea centrale graduata orizzontale dello schermo) e si fotografa l'oscillogramma.
11. Si sposta il segnale d'ingresso verso l'alto e quello d'uscita verso il basso, in modo che risultino correlati, e si fotografa l'oscillogramma.
12. Si passa alla scansione xy, si regola l'oscilloscopio in modo da portare la curva caratteristica visualizzata nella posizione ottimale rispetto agli assi e si fotografa l'oscillogramma.
13. Si predispone il generatore di funzioni su segnale triangolare e si ripetono i punti 10, 11, 12.
14. Si predispone il generatore di funzioni su segnale ad onda quadra e si ripetono i punti 10,11,12.
15. Portando l'ingresso CH2 da DC ad AC, ossia eliminando le componenti continue dal segnale, si misura il valore medio dell'onda quadra d'uscita, misurando di quanti quadratini si sposta il segnale (tranne per il limitatore doppio con due diodi zener uguali in antiserie, in questo caso il segnale d'uscita è a valore medio nullo).

#### **Col carico**

16. Si ripetono i punti da 8 a 15.
17. Si riportano le foto degli oscillogrammi .

## LIMITATORE SEMPLICE - LIMITAZIONE DELLA PARTE POSITIVA DELLA TENSIONE D'USCITA

L'uscita viene limitata al valore  $V_\gamma$ .



In corrispondenza di  $V_{iMAX} = 10V$ , con uscita a vuoto, si fissa una corrente  $I_{DMAX} = 5mA$ . Assunto  $V_\gamma = 0,7V$  e uscita aperta, si ha:

$$R = \frac{V_{iMAX} - V_\gamma}{I_{DMAX}} = \frac{10 - 0,7}{5 \cdot 10^{-3}} = 1,86k\Omega \rightarrow 1,8k\Omega.$$

L'inserimento del carico dovrà produrre uno spostamento della tensione di soglia d'ingresso da  $0,7V$  a  $2V$ . Dalla funzione d'uscita con carico, posto  $V_o = V_\gamma$  e  $V_i = V_{is} = 2V$ , si ha:

$$V_\gamma = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is} \Rightarrow \frac{1}{1 + \frac{R}{R_L}} = \frac{V_\gamma}{V_{is}} \Rightarrow 1 + \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is}}{V_\gamma} \Rightarrow \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is}}{V_\gamma} - 1 \Rightarrow .$$

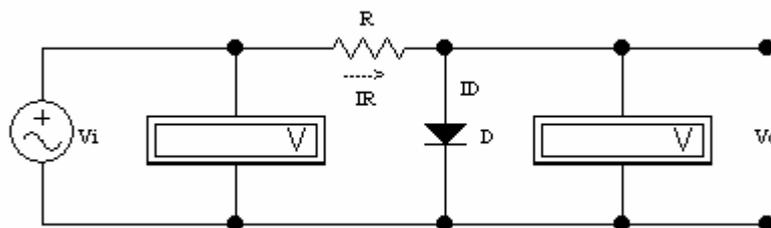
$$\Rightarrow \frac{R_L}{R} = \frac{1}{\frac{V_{is}}{V_\gamma} - 1} \Rightarrow R_L = \frac{R}{\frac{V_{is}}{V_\gamma} - 1} = \frac{1,8 \cdot 10^3}{\frac{2}{0,7} - 1} = 0,969k\Omega \rightarrow 1k\Omega.$$

Con tale valore, si ha:  $V_{is} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_\gamma = \left(1 + \frac{1,8 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3}\right) \cdot 0,7 = 1,96V.$

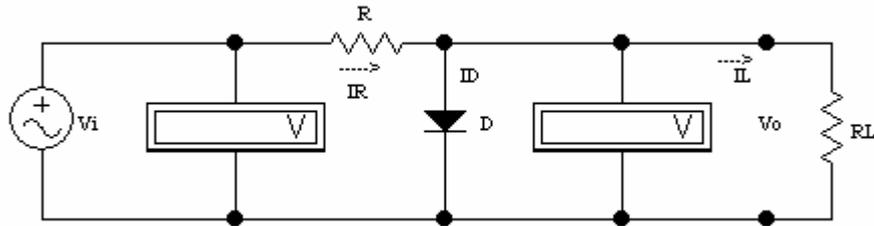
Riassumendo:  $R = 1,8K\Omega$ ;  $R_L = 1K\Omega$ ;  $D$ : 1N4148.

### VERIFICA IN CONTINUA

Circuito di verifica senza carico.



Circuito di verifica con carico.



Si riportano nelle tabelle i valori misurati e quelli calcolati.

Si riportano i punti ( $V_i$  ;  $V_o$ ), sperimentali e teorici, sia senza carico sia con carico, su due grafici distinti  $V_i$ - $V_o$  e si tracciano, sullo stesso grafico, le curve caratteristiche sperimentale e teorica, per un immediato confronto. Della caratteristica sperimentale si rileva la pendenza (coefficiente angolare) scegliendo, nei tratti rettilinei, due opportune coppie di punti.

Poiché la tensione  $V_o$  coincide con la differenza di potenziale ai capi del diodo ( $V_D$ ), riportando su un grafico  $I_D$  in funzione di  $V_o$ , si ottiene la curva caratteristica del diodo utilizzato, e, quindi, una valutazione del suo comportamento sia in polarizzazione diretta che inversa.

Senza carico $R_L$						
volt	Valori misurati			Valori calcolati		
	volt	mA		volt	mA	
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_D$
-10	-10	0,000	0,000	-10	0,000	0,000
-9	-9	0,000	0,000	-9	0,000	0,000
-8	-8	0,000	0,000	-8	0,000	0,000
-7	-7	0,000	0,000	-7	0,000	0,000
-6	-6	0,000	0,000	-6	0,000	0,000
-5	-5	0,000	0,000	-5	0,000	0,000
-4	-4	0,000	0,000	-4	0,000	0,000
-3	-3	0,000	0,000	-3	0,000	0,000
-2	-2	0,000	0,000	-2	0,000	0,000
-1	-1	0,000	0,000	-1	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000
0,5	0,45	0,05	0,028	0,5	0,000	0,000
0,6	0,495	0,105	0,058	0,6	0,000	0,000
0,7	0,519	0,181	0,101	0,7	0,000	0,000
0,8	0,53	0,27	0,150	0,7	0,1	0,056
0,9	0,55	0,35	0,194	0,7	0,2	0,111
1	0,56	0,44	0,244	0,7	0,3	0,167
2	0,616	1,318	0,769	0,7	1,3	0,722
3	0,642	2,358	1,310	0,7	2,3	1,278
4	0,66	3,34	1,856	0,7	3,3	1,833
5	0,672	4,328	2,404	0,7	4,3	2,389
6	0,683	5,317	2,954	0,7	5,3	2,944
7	0,692	6,308	3,504	0,7	6,3	3,500
8	0,7	7,3	4,056	0,7	7,3	4,056
9	0,706	8,294	4,608	0,7	8,3	4,611

Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-10 ; -10) e B(0 ; 0) per il tratto obliquo; i punti C(2 ; 0,616) e D(9 ; 0,706) per il tratto orizzontale.

Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{10}{10} = 1$$

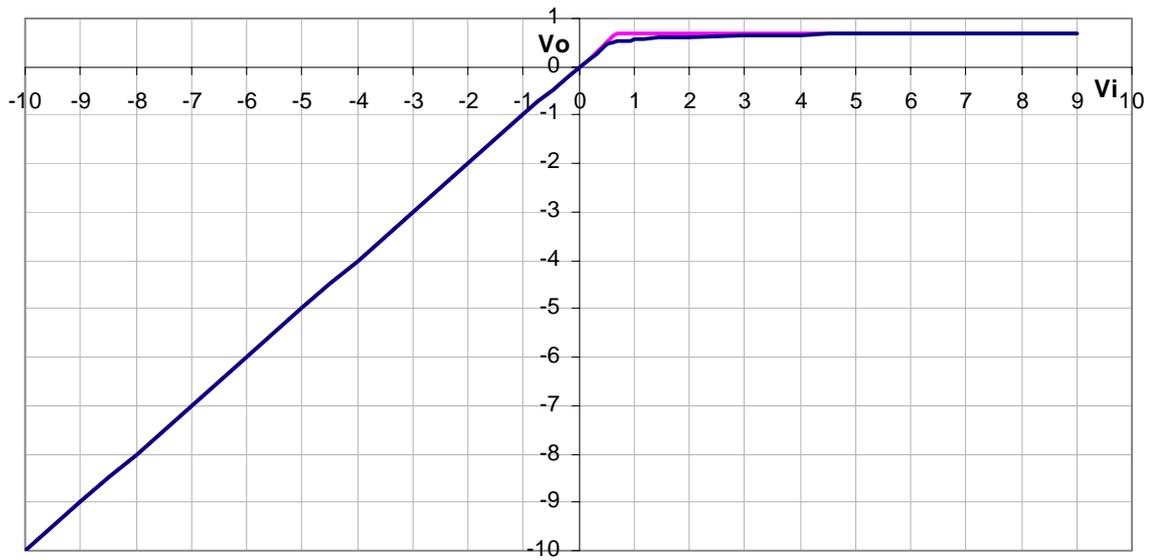
Tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{0,706 - 0,616}{9 - 2} = 0,01285$$

Con carico $R_L$										
volt	Valori misurati					Valori calcolati				
	volt		mA			volt		mA		
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$
-10	-3,540	-6,460	-3,589	-3,540	0,000	-3,571	-6,429	-3,572	-3,571	0,000
-9	-3,170	-5,830	-3,239	-3,170	0,000	-3,214	-5,786	-3,241	-3,214	0,000
-8	-2,820	-5,18	-2,878	-2,820	0,000	-2,857	-5,143	-2,857	-2,857	0,000
-7	-2,470	-4,53	-2,517	-2,470	0,000	-2,500	-4,5	-2,5	-2,500	0,000
-6	-2,120	-3,88	-2,156	-2,120	0,000	-2,143	-3,857	-2,143	-2,143	0,000
-5	-1,765	-3,235	-1,797	-1,765	0,000	-1,786	-3,214	-1,786	-1,786	0,000
-4	-1,410	-2,59	-1,439	-1,410	0,000	-1,429	-2,571	-1,428	-1,429	0,000
-3	-1,060	-1,94	-1,078	-1,060	0,000	-1,071	-1,929	-1,072	-1,071	0,000
-2	-0,705	-1,295	-0,719	-0,705	0,000	-0,714	-1,286	-0,714	-0,714	0,000
-1	-0,354	-0,646	-0,359	-0,354	0,000	-0,357	-0,643	-0,357	-0,357	0,000
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,350	9,65	0,361	0,350	0,011	0,357	0,643	0,357	0,357	0,000
1,5	0,490	1,01	0,561	0,490	0,071	0,536	0,964	0,536	0,536	0,000
1,8	0,540	1,26	0,700	0,540	0,160	0,643	1,157	0,643	0,643	0,000
1,9	0,550	1,35	0,750	0,550	0,200	0,679	1,221	0,678	0,679	0,000
2	0,559	1,441	0,801	0,559	0,242	0,700	1,3	0,722	0,700	0,022
2,1	0,567	1,533	0,852	0,567	0,285	0,700	1,4	0,778	0,700	0,078
2,2	0,574	1,626	0,903	0,574	0,329	0,700	1,5	0,833	0,700	0,133
3	0,612	2,388	1,327	0,612	0,715	0,700	2,3	1,278	0,700	0,578
4	0,639	3,361	1,867	0,639	1,228	0,700	3,3	1,833	0,700	1,133
5	0,656	4,344	2,413	0,656	1,757	0,700	4,3	2,389	0,700	1,689
6	0,669	5,331	2,962	0,669	2,293	0,700	5,3	2,944	0,700	2,244
7	0,680	6,32	3,511	0,680	2,831	0,700	6,3	3,5	0,700	2,8
8	0,689	7,311	4,062	0,689	3,373	0,700	7,3	4,056	0,700	3,356
9	0,697	8,303	4,613	0,697	3,916	0,700	8,3	4,611	0,700	3,911

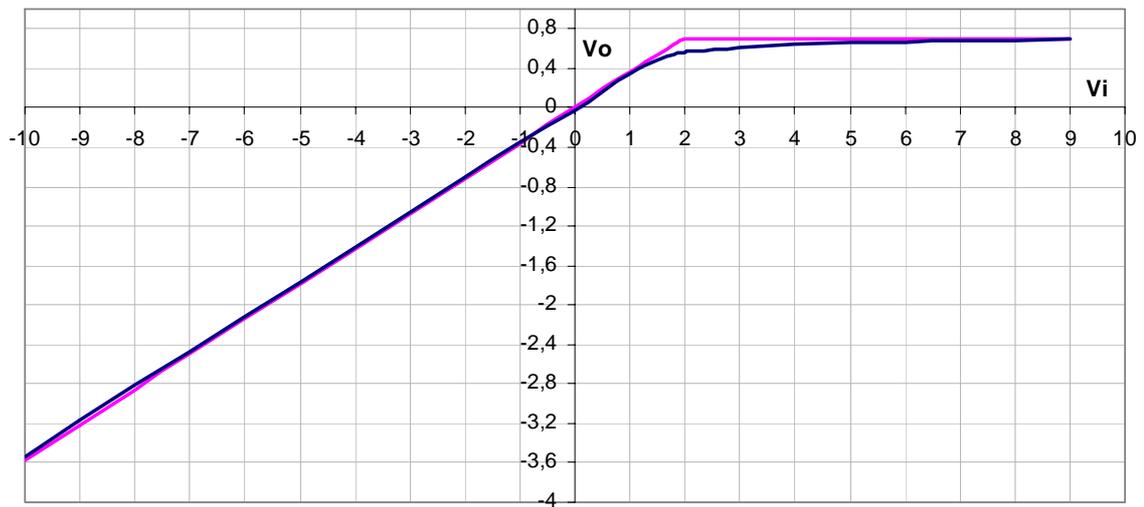
Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-10 ; -3,54) e B(0 ; 0) per il tratto obliquo; i punti C(4 ; 0,639) e D(9 ; 0,697) per il tratto orizzontale.

Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{3,54}{10} = 3,54$$

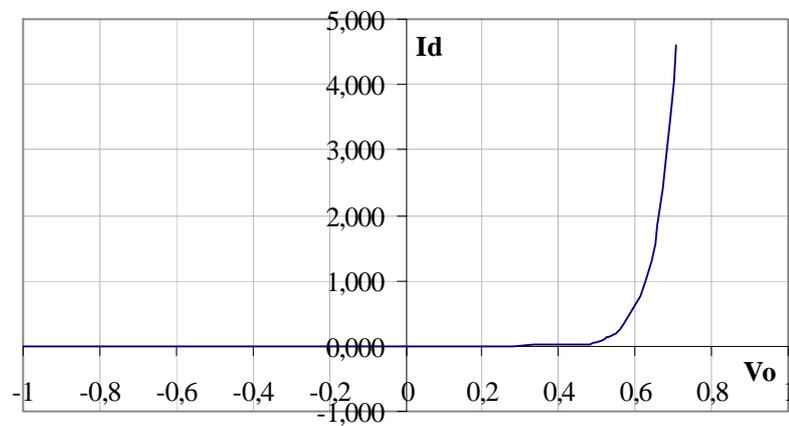
Tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{0,697 - 0,639}{9 - 4} = 0,0116$$



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica senza carico.



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica col carico.



Curva caratteristica sperimentale del diodo utilizzato.

## Calcolo dei valori teorici

Poiché  $V_i$  si ottiene tarando il generatore continuo variabile esattamente al valore richiesto, si assume tale valore sperimentale coincidente col valore teorico.

**Senza carico:**  $V_{is} = V_\gamma = 0,7V$

$$- V_i < V_{is} \Rightarrow V_o = V_i; V_R = 0; I_D = 0$$

$$- V_i \geq V_{is} \Rightarrow V_o = V_\gamma = 0,7V; V_R = V_i - V_o = V_i - 0,7V; I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1,8 \cdot 10^3}$$

**Col carico:**  $V_{is} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_\gamma = \left(1 + \frac{1,8 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3}\right) \cdot 0,7 = 1,96V$

$$- V_i < V_{is} \Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i = \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 1,8 \cdot 10^3} \cdot V_i = 0,357V_i;$$

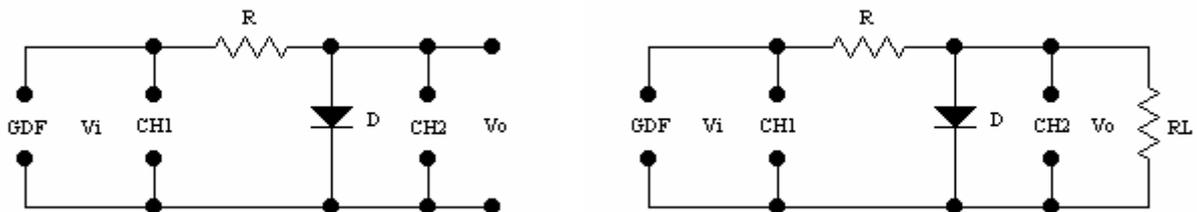
$$V_R = V_i - V_o = V_i - 0,357V_i = 0,643V_i; I_R = I_L = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R_L} = \frac{V_R}{1,8 \cdot 10^3} = \frac{V_o}{1 \cdot 10^3}; I_D = 0$$

$$- V_i \geq V_{is} \Rightarrow V_o = V_\gamma = 0,7V; V_R = V_i - V_o = V_i - 0,7V; I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1,8 \cdot 10^3}$$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{0,7}{1 \cdot 10^3} = 0,7mA; I_D = I_R - I_L$$

## VERIFICA IN ALTERNATA

Circuito di verifica senza carico e con carico.



Si inserisce in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza  $V_{iM} = 10V$  e frequenza  $f = 1kHz$ .

Prima senza carico, poi con il carico, si visualizzano gli oscillogrammi delle forme d'onda d'ingresso e d'uscita. Si fotografano gli oscillogrammi sia con i segnali sovrapposti sia con i segnali correlati (uno sopra l'altro) segnando i valori cui sono posizionate le manopole base tempi (ms/div) e la sensibilità verticale dei due canali (volt/div) dell'oscilloscopio.

Si passa alla scansione xy e si visualizza la curva caratteristica d'uscita. La si posiziona correttamente rispetto agli assi dello schermo e si agisce sulla sensibilità dei canali per ottimizzarne l'aspetto, si rileva la sensibilità dei due canali e si fotografa l'oscillogramma.

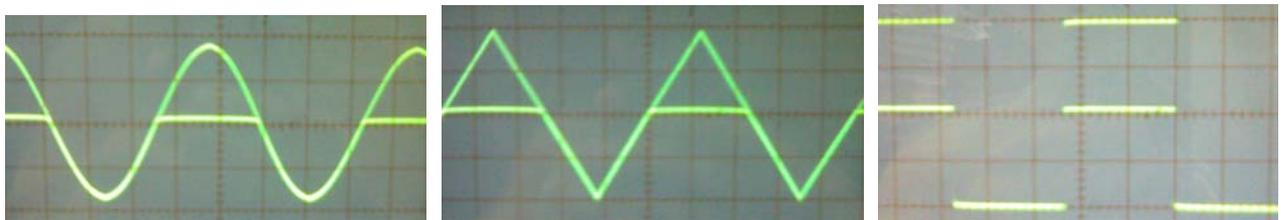
Si ripete il tutto inserendo in ingresso un'onda triangolare prima, e un'onda quadra poi, con stessa ampiezza e frequenza della sinusoidale.

Dell'onda quadra, venendo limitata solo la parte positiva, si ottiene in uscita un'onda quadra di ampiezza positiva circa nulla, ossia un'onda quadra a valore medio non nullo. Di tale segnale si misurerà il valore medio. Il valore medio si rileva misurando di quanto sale, in volt su divisioni, il segnale passando da ingresso DC a ingresso AC, ossia eliminando la componente continua (il valore medio).

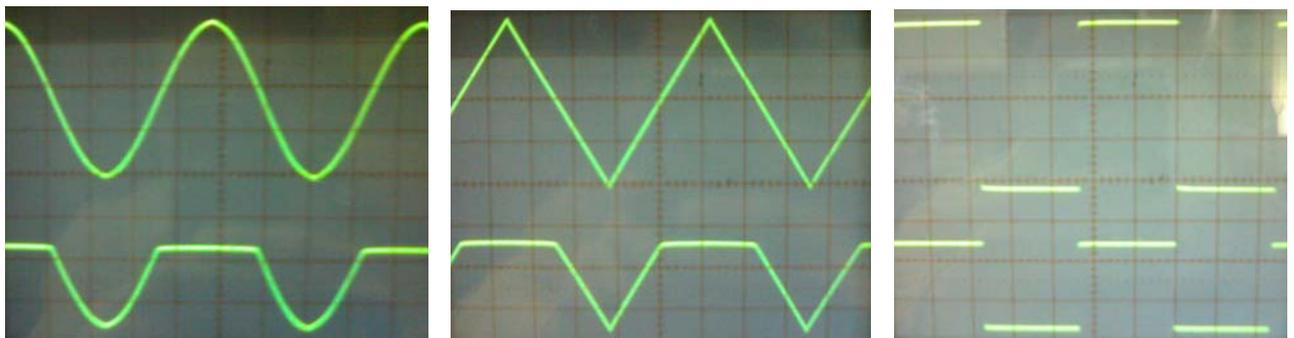
Salvo eventuale precisazione successiva, la base tempi è regolata a 0,2ms/div e i canali CH1 e CH2 a 5volt/div. Si riportano le foto degli oscillogrammi.

### Verifica senza carico

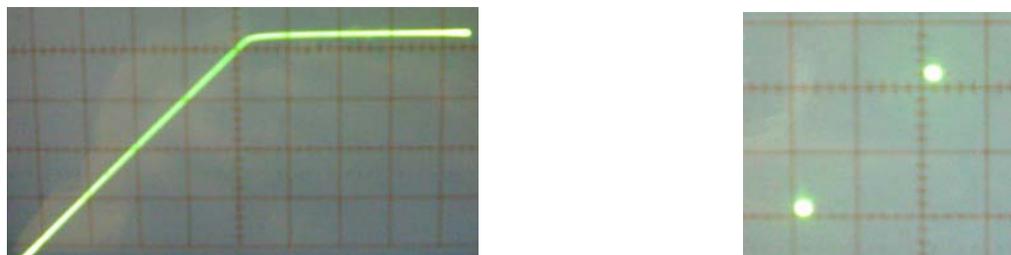
#### Oscillogrammi sovrapposti



#### Oscillogrammi correlati



#### Curva caratteristica d'uscita (sinusoidale 2volt/div e quadra 5volt/div)



#### Onda quadra sovrapposta con e senza valore medio (ingresso DC e ingresso AC)



Confrontando i due oscillogrammi e tenendo presente che ogni quadratino vale 5V, il segnale si sposta verso l'alto di circa un quadratino, ossia il valore medio è circa 5V.

### Verifica con carico

#### Oscillogrammi sovrapposti



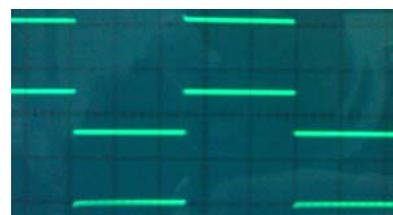
#### Oscillogrammi correlati



#### Curva caratteristica d'uscita (sinusoidale 2volt/div e quadra 5volt/div)



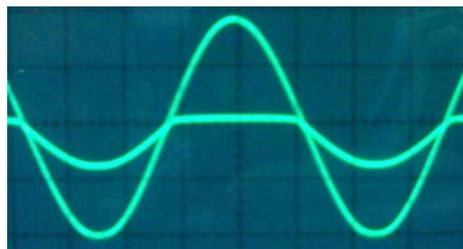
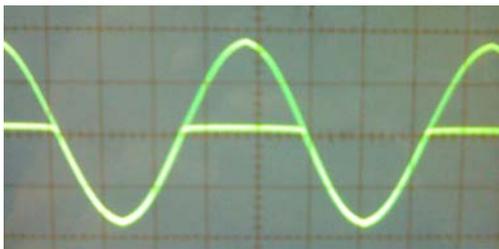
#### Onda quadra sovrapposta con e senza valore medio (ingresso DC e ingresso AC)



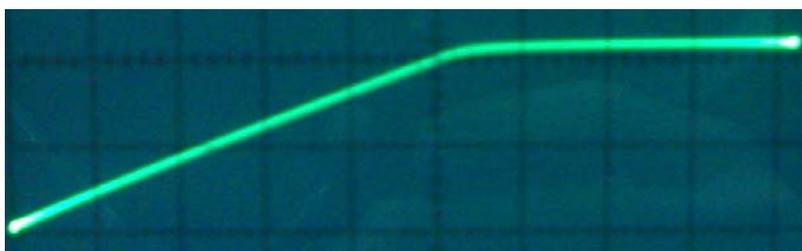
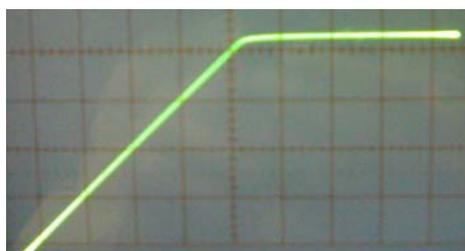
Confrontando i due oscillogrammi e tenendo presente che ogni quadratino vale 5V, il segnale si sposta verso l'alto di circa mezzo quadratino, ossia il valore medio è circa 2,5V.

#### Confronto degli oscillogrammi e rilievi.

L'oscillogramma a destra si riferisce ad uscita senza carico, quello a sinistra con uscita chiusa sul carico .



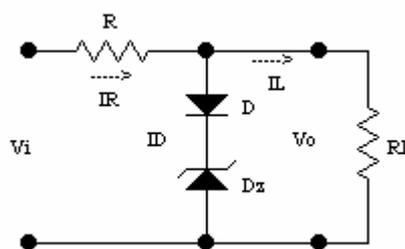
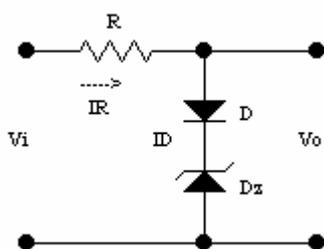
Senza carico, con il diodo interdetto, l'uscita riproduce l'ingresso, ossia il modulo della funzione di trasferimento vale 1; con il carico, con il diodo interdetto, il modulo della funzione di trasferimento assume il valore (dalle ampiezze d'ingresso e d'uscita)  $0,8/2 = 0,4$ . ovviamente, le misure oscillografiche non hanno una elevata precisione e sensibilità.



La pendenza della curva caratteristica d'uscita senza carico è  $m_{sc} = 4/4 = 1$ ; la pendenza della curva caratteristica d'uscita con carico è  $m_{cc} = 2/5 = 0,4$ .

### LIMITATORE SEMPLICE - LIMITAZIONE DELLA PARTE POSITIVA DELLA TENSIONE D'USCITA AD UN GENERICO VALORE

L'uscita viene limitata al valore  $V_z + V_\gamma = 4,3 + 0,7 = 5V$ .



In corrispondenza di  $V_{iMAX} = 10V$ , con uscita a vuoto, si fissa una corrente  $I_{DMAX} = 5mA$ . Assunti  $V_\gamma = 0,7V$ ,  $V_z = 4,3V$  e uscita aperta, si ha:

$$R = \frac{V_{iMAX} - V_z - V_\gamma}{I_{DMAX}} = \frac{10 - 4,3 - 0,7}{5 \cdot 10^{-3}} = 1k\Omega.$$

La tensione di soglia d'ingresso senza carico è  $V_z + V_\gamma = 5V$ . L'inserimento del carico dovrà produrre una variazione della tensione di soglia d'ingresso di circa 2V, portandola da 5V a 7V. Dalla funzione d'uscita con carico, posto  $V_o = V_z + V_\gamma$  e  $V_i = V_{is} = 7V$ , si ha:

$$V_z + V_\gamma = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is} \Rightarrow \frac{1}{1 + \frac{R}{R_L}} = \frac{V_z + V_\gamma}{V_{is}} \Rightarrow 1 + \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is}}{V_z + V_\gamma} \Rightarrow$$

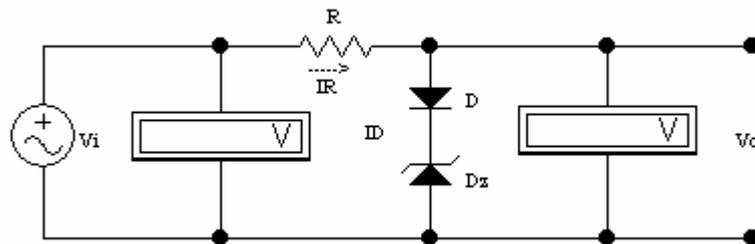
$$\Rightarrow \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is}}{V_z + V_\gamma} - 1 \Rightarrow \frac{R_L}{R} = \frac{1}{\frac{V_{is}}{V_\gamma} - 1} \Rightarrow R_L = \frac{R}{\frac{V_{is}}{V_\gamma} - 1} = \frac{1 \cdot 10^3}{\frac{7}{5} - 1} = 2,5k\Omega \rightarrow 2,7k\Omega.$$

Con tale valore, si ha:  $V_{is} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right)(V_z + V_\gamma) = \left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{2,7 \cdot 10^3}\right) \cdot 5 = 6,85V$ .

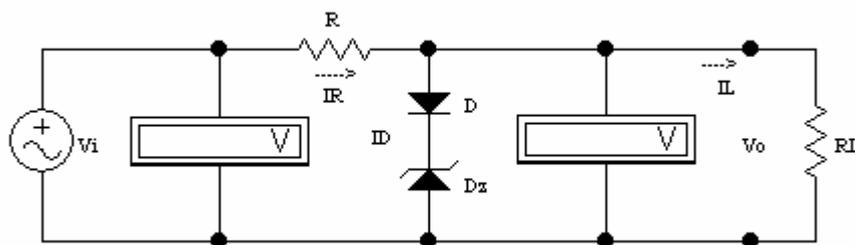
Riassumendo:  $R = 1k\Omega$ ;  $R_L = 2,7k\Omega$ ; D: 1N4148;  $D_z$ : 4,3V 1/2W

## VERIFICA IN CONTINUA

Circuito di verifica senza carico.



Circuito di verifica con carico.



Si riportano nelle tabelle i valori misurati e quelli calcolati.

Si riportano i punti ( $V_i$ ;  $V_o$ ), sperimentali e teorici, sia senza carico sia con carico, su due grafici distinti  $V_i$ - $V_o$  e si tracciano, sullo stesso grafico, le curve caratteristiche sperimentale e teorica, per un immediato confronto. Della caratteristica sperimentale si rileva la pendenza (coefficiente angolare) scegliendo, nei tratti rettilinei, due opportune coppie di punti.

Poiché la tensione  $V_o$  coincide con la differenza di potenziale ai capi del ramo con i diodi ( $V_D$ ), riportando su un grafico  $I_D$  in funzione di  $V_o$ , si ottiene la curva rappresentativa della variazione della corrente nel ramo con i diodi, e, quindi, una valutazione del suo comportamento sia durante la semionda positiva sia durante la semionda negativa..

Senza carico $R_L$						
volt	Valori misurati			Valori calcolati		
	volt		mA	volt		mA
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_D$
-10	-10	0	0	-10	0	0
-8	-8	0	0	-8	0	0
-6	-6	0	0	-6	0	0
-4	-4	0	0	-4	0	0
-2	-2	0	0	-2	0	0
-1	-1	0	0	-1	0	0
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0
3	2,944	0,056	0,056	3	0	0
4	3,647	0,353	0,353	4	0	0
4,5	3,884	0,616	0,616	4,5	0	0
4,7	3,962	0,783	0,783	4,7	0	0
4,8	4,00	0,80	0,80	4,8	0	0
4,9	4,039	0,861	0,861	4,9	0	0
5,0	4,068	0,932	0,932	5,0	0	0
5,1	4,10	1,00	1,00	5,0	0,1	0,1
5,2	4,132	1,068	1,068	5,0	0,2	0,2
5,3	4,161	1,139	1,139	5,0	0,3	0,3
5,5	4,217	1,283	1,283	5,0	0,5	0,5
6	4,338	1,662	1,662	5,0	1	1
7	4,530	2,47	2,47	5,0	2	2
8	4,672	3,328	3,328	5,0	3	3
9	4,781	4,22	4,22	5,0	4	4
10	4,787	5,273	5,273	5,0	5	5

Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-10 ; -10) e B(0 ; 0) per il tratto obliquo; i punti C(5 ; 4,068) e D(10 ; 4,787) per il tratto orizzontale.

Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{0 - (-10)}{0 - (-10)} = 1$$

Tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{4,787 - 4,068}{10 - 5} = 0,1438$$

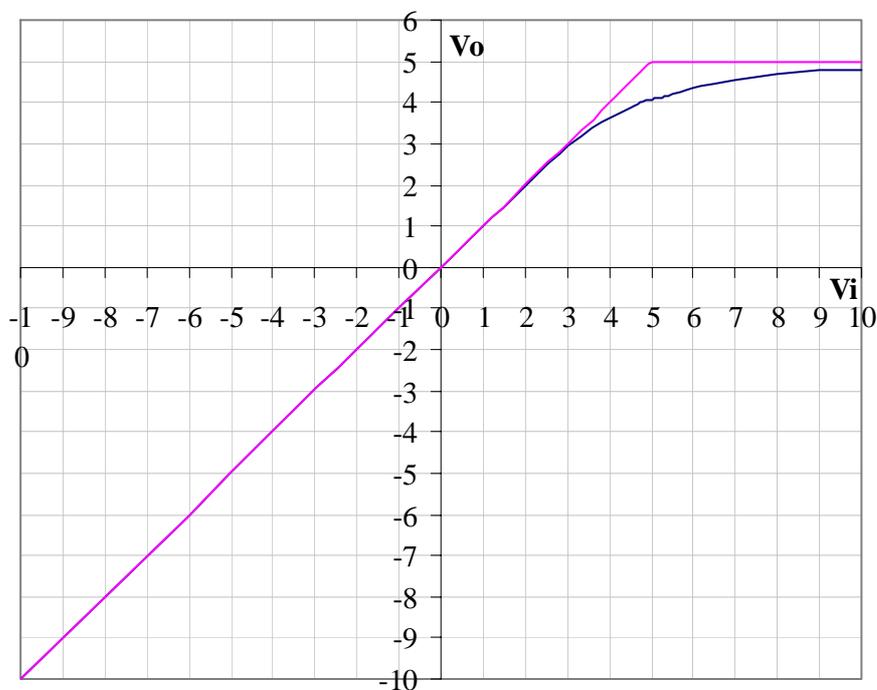
Con carico $R_L$										
volt	Valori misurati					Valori calcolati				
	volt		mA			volt		mA		
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$
-10	-7,306	-2,694	-2,694	-2,706	0	-7,3	-2,7	-2,7	-2,7	0
-8	-5,845	-2,155	-2,155	-2,156	0	-5,84	-2,16	-2,16	-2,16	0
-6	-4,384	-1,616	-1,616	-1,624	0	-4,38	-1,62	-1,62	-1,62	0
-4	-2,925	-1,075	-1,075	-1,083	0	-2,92	-1,08	-1,08	-1,08	0
-2	-1,461	-0,539	-0,539	-0,541	0	-1,46	-0,54	-0,54	-0,54	0

-1	-0,732	-0,268	-0,268	-0,271	0	-0,70	-0,27	-0,27	-0,27	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,732	0,268	0,268	0,271	0	0,73	0,27	0,27	0,27	0
3	2,164	0,806	0,806	0,812	0	2,19	0,81	0,81	0,81	0
5	3,486	1,514	1,514	1,291	0,223	3,65	1,35	1,35	1,35	0
6	3,910	2,09	2,09	1,448	0,642	4,38	1,62	1,62	1,62	0
6,5	4,067	2,433	2,433	1,506	0,927	4,745	1,755	1,755	1,755	0
6,6	4,094	2,506	2,506	1,561	0,945	4,818	1,782	1,782	1,782	0
6,7	4,121	2,579	2,579	1,526	1,053	4,891	1,809	1,809	1,809	0
6,8	4,147	2,653	2,653	1,536	1,117	4,964	1,836	1,836	1,836	0
6,9	4,174	2,726	2,726	1,546	1,180	5	1,9	1,9	1,852	0,048
7	4,197	2,803	2,803	1,554	1,249	5	2	2	1,852	0,148
7,1	4,221	2,879	2,879	1,563	1,316	5	2,1	2,1	1,852	0,248
7,2	4,244	2,956	2,956	1,572	1,384	5	2,2	2,2	1,852	0,342
8	4,404	3,596	3,596	1,631	1,895	5	3	3	1,852	1,148
9	4,559	4,441	4,441	1,688	2,753	5	4	4	1,852	3,148
10	4,681	5,319	5,319	1,734	3,585	5	5	5	1,852	3,148

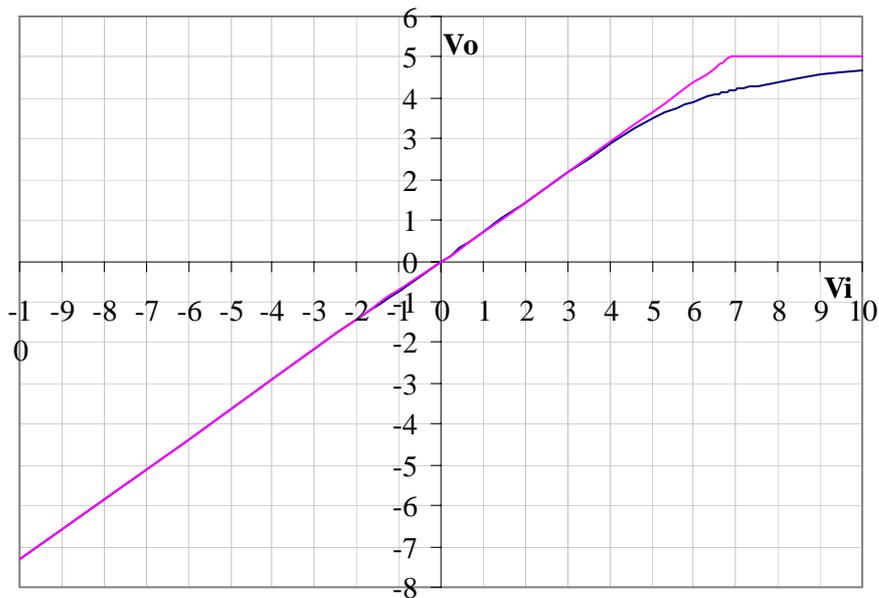
Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-10 ; -7,306) e B(0 ; 0) per il tratto obliquo; i punti C(5 ; 3,486) e D(10 ; 4,681) per il tratto orizzontale.

Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{7,306}{10} = 0,7306$$

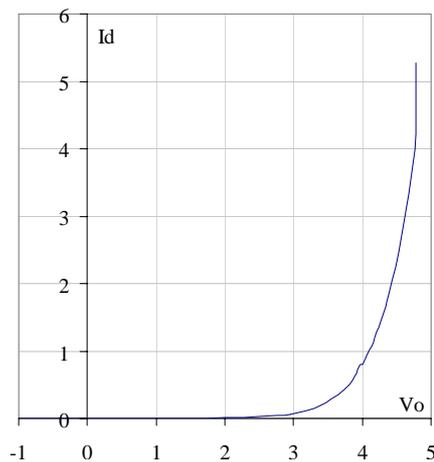
Tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{4,681 - 3,486}{10 - 5} = 0,239$$



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica senza carico.



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica con carico.



Andamento della corrente nel ramo con i diodi in funzione della tensione ai suoi capi.

### Calcolo dei valori teorici

Poiché  $V_i$  si ottiene tarando il generatore continuo variabile esattamente al valore richiesto, si assume tale valore sperimentale coincidente col valore teorico.

**Senza carico:**  $V_{is} = V_z + V_\gamma = 4,3 + 0,7 = 5V$

–  $V_i < V_{is} \Rightarrow V_o = V_i; V_R = 0; I_D = 0$

–  $V_i \geq V_{is} \Rightarrow V_o = V_z + V_\gamma = 5V; V_R = V_i - V_o = V_i - 5V; I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_i - 5}{1 \cdot 10^3}$

**Col carico:**  $V_{is} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right)(V_z + V_\gamma) = \left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{2,7 \cdot 10^3}\right) \cdot (4,3 + 0,7) = 6,85V$

$$- V_i < V_{is} \Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i = \frac{2,7 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 2,7 \cdot 10^3} \cdot V_i = 0,73 V_i;$$

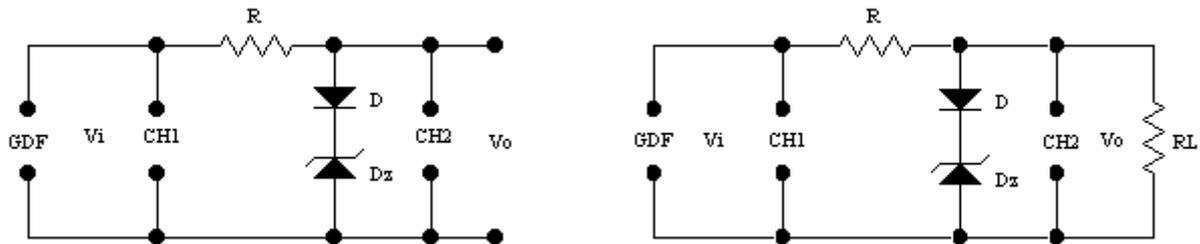
$$V_R = V_i - V_o = V_i - 0,73 V_i = 0,27 V_i; \quad I_R = I_L = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R_L} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3} = \frac{V_o}{2,7 \cdot 10^3}; \quad I_D = 0$$

$$- V_i \geq V_{is} \Rightarrow V_o = V_z + V_\gamma = 5V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i - 5V; \quad I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3}$$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{5}{2,7 \cdot 10^3} = 1,852 \text{mA}; \quad I_D = I_R - I_L$$

## VERIFICA IN ALTERNATA

Circuito di verifica senza carico e con carico.



Si inserisce in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza  $V_{iM} = 10V$  e frequenza  $f = 1kHz$ .

Prima senza carico, poi con il carico, si visualizzano gli oscillogrammi delle forme d'onda d'ingresso e d'uscita. Si fotografano gli oscillogrammi sia con i segnali sovrapposti sia con i segnali correlati (uno sopra l'altro) segnando i valori cui sono posizionate le manopole base tempi (ms/div) e la sensibilità verticale dei due canali (volt/div) dell'oscilloscopio.

Si passa alla scansione xy e si visualizza la curva caratteristica d'uscita. La si posiziona correttamente rispetto agli assi dello schermo e si agisce sulla sensibilità dei canali per ottimizzarne l'aspetto, si rileva la sensibilità dei due canali e si fotografa l'oscillogramma.

Si ripete il tutto inserendo in ingresso un'onda triangolare prima, e un'onda quadra poi, con stessa ampiezza e frequenza della sinusoidale.

Dell'onda quadra, venendo limitata solo la parte positiva, si ottiene in uscita un'onda quadra di ampiezza positiva circa nulla, ossia un'onda quadra a valore medio non nullo. Di tale segnale si misurerà il valore medio. Il valore medio si rileva misurando di quanto sale, in volt su divisioni, il segnale passando da ingresso DC a ingresso AC, ossia eliminando la componente continua (il valore medio).

Salvo eventuale precisazione successiva, la base tempi è regolata a 0,2ms/div e i canali CH1 e CH2 a 5volt/div. Si riportano le foto degli oscillogrammi.

### Verifica senza carico

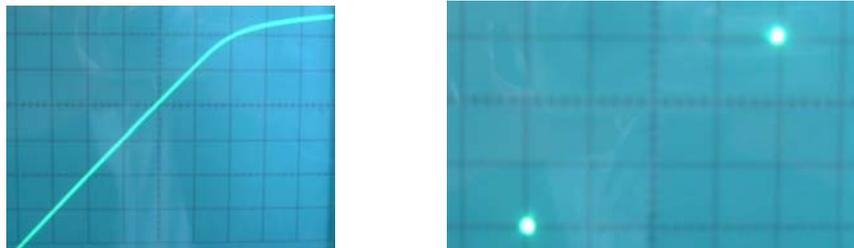
#### Oscillogrammi sovrapposti



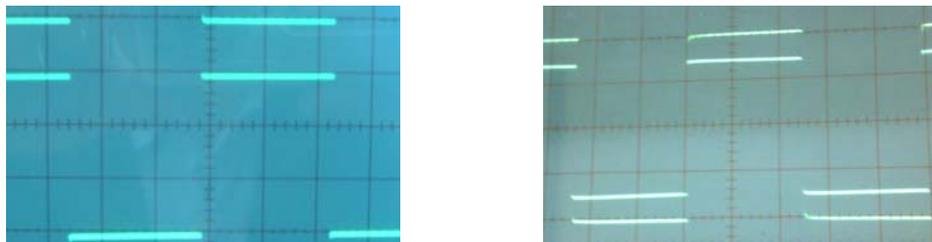
**Oscillogrammi correlati**



**Curva caratteristica d'uscita (sinusoidale 2volt/div e quadra 5volt/div)**



**Onda quadra sovrapposta con e senza valore medio (ingresso DC e ingresso AC)**



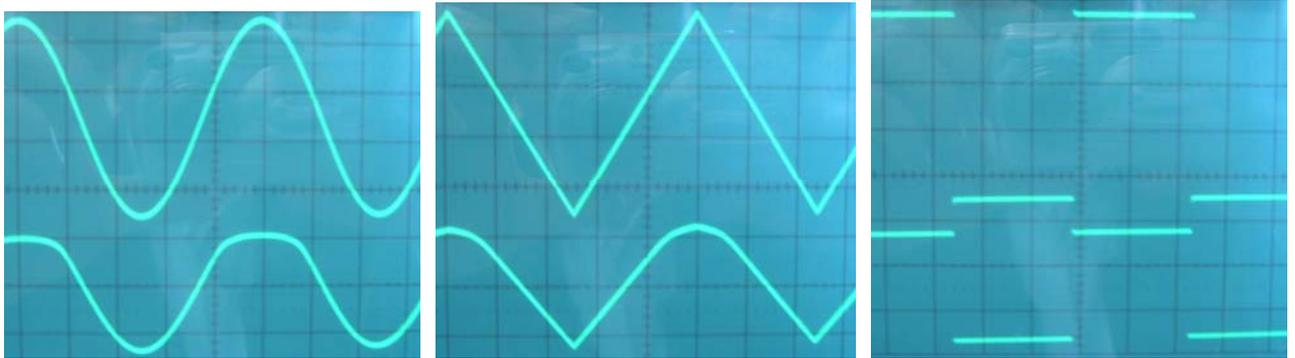
Confrontando i due oscillogrammi e tenendo presente che ogni quadratino vale 5V, il segnale si sposta verso l'alto di circa mezzo quadratino, ossia il valore medio è circa 2,5V.

**Verifica con carico**

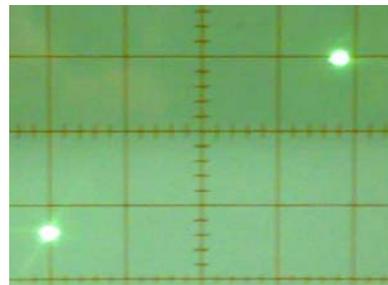
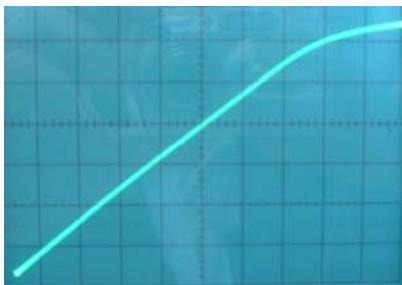
**Oscillogrammi sovrapposti**



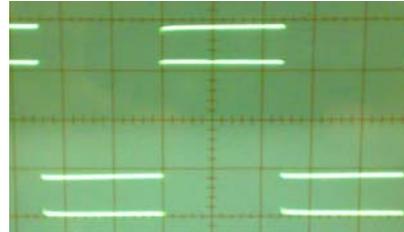
## Oscillogrammi correlati



Curva caratteristica d'uscita (sinusoidale 2volt/div e quadra 5volt/div)



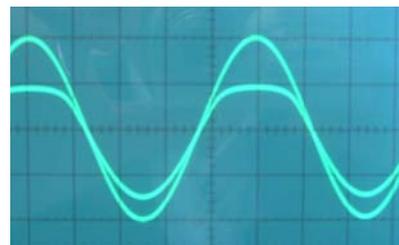
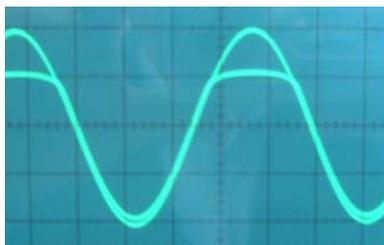
Onda quadra sovrapposta con e senza valore medio (ingresso DC e ingresso AC)



Confrontando i due oscillogrammi e tenendo presente che ogni quadratino vale 5V, il segnale si sposta verso l'alto di circa 0,3 quadratini, ossia il valore medio è circa 1,5V.

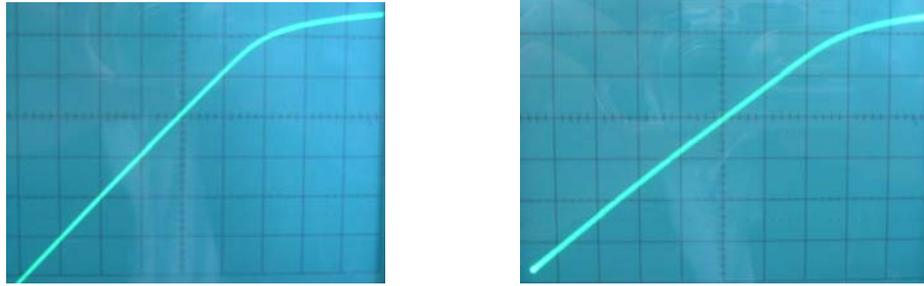
## Confronto degli oscillogrammi e rilievi.

L'oscillogramma a destra si riferisce ad uscita senza carico, quello a sinistra con uscita chiusa sul carico .



Senza carico, con il diodo interdetto, l'uscita riproduce l'ingresso, ossia il modulo della funzione di trasferimento vale 1; con il carico, con il diodo interdetto, il modulo della funzione di trasferimento

assume il valore (dalle ampiezze d'ingresso e d'uscita)  $0,75/2 = 0,375$ . ovviamente, le misure oscillografiche non hanno una elevata precisione e sensibilità.

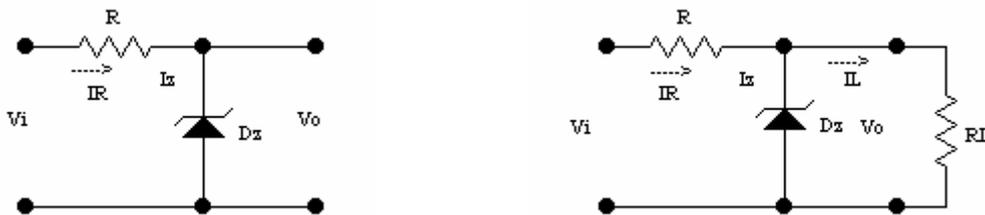


La pendenza della curva caratteristica d'uscita senza carico è  $m_{sc} = 4/4 = 1$ ; La pendenza della curva caratteristica d'uscita con carico è  $m_{cc} = 3/3,75 = 0,8$ .

**LIMITATORE DOPPIO - LIMITAZIONE DELLA PARTE NEGATIVA DELLA TENSIONE D'USCITA AL VALORE  $-V_\gamma$ ; LIMITAZIONE DELLA PARTE POSITIVA DELLA TENSIONE D'USCITA AD UN GENERICO VALORE.**

L'uscita viene limitata tra  $-V_\gamma = -0,7V$  e  $V_z = 4,3V$ .

Si hanno due soglie d'ingresso:  $V_{is1}$  quando  $V_o = -V_\gamma$ ;  $V_{is2}$  quando  $V_o = V_z$ .



Il caso più sfavorevole, nel dimensionare la resistenza R, è con uscita aperta e diodo in conduzione inversa. In corrispondenza di  $V_{iMAX} = 10V$ , si fissa una corrente  $I_{zMAX} = 5mA$ . Assunto  $V_o = V_z = 4,3V$  e uscita aperta, si ha:

$$R = \frac{V_{iMAX} - V_z}{I_{zMAX}} = \frac{10 - 4,3}{5 \cdot 10^{-3}} = 1,14k\Omega \rightarrow 1,2k\Omega.$$

L'inserimento del carico dovrà produrre uno spostamento della tensione di soglia d'ingresso di circa 2V con il diodo zener polarizzato inversamente. Dalla funzione d'uscita con carico, posto  $V_o = V_z = 4,3V$  e  $V_i = V_{is2} = 6V$ , si ha:

$$V_z = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is2} \Rightarrow \frac{1}{1 + \frac{R}{R_L}} = \frac{V_z}{V_{is2}} \Rightarrow 1 + \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is2}}{V_z} \Rightarrow \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is2}}{V_z} - 1 \Rightarrow .$$

$$\Rightarrow \frac{R_L}{R} = \frac{1}{\frac{V_{is2}}{V_z} - 1} \Rightarrow R_L = \frac{R}{\frac{V_{is2}}{V_z} - 1} = \frac{1,2 \cdot 10^3}{\frac{6}{4,3} - 1} = 3,04 \text{k}\Omega \rightarrow 3,3 \text{k}\Omega.$$

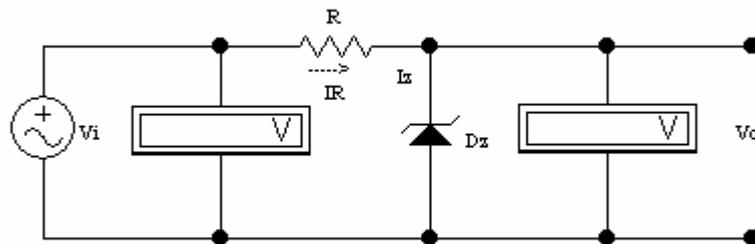
Con tale valore, si ha: 
$$V_{is1} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) (-V_\gamma) = -\left(1 + \frac{1,2 \cdot 10^3}{3,3 \cdot 10^3}\right) \cdot 0,7 = -0,954 \text{V}.$$

$$V_{is2} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_z = \left(1 + \frac{1,2 \cdot 10^3}{3,3 \cdot 10^3}\right) \cdot 4,3 = 5,86 \text{V}$$

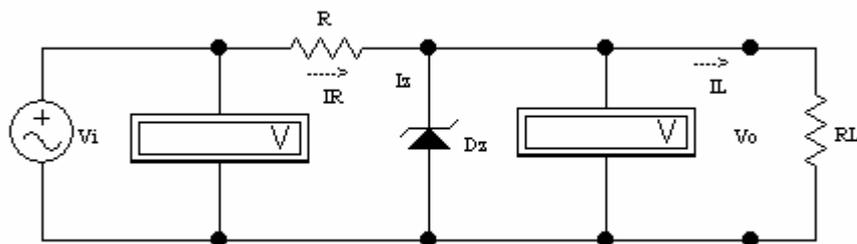
Riassumendo:  $R = 1,2 \text{k}\Omega$  ;  $R_L = 3,3 \text{k}\Omega$  ;  $D_z$ : 4,3V 1/2W.

## VERIFICA IN CONTINUA

Circuito di verifica senza carico.



Circuito di verifica con carico.



Si riportano nelle tabelle i valori misurati e quelli calcolati.

Si riportano i punti ( $V_i$  ;  $V_o$ ), sperimentali e teorici, sia senza carico sia con carico, su due grafici distinti  $V_i$ - $V_o$  e si tracciano, sullo stesso grafico, le curve caratteristiche sperimentale e teorica, per un immediato confronto. Della caratteristica sperimentale si rileva la pendenza (coefficiente angolare) scegliendo, nei tratti rettilinei, due opportune coppie di punti.

Poiché la tensione  $V_o$  coincide con la differenza di potenziale ai capi del diodo zener ( $V_D$ ), riportando su un grafico  $I_z$  in funzione di  $V_o$ , si ottiene la curva caratteristica del diodo zener utilizzato, e, quindi, una valutazione del suo comportamento sia in polarizzazione diretta che inversa.

Senza carico $R_L$						
	Valori misurati			Valori calcolati		
volt	volt		mA	volt		mA
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_D$
-9	-0,775	-8,225	-6,854	-0,7	-8,3	-6,93
-8	-0,77	-7,23	-6,025	-0,7	-7,3	-6,08
-7	-0,764	-6,236	-5,20	-0,7	-6,3	-5,25
-6	-0,758	-5,242	-4,368	-0,7	-5,3	-4,42
-4	-0,74	-3,26	-2,717	-0,7	-3,3	-2,75
-2	-0,704	-1,296	-1,080	-0,7	-2,3	-1,08
-1	-0,645	-0,355	-0,296	-0,7	-0,3	-0,25
-0,8	-0,613	-0,187	-0,156	-0,7	-0,1	-0,083
-0,7	-0,587	-0,133	-0,094	-0,7	0	0
-0,6	-0,548	-0,052	-0,043	-0,6	0	0
-0,5	-0,484	-0,016	-0,013	-0,5	0	0
-0,3	-0,3	0	0	-0,3	0	0
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0
2	1,996	0,004	0,0034	2	0	0
3	2,8	0,20	0,167	3	0	0
3,5	3,068	0,432	0,36	3,5	0	0
3,8	3,197	0,603	0,349	3,8	0	0
4	3,266	0,734	0,612	4	0	0
4,2	3,333	0,67	0,723	4,2	0	0
4,4	3,392	1,008	0,840	4,3	0,1	0,083
5	3,546	1,454	1,212	4,3	0,7	0,583
6	3,735	2,265	1,887	4,3	1,7	1,42
8	3,978	4,022	3,352	4,3	3,7	3,08
10	4,140	5,86	4,883	4,3	5,7	4,75

Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-9 ; -0,775) e B(-1 ; -0,645) per il primo tratto orizzontale; i punti C(5 ; 3,546) e D(10 ; 4,140) per il secondo tratto orizzontale; i punti E(-0,5 ; -0,484) e F(2 ; 1,996) per il tratto obliquo.

Primo tratto orizzontale: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{-0,645 + 0,775}{-1 + 9} = 0,016$$

Secondo tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{4,140 - 3,546}{10 - 5} = 0,119$$

Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{1,996 + 0,484}{2 + 0,5} = 0,992$$

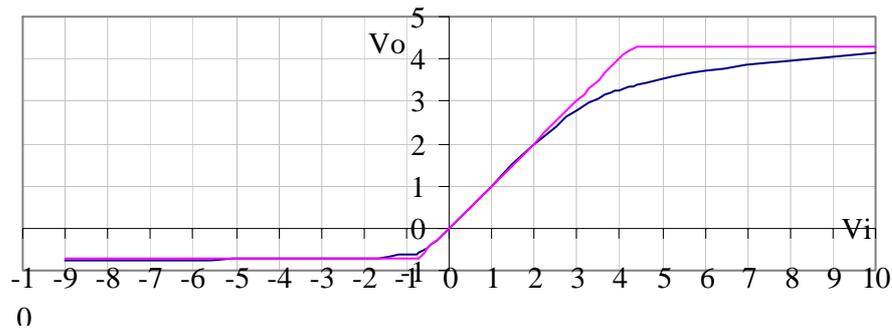
Con carico $R_L$										
volt	Valori misurati					Valori calcolati				
	volt		mA			volt		mA		
	$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_R$	$I_L$
-10	-0,775	-9,225	-7,688	-0,235	-7,453	-0,7	-9,3	-7,75	-0,212	-7,538
-8	-0,767	-7,233	-6,028	-0,232	-5,796	-0,7	-7,3	-6,08	-0,212	-5,868
-6	-0,757	-5,243	-4,369	-0,229	-4,167	-0,7	-5,3	-4,42	-0,212	-4,208
-4	-0,734	-3,257	-2,741	-0,225	-2,516	-0,7	-3,3	-2,75	-0,212	-2,538
-2	-0,712	-1,288	-1,073	-0,216	-0,857	-0,7	-1,3	-1,08	-0,212	-0,868
-1,4	-0,688	-0,712	-0,593	-0,208	-0,385	-0,7	-0,7	-0,58	-0,212	-0,368
-1,1	-0,661	-0,439	-0,366	-0,200	-0,166	-0,7	-0,4	-0,33	-0,212	-0,118
-1	-0,643	-0,357	-0,298	-0,195	-0,103	-0,7	-0,3	-0,25	-0,212	-0,038
-0,9	-0,615	-0,285	-0,238	-0,186	-0,052	-0,66	-0,24	-0,20	-0,20	0
-0,8	-0,570	-0,230	-0,192	-0,173	-0,019	-0,586	-0,21	-0,175	-0,178	0
-0,5	-0,371	-0,129	-0,107	-0,112	0	-0,366	-0,13	-0,108	-0,11	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,715	0,285	0,238	0,217	0,021	0,733	0,267	0,22	0,222	0
3	1,983	1,017	0,848	0,601	0,247	2,2	0,80	0,67	0,67	0
5	2,908	2,092	1,743	0,881	0,862	3,66	1,33	1,108	1,11	0
5,5	3,070	2,430	2,025	0,930	1,095	4,03	1,47	1,125	1,22	0
5,7	3,131	2,569	2,141	0,949	1,192	4,18	1,52	1,267	1,27	0
5,8	3,158	2,642	2,202	0,957	1,245	4,25	1,55	1,292	1,29	0
5,9	3,185	2,715	2,263	0,965	1,298	4,3	1,6	1,33	1,3	0,03
6	3,211	2,789	2,324	0,973	1,351	4,3	1,7	1,42	1,3	0,12
6,1	3,237	2,863	2,386	0,981	1,405	4,3	1,8	1,50	1,3	0,20
6,2	3,262	2,938	2,448	0,988	1,460	4,3	1,9	1,58	1,3	0,28
7	3,437	3,563	2,969	1,041	1,928	4,3	2,7	2,25	1,3	0,95
8	3,609	4,391	3,569	1,094	2,475	4,3	3,7	3,08	1,3	1,78
9	3,742	5,250	4,382	1,134	3,248	4,3	4,7	3,92	1,3	2,62
10	3,851	6,149	5,124	1,167	3,957	4,3	5,7	4,75	1,3	3,45

Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-10 ; -0,775) e B(-1 ; -0,643) per il primo tratto orizzontale; i punti C(5 ; 2,908) e D(10 ; 3,851) per il secondo tratto orizzontale; i punti E(-0,5 ; -0,371) e F(3 ; 1,983) per il tratto obliquo.

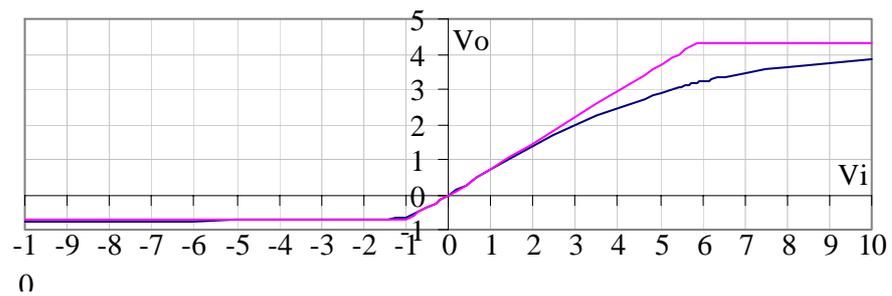
Primo tratto orizzontale: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{-0,643 + 0,775}{-1 + 10} = 0,015$$

Secondo tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{3,851 - 2,908}{10 - 5} = 0,189$$

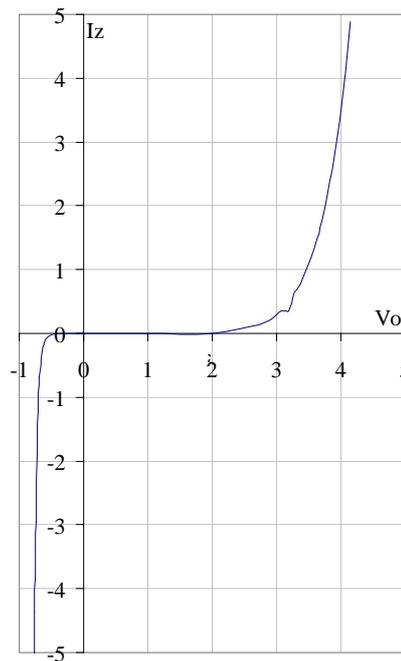
Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{1,983 + 0,371}{3 + 0,5} = 0,673$$



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica senza carico.



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica col carico.



Curva caratteristica sperimentale del diodo utilizzato.

### Calcolo dei valori teorici

Poiché  $V_i$  si ottiene tarando il generatore continuo variabile esattamente al valore richiesto, si assume tale valore sperimentale coincidente col valore teorico.

**Senza carico:**  $V_{is1} = -V_\gamma = -0,7V$  ;  $V_{is2} = V_z = 4,3V$

$$- V_i \leq V_{is1} \Rightarrow V_o = -V_\gamma = -0,7V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i + 0,7V; \quad I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1,2 \cdot 10^3}$$

$$- V_{is1} < V_i < V_{is2} \Rightarrow V_o = V_i; \quad V_R = 0; \quad I_D = 0$$

$$- V_i \geq V_{is2} \Rightarrow V_o = V_z = 4,3V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i - 4,3V; \quad I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1,2 \cdot 10^3}$$

**Col carico:**  $V_{is1} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_\gamma = -\left(1 + \frac{1,2 \cdot 10^3}{3,3 \cdot 10^3}\right) \cdot 0,7 = 0,954V$

$$V_{is2} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_z = \left(1 + \frac{1,2 \cdot 10^3}{3,3 \cdot 10^3}\right) \cdot 4,3 = 5,86V$$

$$- V_i \leq V_{is1} \Rightarrow V_o = -V_\gamma = -0,7V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i + 0,7V; \quad I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1,2 \cdot 10^3}$$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{-0,7}{3,3 \cdot 10^3} = -0,212mA; \quad I_D = I_R - I_L$$

$$- V_{is1} < V_i < V_{is2} \Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i = \frac{3,3 \cdot 10^3}{1,2 \cdot 10^3 + 3,3 \cdot 10^3} \cdot V_i = 0,733V_i;$$

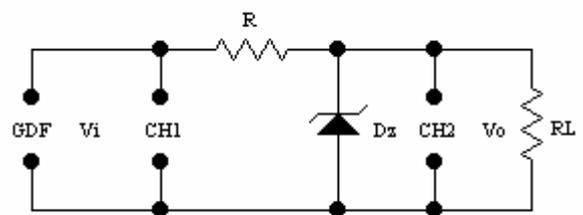
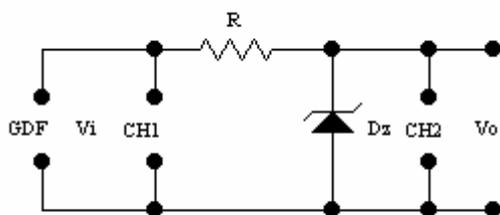
$$V_R = V_i - V_o = V_i - 0,733V_i = 0,267V_i; \quad I_R = I_L = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R_L} = \frac{V_R}{1,2 \cdot 10^3} = \frac{V_o}{3,3 \cdot 10^3}; \quad I_D = 0$$

$$- V_i \geq V_{is2} \Rightarrow V_o = V_z = 4,3V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i - 4,3V; \quad I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1,2 \cdot 10^3}$$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{4,3}{3,3 \cdot 10^3} = 0,1,3mA; \quad I_D = I_R - I_L$$

## VERIFICA IN ALTERNATA

Circuito di verifica senza carico e con carico.



Si inserisce in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza  $V_{iM} = 10V$  e frequenza  $f = 1kHz$ . Prima senza carico, poi con il carico, si visualizzano gli oscillogrammi delle forme d'onda d'ingresso e d'uscita. Si fotografano gli oscillogrammi sia con i segnali sovrapposti sia con i segnali correlati (uno sopra l'altro) segnando i valori cui sono posizionate le manopole base tempi (ms/div) e la sensibilità verticale dei due canali (volt/div) dell'oscilloscopio.

Si passa alla scansione xy e si visualizza la curva caratteristica d'uscita. La si posiziona correttamente rispetto agli assi dello schermo e si agisce sulla sensibilità dei canali per ottimizzarne l'aspetto, si rileva la sensibilità dei due canali e si fotografa l'oscillogramma.

Si ripete il tutto inserendo in ingresso un'onda triangolare prima, e un'onda quadra poi, con stessa ampiezza e frequenza della sinusoidale.

Dell'onda quadra, venendo limitata solo la parte positiva, si ottiene in uscita un'onda quadra di ampiezza positiva circa nulla, ossia un'onda quadra a valore medio non nullo. Di tale segnale si misurerà il valore medio. Il valore medio si rileva misurando di quanto sale, in volt su divisioni, il segnale passando da ingresso DC a ingresso AC, ossia eliminando la componente continua (il valore medio).

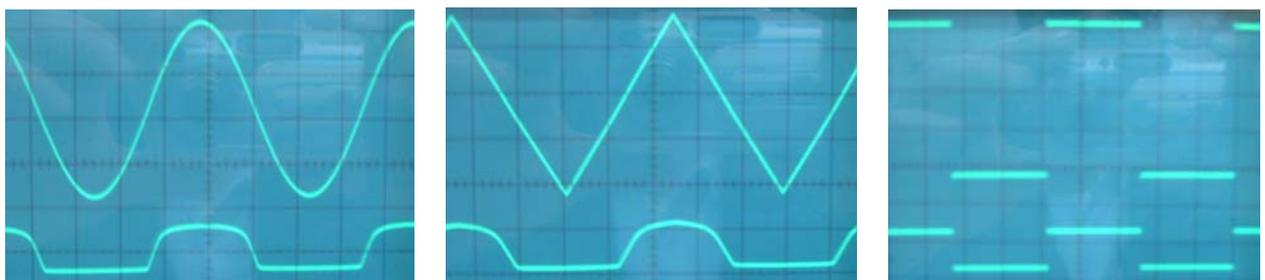
Salvo eventuale precisazione successiva, la base tempi è regolata a 0,2ms/div e i canali CH1 e CH2 a 5volt/div. Si riportano le foto degli oscillogrammi.

## Verifica senza carico

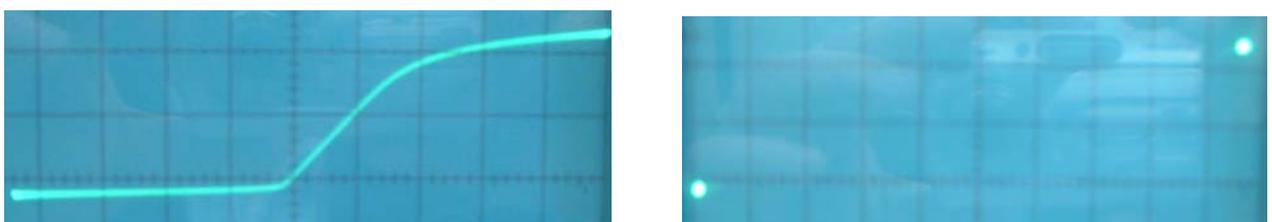
### Oscillogrammi sovrapposti



### Oscillogrammi correlati

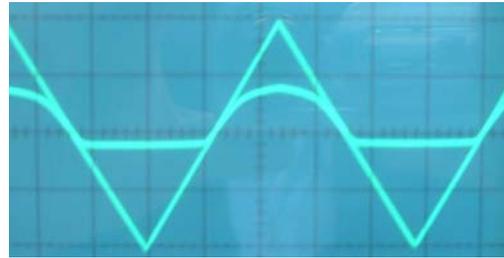
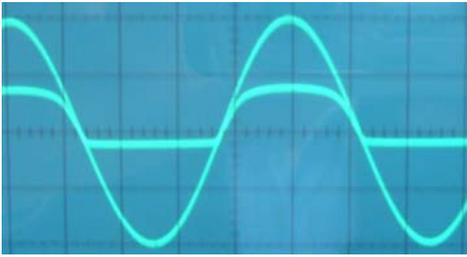


### Curva caratteristica d'uscita (CH1 2volt/div; CH2 5volt/div)

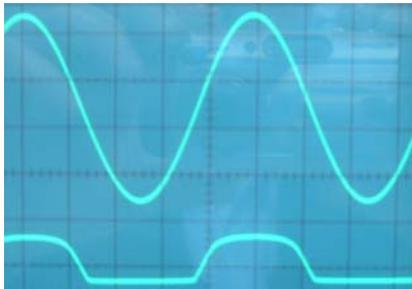


## Verifica con carico

### Oscillogrammi sovrapposti



### Oscillogrammi correlati

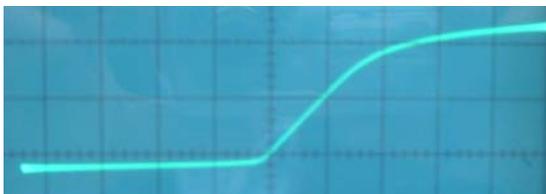


### Curva caratteristica d'uscita (CH1 2volt/div e CH2 5volt/div)



### Confronto degli oscillogrammi e rilievi.

L'oscillogramma a destra si riferisce ad uscita senza carico, quello a sinistra con uscita chiusa sul carico.

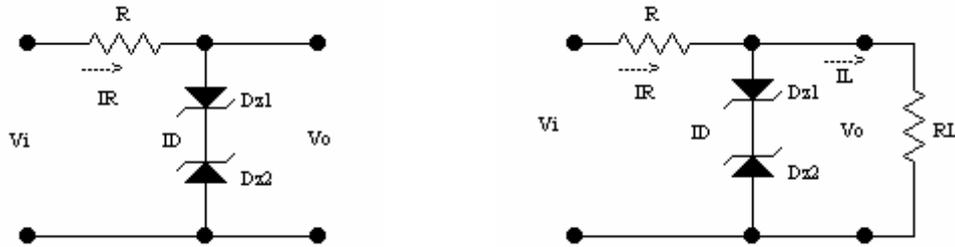


La pendenza della curva caratteristica d'uscita senza carico è  $m_{sc} = 1/1 = 1$ ; la pendenza della curva caratteristica d'uscita con carico è  $m_{cc} = 0,8/1 = 0,8$ .

## LIMITATORE DOPPIO - LIMITAZIONE DELLA TENSIONE D'USCITA TRA DUE GENERICI VALORI.

L'uscita viene limitata tra  $-(V_z + V_\gamma) = -5V$  e  $+(V_z + V_\gamma) = +5V$ .

Si hanno due soglie d'ingresso:  $V_{is1}$  quando  $V_o = -(V_z + V_\gamma) = -5V$ ;  $V_{is2}$  quando  $V_o = V_z + V_\gamma = +5V$ .



Il caso più sfavorevole, nel dimensionare la resistenza R, è con uscita aperta e ramo con i diodi in conduzione. In corrispondenza di  $V_{iMAX} = 10V$ , si fissa una corrente  $I_{DMAX} = 5mA$ . Assunto  $V_o = V_z + V_\gamma = +5V$  e uscita aperta, si ha:

$$R = \frac{V_{iMAX} - V_z - V_\gamma}{I_{DMAX}} = \frac{10 - 4,3 - 0,7}{5 \cdot 10^{-3}} = 1k\Omega.$$

L'inserimento del carico dovrà produrre uno spostamento della tensione di soglia d'ingresso di circa 2V con il diodo zener polarizzato inversamente. Dalla funzione d'uscita con carico, posto  $V_o = V_z + V_\gamma = +5V$  e  $V_i = V_{is2} = 7V$ , si ha:

$$V_z + V_\gamma = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is2} \Rightarrow \frac{1}{1 + \frac{R}{R_L}} = \frac{V_z + V_\gamma}{V_{is2}} \Rightarrow 1 + \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is2}}{V_z + V_\gamma} \Rightarrow$$

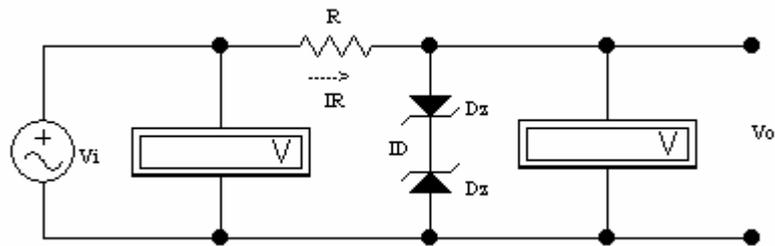
$$\Rightarrow \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is2}}{V_z + V_\gamma} - 1 \Rightarrow \frac{R_L}{R} = \frac{1}{\frac{V_{is2}}{V_\gamma} - 1} \Rightarrow R_L = \frac{R}{\frac{V_{is2}}{V_\gamma} - 1} = \frac{1 \cdot 10^3}{\frac{7}{5} - 1} = 2,5k\Omega \rightarrow 2,7k\Omega.$$

Con tale valore, si ha:  $V_{is12} = \pm \left( 1 + \frac{R}{R_L} \right) (V_z + V_\gamma) = \pm \left( 1 + \frac{1 \cdot 10^3}{2,7 \cdot 10^3} \right) \cdot 5 = \pm 6,85V$ .

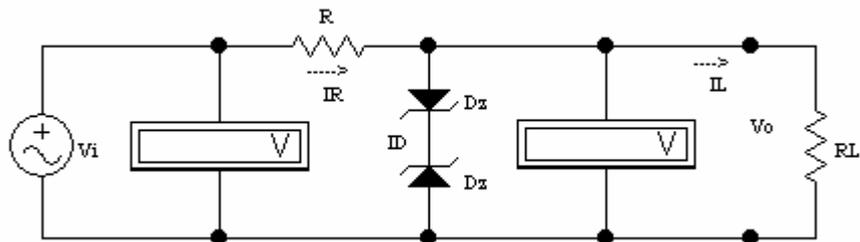
Riassumendo:  $R = 1,2K\Omega$ ;  $R_L = 3,3K\Omega$ ;  $D_z$ : 4,3V 1/2W.

## VERIFICA IN CONTINUA

Circuito di verifica senza carico.



Circuito di verifica con carico.



Si riportano nelle tabelle i valori misurati e quelli calcolati.

Si riportano i punti ( $V_i$ ;  $V_o$ ), sperimentali e teorici, sia senza carico sia con carico, su due grafici distinti  $V_i$ - $V_o$  e si tracciano, sullo stesso grafico, le curve caratteristiche sperimentale e teorica, per un immediato confronto. Della caratteristica sperimentale si rileva la pendenza (coefficiente angolare) scegliendo, nei tratti rettilinei, tre opportune coppie di punti.

Poiché la tensione  $V_o$  coincide con la differenza di potenziale ai capi del ramo con i diodi ( $V_D$ ), riportando su un grafico  $I_D$  in funzione di  $V_o$ , si ottiene la curva rappresentativa della variazione della corrente nel ramo con i diodi, e, quindi, una valutazione del suo comportamento sia durante la semionda positiva sia durante la semionda negativa..

Senza carico $R_L$						
volt	Valori misurati			Valori calcolati		
	volt	volt	mA	volt	volt	mA
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_D$
-9	-4,804	-4,196	-4,196	-5	-4	-4
-7	-4,561	-2,439	-2,439	-5	-2	-2
-5,5	-4,256	-1,244	-1,244	-5	-0,5	-0,5
-5,3	-4,202	-1,098	-1,098	-5	-0,3	-0,3
-5,1	-4,144	-0,956	-0,956	-5	-0,1	-0,1
-5	-4,109	-0,891	-0,891	-5	0	0
-4,9	-4,077	-0,823	-0,823	-4,9	0	0
-4,7	-4,002	-0,698	-0,698	-4,7	0	0
-4,5	-3,922	-0,578	-0,578	-4,5	0	0
-4	-3,678	-0,322	-0,322	-4	0	0
-3	-2,953	-0,047	-0,047	-3	0	0
-2	-2,0	0	0	-2	0	0

-1	-1	0	0	-1	0	0
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0
2	1,998	0,002	0,002	2	0	0
3	2,964	0,036	0,036	3	0	0
4	3,686	0,314	0,314	4	0	0
4,5	3,931	0,569	0,569	4,5	0	0
4,7	4,013	0,687	0,687	4,7	0	0
4,9	4,09	0,810	0,810	4,9	0	0
5	4,121	0,879	0,879	5	0	0
5,1	4,156	0,944	0,944	5	0,1	0,1
5,3	4,216	1,084	1,084	5	0,3	0,3
5,5	4,273	1,227	1,227	5	0,5	0,5
7	4,582	2,418	2,418	5	2	2
9	4,834	4,166	4,166	5	4	4

Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-9 ; -4,804) e B(-5 ; -4,109) per il primo tratto orizzontale; i punti C(5 ; 4,121) e D(9 ; 4,834) per il secondo tratto orizzontale; i punti E(-2 ; -2) e F(2 ; 1,998) per il tratto obliquo.

Primo tratto orizzontale: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{-4,109 + 4,804}{-5 + 9} = 0,17$$

Secondo tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{4,834 - 4,121}{9 - 5} = 0,18$$

Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_F - y_E}{x_F - x_E} = \frac{1,998 + 2}{2 + 2} = 1$$

Con carico $R_L$										
volt	Valori misurati					Valori calcolati				
	volt		mA			volt		mA		
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$
-9	-4,603	-4,397	-4,397	-1,705	-2,692	-5	-4	-4	-1,85	-2,15
-7,2	-4,282	-2,918	-2,918	-1,586	-1,332	-5	-2,2	-2,2	-1,85	-0,35
-7,1	-4,259	-2,841	-2,841	-1,577	-1,264	-5	-2,1	-2,1	-1,85	-0,25
-7	-4,236	-2,764	-2,764	-1,569	-1,195	-5	-2	-2	-1,85	-0,15
-6,9	-4,209	-2,691	-2,691	-1,559	-1,132	-5	-1,9	-1,9	-1,85	-0,05
-6,8	-4,183	-2,6	-2,6	1,549	-1,051	-4,964	-1,836	-1,836	-1,836	0
-6,7	-4,157	-2,543	-2,543	-1,540	-1,003	-4,891	-1,809	-1,809	-1,809	0
-6,5	-4,098	-2,402	-2,402	-1,518	-0,884	-4,745	-1,755	-1,755	-1,755	0
-6	-3,937	-2,063	-2,063	-1,458	-0,605	-4,38	-1,62	-1,62	-1,62	0
-5	-3,493	-1,507	-1,507	-1,294	-0,213	-3,65	-1,35	-1,35	-1,35	0
-4	-2,887	-1,113	-1,113	-1,069	-0,044	-2,92	-1,08	-1,08	-1,08	0
-3	-2,184	-0,816	-0,816	-0,809	-0,007	-2,19	-0,81	-0,81	-0,81	0

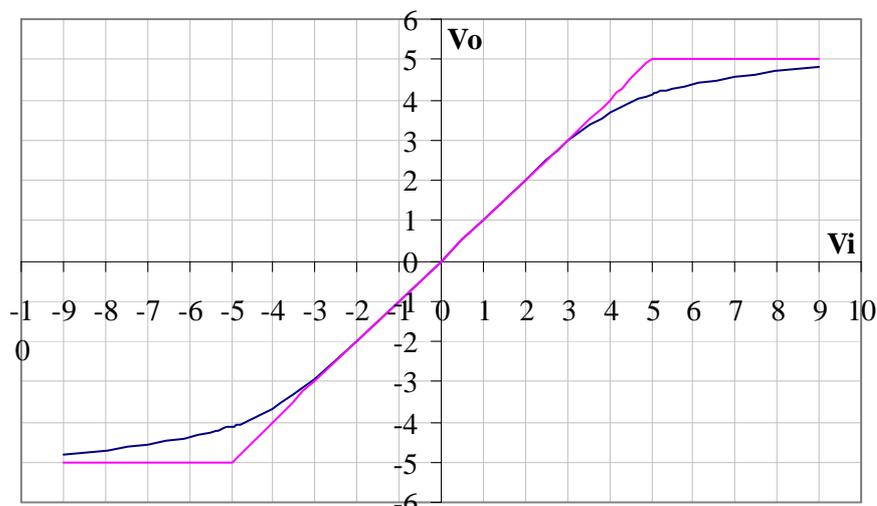
-2	-1,456	-0,544	-0,544	-0,539	0	-1,46	-0,54	-0,54	-0,54	0
-1	-0,728	-0,272	-0,272	-0,270	0	-0,73	-0,27	-0,27	-0,27	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,733	0,267	0,267	0,271	0	0,73	0,27	0,27	0,27	0
2	1,462	0,538	0,538	0,541	0	1,46	0,54	0,54	0,54	0
3	2,189	0,811	0,811	0,811	0	2,19	0,81	0,81	0,81	0
4	2,887	1,113	1,113	1,069	0,044	2,92	1,08	1,08	1,08	0
5	3,499	1,501	1,501	1,296	0,205	3,65	1,35	1,35	1,35	0
6	3,943	2,057	2,057	1,460	0,597	4,38	1,62	1,62	1,62	0
6,5	4,112	2,388	2,388	1,523	0,865	4,745	1,759	1,759	1,759	0
6,7	4,170	2,53	2,53	1,544	0,986	4,891	1,809	1,809	1,809	0
6,8	4,199	2,601	2,601	1,555	1,046	4,964	1,836	1,836	1,836	0
6,9	4,224	2,676	2,676	1,564	1,112	5	1,9	1,9	1,85	0,05
7	4,249	2,751	2,751	1,574	1,177	5	2	2	1,85	0,15
7,1	4,273	2,827	2,827	1,582	1,247	5	2,1	2,1	1,85	0,25
7,2	4,297	2,903	2,903	1,591	1,312	5	2,2	2,2	1,85	0,35
9	4,626	4,374	4,374	1,713	2,661	5	4	4	1,85	2,15

Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-9 ; -4,603) e B(-5 ; -3,493) per il primo tratto orizzontale; i punti C(5 ; 3,499) e D(9 ; 4,626) per il secondo tratto orizzontale; i punti E(-2 ; -1,462) e F(2 ; 1,462) per il tratto obliquo.

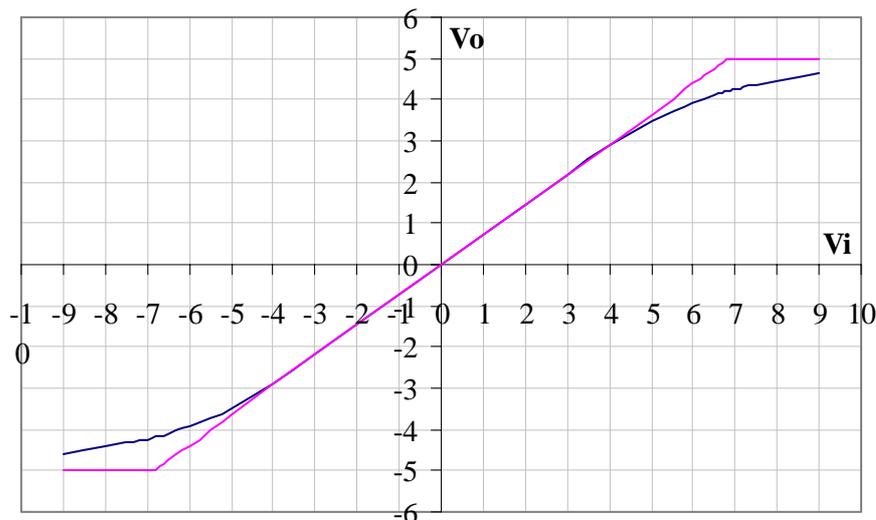
Primo tratto orizzontale: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{-3,493 + 4,603}{-5 + 9} = 0,165$$

Secondo tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{4,626 - 3,499}{9 - 5} = 0,28$$

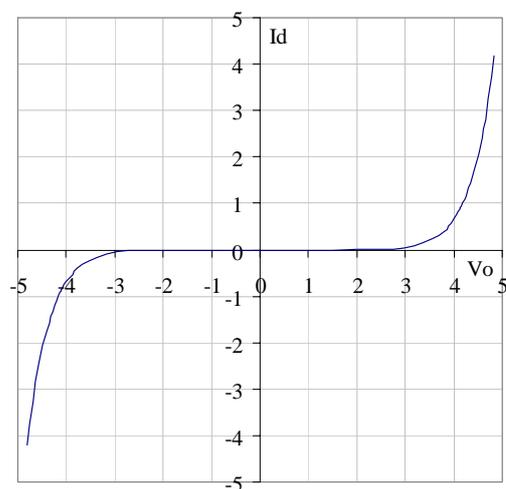
Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_F - y_E}{x_F - x_E} = \frac{1,462 + 1,462}{2 + 2} = 0,731$$



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica senza carico.



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica col carico.



Curva caratteristica sperimentale del diodo utilizzato.

### Calcolo dei valori teorici

Poiché  $V_i$  si ottiene tarando il generatore continuo variabile esattamente al valore richiesto, si assume tale valore sperimentale coincidente col valore teorico.

**Senza carico:**  $V_{is1} = -(V_z + V_\gamma) = -5V$  ;  $V_{is2} = V_z + V_\gamma = 5V$

$$- \quad V_i \leq V_{is1} \Rightarrow V_o = -(V_z + V_\gamma) = -5V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i + 5V; \quad I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_i + 5V}{1 \cdot 10^3}$$

$$- \quad V_{is1} < V_i < V_{is2} \Rightarrow V_o = V_i; \quad V_R = 0; \quad I_D = 0$$

$$- \quad V_i \geq V_{is2} \Rightarrow V_o = V_z + V_\gamma = 5V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i - 5V; \quad I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_i - 5V}{1 \cdot 10^3}$$

**Col carico:**  $V_{is1} = -\left(1 + \frac{R}{R_L}\right)(V_z + V_\gamma) = -\left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{2,7 \cdot 10^3}\right) \cdot 5 = -6,85V$

$$V_{is1} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right)(V_z + V_\gamma) = \left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{2,7 \cdot 10^3}\right) \cdot 5 = 6,85V$$

–  $V_i \leq V_{is1} \Rightarrow V_o = -(V_z + V_\gamma) = -5V; V_R = V_i - V_o = V_i + 5V; I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3}$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{-5}{2,7 \cdot 10^3} = -1,85mA; I_D = I_R - I_L$$

–  $V_{is1} < V_i < V_{is2} \Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i = \frac{2,7 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 2,7 \cdot 10^3} \cdot V_i = 0,73V_i;$

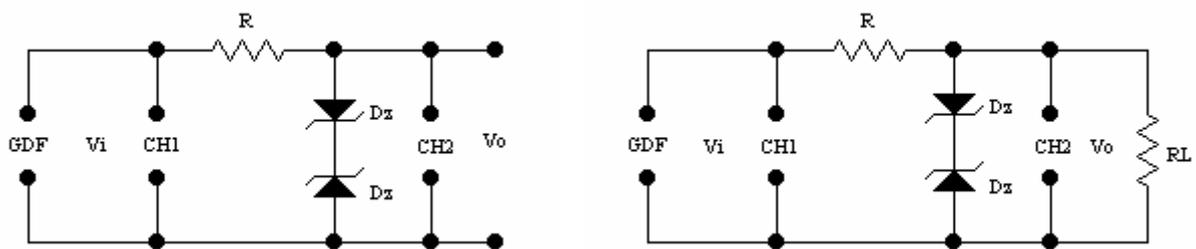
$$V_R = V_i - V_o = V_i - 0,73V_i = 0,27V_i; I_R = I_L = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R_L} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3} = \frac{V_o}{2,7 \cdot 10^3}; I_D = 0$$

–  $V_i \geq V_{is2} \Rightarrow V_o = V_z + V_\gamma = 5V; V_R = V_i - V_o = V_i - 5V; I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3}$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{5}{2,7 \cdot 10^3} = 1,85mA; I_D = I_R - I_L$$

## VERIFICA IN ALTERNATA

Circuito di verifica senza carico e con carico.



Si inserisce in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza  $V_{iM} = 10V$  e frequenza  $f = 1kHz$ .

Prima senza carico, poi con il carico, si visualizzano gli oscillogrammi delle forme d'onda d'ingresso e d'uscita. Si fotografano gli oscillogrammi sia con i segnali sovrapposti sia con i segnali correlati (uno sopra l'altro) segnando i valori cui sono posizionate le manopole base tempi (ms/div) e la sensibilità verticale dei due canali (volt/div) dell'oscilloscopio.

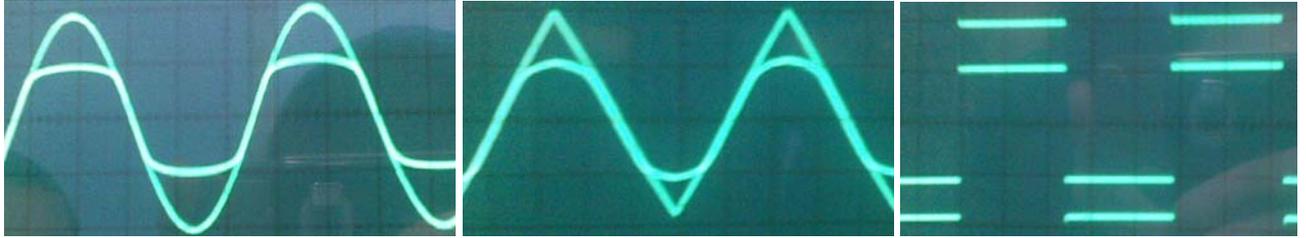
Si passa alla scansione xy e si visualizza la curva caratteristica d'uscita. La si posiziona correttamente rispetto agli assi dello schermo e si agisce sulla sensibilità dei canali per ottimizzarne l'aspetto, si rileva la sensibilità dei due canali e si fotografa l'oscillogramma.

si ripete il tutto inserendo in ingresso un'onda triangolare prima, e un'onda quadra poi, con stessa ampiezza e frequenza della sinusoidale.

Salvo eventuale precisazione successiva, la base tempi è regolata a 0,2ms/div e i canali CH1 e CH2 a 5volt/div. Si riportano le foto degli oscillogrammi.

### Verifica senza carico

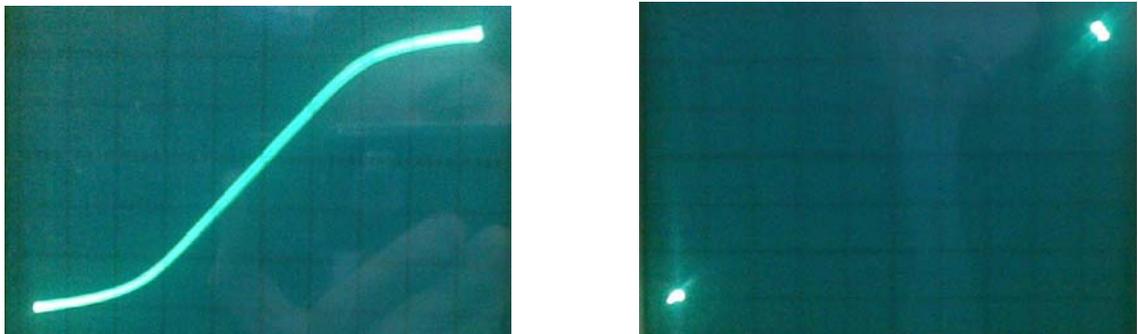
#### Oscillogrammi sovrapposti



#### Oscillogrammi correlati

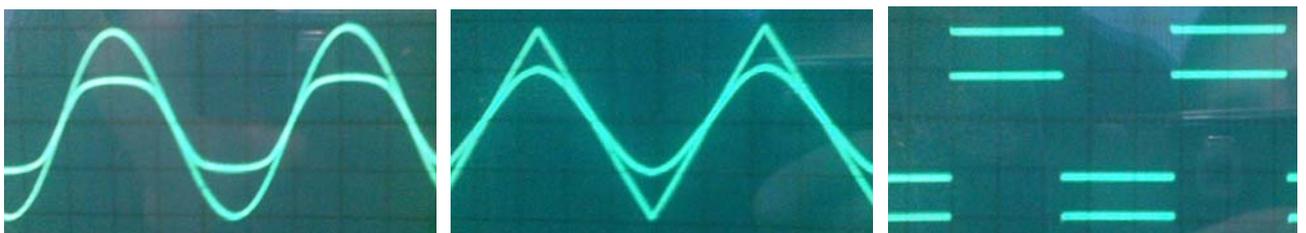


#### Curva caratteristica d'uscita (sinusoidale 2volt/div e quadra 5volt/div)



### Verifica con carico

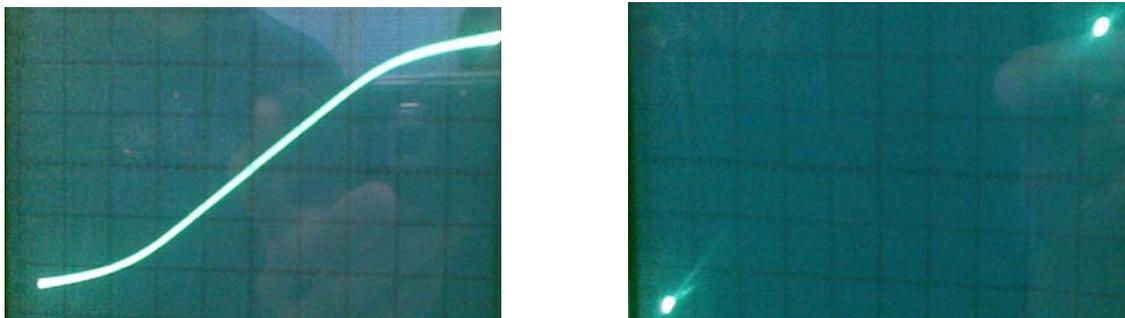
#### Oscillogrammi sovrapposti



## Oscillogrammi correlati



Curva caratteristica d'uscita (sinusoidale 2volt/div e quadra 5volt/div)



## CONSIDERAZIONI SULL'IMPIEGO DEI DIODI ZENER NEI LIMITATORI

In tutti i limitatori esaminati, ad eccezione del primo utilizzando un semplice diodo, si è ottenuta una curva caratteristica d'uscita con un ginocchio poco accentuato, cioè il ramo con i diodi entra in conduzione in modo graduale, tendendo ad assumere il valore a cui deve essere limitata l'uscita con lentezza.

Questo comportamento dipende dal diodo zener. Per tensioni di zener minori di 6V è prevalente l'effetto zener sull'effetto valanga. Ciò causa una conduzione inversa che inizia ben prima della tensione nominale  $V_z$  e aumenta gradatamente con l'aumento della tensione inversa applicata.

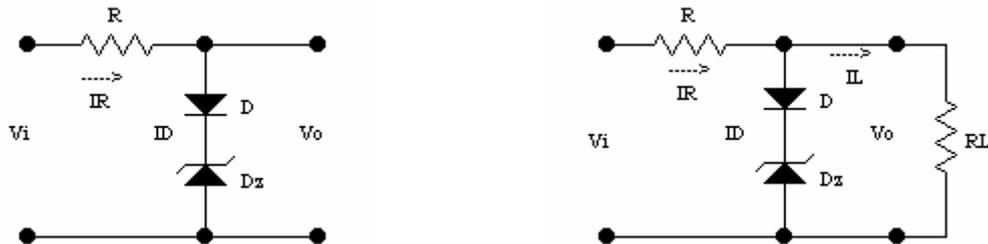
Se la tensione di zener è maggiore di 6V, è prevalente l'effetto valanga sull'effetto zener. Il diodo, in tale caso, raggiunge rapidamente la piena conduzione nell'intorno della tensione nominale di zener.

Usando un diodo con tensione di zener maggiore di 6V, al posto del diodo di 4,3V, dovremmo ottenere curve caratteristiche d'uscita con un ginocchio molto accentuato, cioè il ramo con i diodi entrerà rapidamente in piena conduzione nell'intorno della sua tensione di zener, e la tensione d'uscita assumerà rapidamente il valore a cui deve essere limitata.

Per comprovare quanto detto, si realizzano i già verificati limitatori che impiegano diodi zener utilizzando, al posto dei diodi zener di 4,3V, diodi zener di 6,8V. si riporta solo la verifica in continua.

## LIMITATORE SEMPLICE - LIMITAZIONE DELLA PARTE POSITIVA DELLA TENSIONE D'USCITA AD UN GENERICO VALORE CON DIODO ZENER 6,8V

L'uscita viene limitata al valore  $V_z + V_\gamma = 6,8 + 0,7 = 7,5V$ .



In corrispondenza di  $V_{iMAX} = 15V$ , con uscita a vuoto, si fissa una corrente  $I_{DMAX} = 8mA$ . Assunti  $V_\gamma = 0,7V$ ,  $V_z = 6,8V$  e uscita aperta, si ha:

$$R = \frac{V_{iMAX} - V_z - V_\gamma}{I_{DMAX}} = \frac{15 - 6,8 - 0,7}{8 \cdot 10^{-3}} = 0,9375k\Omega \rightarrow 1k\Omega.$$

La tensione di soglia d'ingresso senza carico è  $V_z + V_\gamma = 7,5V$ . L'inserimento del carico dovrà produrre una variazione della tensione di soglia d'ingresso di circa 2V, portandola da 7,5V a 9,5V. Dalla funzione d'uscita con carico, posto  $V_o = V_z + V_\gamma = 7,5V$  e  $V_i = V_{is} = 9,5V$ , si ha:

$$V_z + V_\gamma = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is} \Rightarrow \frac{1}{1 + \frac{R}{R_L}} = \frac{V_z + V_\gamma}{V_{is}} \Rightarrow 1 + \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is}}{V_z + V_\gamma} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is}}{V_z + V_\gamma} - 1 \Rightarrow \frac{R_L}{R} = \frac{1}{\frac{V_{is}}{V_\gamma} - 1} \Rightarrow R_L = \frac{R}{\frac{V_{is}}{V_\gamma} - 1} = \frac{1 \cdot 10^3}{\frac{9,5}{7,5} - 1} = 3,75k\Omega \rightarrow 3,9k\Omega.$$

Con tale valore, si ha:  $V_{is} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right)(V_z + V_\gamma) = \left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{3,9 \cdot 10^3}\right) \cdot 7,5 = 9,42V$ .

Riassumendo:  $R = 1K\Omega$ ;  $R_L = 2,7K\Omega$ ; D: 1N4148; Dz: 6,8V 1/2W

### VERIFICA IN CONTINUA

Si riportano nelle tabelle i valori misurati e quelli calcolati.

Si riportano i punti ( $V_i$ ;  $V_o$ ), sperimentali e teorici, sia senza carico sia con carico, su due grafici distinti  $V_i$ - $V_o$  e si tracciano, sullo stesso grafico, le curve caratteristiche sperimentale e teorica, per un immediato confronto. Della caratteristica sperimentale si rileva la pendenza (coefficiente angolare) scegliendo, nei tratti rettilinei, due opportune coppie di punti.

Senza carico $R_L$						
volt	Valori misurati			Valori calcolati		
	volt		mA	volt		mA
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_D$
-15	-15	0	0	-15	0	0
-10	-10	0	0	-10	0	0
-7	-7	0	0	-7	0	0
-4	-4	0	0	-4	0	0
-2	-2	0	0	-2	0	0
0	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	2	0	0
4	4	0	0	4	0	0
6	6	0	0	6	0	0
6,5	6,5	0	0	6,5	0	0
7	7	0	0	7	0	0
7,3	7,285	0,015	0,015	7,3	0	0
7,5	7,38	0,120	0,120	7,5	0	0
7,8	7,437	0,363	0,363	7,5	0,3	0,3
8	7,459	0,541	0,541	7,5	0,5	0,5
10	7,557	2,443	2,443	7,5	2,5	2,5
13	7,626	5,374	5,374	7,5	5,5	5,5
15	7,658	7,342	7,342	7,5	7,5	7,5

Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-15 ; -15) e B(4 ; 4) per il tratto obliquo; i punti C(7,5 ; 7,38) e D(15 ; 7,658) per il tratto orizzontale.

Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{4 + 15}{4 + 15} = 1$$

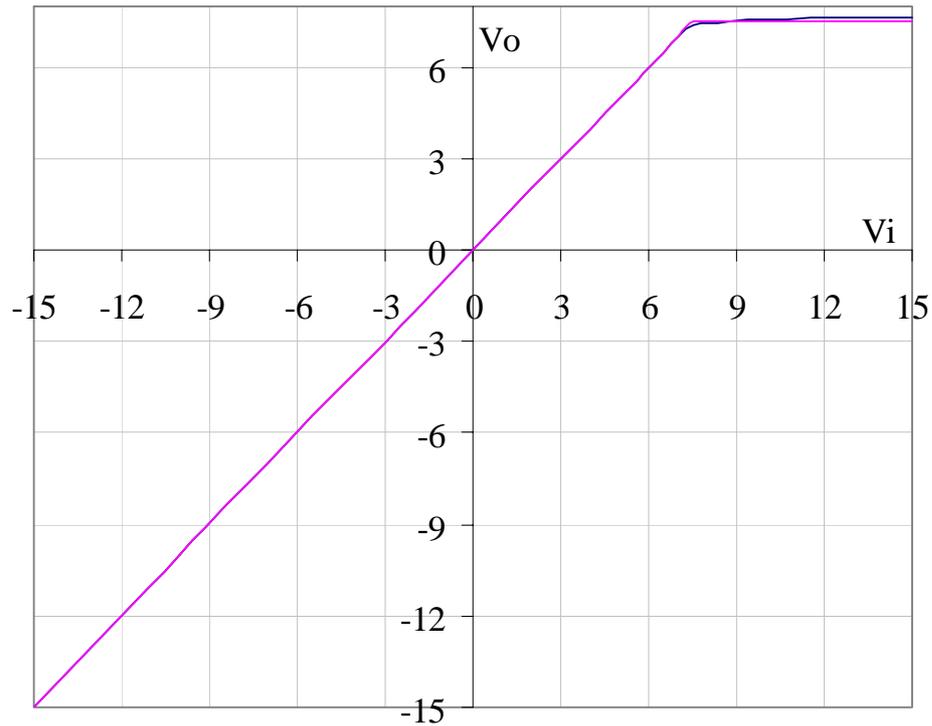
Tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{7,658 - 7,38}{15 - 7,5} = 0,037$$

Con carico $R_L$										
volt	Valori misurati					Valori calcolati				
	volt		mA			volt		mA		
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$
-15	-11,958	-3,042	-3,042	-3,066	0	-11,94	-3,06	-3,06	-3,06	0
-10	-7,968	-2,032	-2,032	-2,043	0	-7,96	-2,04	-2,04	-2,04	0
-7	-5,578	-1,422	-1,422	-1,430	0	-5,572	-1,428	-1,428	-1,428	0
-3	-2,391	-0,609	-0,609	-0,613	0	-2,388	-0,612	-0,612	-0,612	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2,391	0,609	0,609	0,613	0	2,388	0,612	0,612	0,612	0
6	4,783	1,217	1,217	1,226	0	4,776	1,224	1,224	1,224	0
8	6,381	1,619	1,619	1,636	0	6,368	1,632	1,632	1,632	0
9	7,171	1,829	1,829	1,839	0	7,164	1,836	1,836	1,836	0
9,3	7,354	1,946	1,946	1,886	0,06	7,403	1,897	1,897	1,897	0
9,5	7,408	2,098	2,098	1,899	0,193	7,5	2,00	2,00	1,92	0,08
9,8	7,450	2,350	2,350	1,910	0,44	7,5	2,3	2,3	1,92	0,38
10	7,469	2,531	2,531	1,915	0,616	7,5	2,5	2,5	1,92	0,58
12	7,559	4,441	4,441	1,938	2,503	7,5	4,5	4,5	1,92	2,58
15	7,625	7,375	7,375	1,995	5,38	7,5	7,5	7,5	1,92	5,58

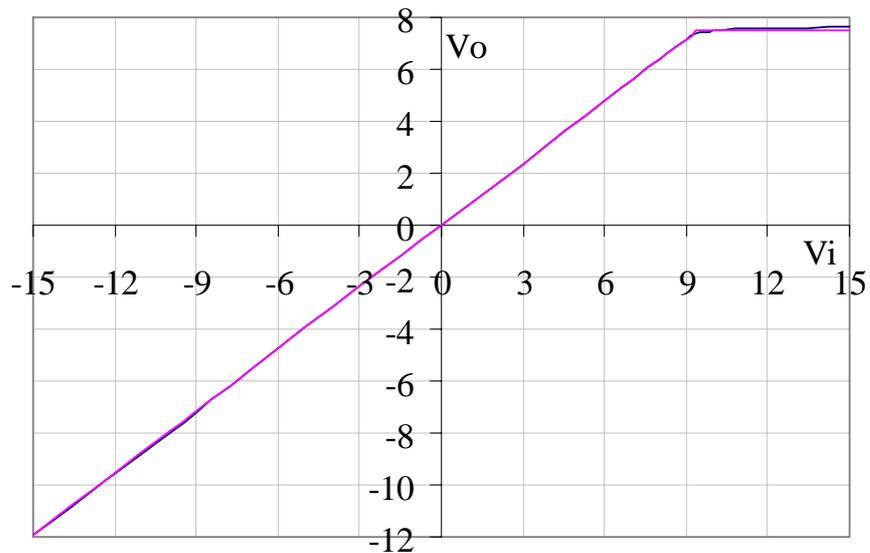
Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-15 ; -11,958) e B(6 ; 4,783) per il tratto obliquo; i punti C(10 ; 7,469) e D(15 ; 7,625) per il tratto orizzontale.

Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{4,783 + 11,958}{6 + 15} = 0,797$$

Tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{7,625 - 7,469}{15 - 10} = 0,031$$



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica senza carico.



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica col carico.

## Calcolo dei valori teorici

Poiché  $V_i$  si ottiene tarando il generatore continuo variabile esattamente al valore richiesto, si assume tale valore sperimentale coincidente col valore teorico.

**Senza carico:**  $V_{is} = V_z + V_\gamma = 6,8 + 0,7 = 7,5V$

-  $V_i < V_{is} \Rightarrow V_o = V_i; V_R = 0; I_D = 0$

-  $V_i \geq V_{is} \Rightarrow V_o = V_z + V_\gamma = 7,5V; V_R = V_i - V_o = V_i - 7,5V; I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_i - 7,5}{1 \cdot 10^3}$

**Col carico:**  $V_{is} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right)(V_z + V_\gamma) = \left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{3,9 \cdot 10^3}\right) \cdot (6,8 + 0,7) = 9,42V$

-  $V_i < V_{is} \Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i = \frac{3,9 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 3,9 \cdot 10^3} \cdot V_i = 0,796V_i;$

$V_R = V_i - V_o = V_i - 0,796V_i = 0,204V_i; I_R = I_L = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R_L} = \frac{V_i - 0,796V_i}{1 \cdot 10^3} = \frac{0,204V_i}{1 \cdot 10^3}; I_D = 0$

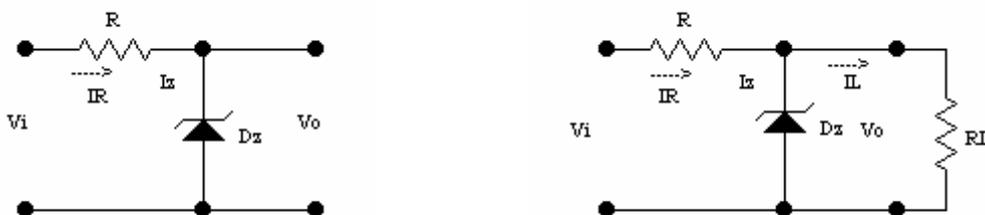
-  $V_i \geq V_{is} \Rightarrow V_o = V_z + V_\gamma = 7,5V; V_R = V_i - V_o = V_i - 7,5V; I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_i - 7,5}{1 \cdot 10^3}$

$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{7,5}{3,9 \cdot 10^3} = 1,92mA; I_D = I_R - I_L$

## LIMITATORE DOPPIO - LIMITAZIONE DELLA PARTE NEGATIVA DELLA TENSIONE D'USCITA AL VALORE $-V_\gamma$ ; LIMITAZIONE DELLA PARTE POSITIVA DELLA TENSIONE D'USCITA AD UN GENERICO VALORE CON DIODO ZENER $6,8V$

L'uscita viene limitata tra  $-V_\gamma = -0,7V$  e  $V_z = 4,3V$ .

Si hanno due soglie d'ingresso:  $V_{is1}$  quando  $V_o = -V_\gamma$ ;  $V_{is2}$  quando  $V_o = V_z$ .



Il caso più sfavorevole, nel dimensionare la resistenza R, è con uscita aperta e diodo in conduzione inversa. In corrispondenza di  $V_{iMAX} = 15V$ , si fissa una corrente  $I_{zMAX} = 8mA$ . Assunto  $V_o = V_z = 6,8V$  e uscita aperta, si ha:

$$R = \frac{V_{iMAX} - V_z}{I_{zMAX}} = \frac{10 - 6,8}{8 \cdot 10^{-3}} = 1,025k\Omega \rightarrow 1k\Omega.$$

L'inserimento del carico dovrà produrre uno spostamento della tensione di soglia d'ingresso di circa 2V con il diodo zener polarizzato inversamente. Dalla funzione d'uscita con carico, posto  $V_o = V_z = 6,8V$  e  $V_i = V_{is2} = 9V$ , si ha:

$$V_z = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is2} \Rightarrow \frac{1}{1 + \frac{R}{R_L}} = \frac{V_z}{V_{is2}} \Rightarrow 1 + \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is2}}{V_z} \Rightarrow \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is2}}{V_z} - 1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{R_L}{R} = \frac{1}{\frac{V_{is2}}{V_z} - 1} \Rightarrow R_L = \frac{R}{\frac{V_{is2}}{V_z} - 1} = \frac{1 \cdot 10^3}{\frac{9}{6,8} - 1} = 3,09k\Omega \rightarrow 3,3k\Omega.$$

Con tale valore, si ha:

$$V_{is1} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) (-V_\gamma) = -\left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{3,3 \cdot 10^3}\right) \cdot 0,7 = -0,9V.$$

$$V_{is2} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_z = \left(1 + \frac{1,2 \cdot 10^3}{3,3 \cdot 10^3}\right) \cdot 6,8 = 8,86V$$

Riassumendo:  $R = 1,2K\Omega$  ;  $R_L = 3,3K\Omega$  ;  $D_z: 6,9V \ 1/2W$ .

## VERIFICA IN CONTINUA

Si riportano nelle tabelle i valori misurati e quelli calcolati.

Si riportano i punti ( $V_i$  ;  $V_o$ ), sperimentali e teorici, sia senza carico sia con carico, su due grafici distinti  $V_i$ - $V_o$  e si tracciano, sullo stesso grafico, le curve caratteristiche sperimentale e teorica, per un immediato confronto. Della caratteristica sperimentale si rileva la pendenza (coefficiente angolare) scegliendo, nei tratti rettilinei, due opportune coppie di punti.

Poiché la tensione  $V_o$  coincide con la differenza di potenziale ai capi del diodo zener ( $V_D$ ), riportando su un grafico  $I_z$  in funzione di  $V_o$ , si ottiene la curva caratteristica del diodo zener utilizzato, e, quindi, una valutazione del suo comportamento sia in polarizzazione diretta che inversa.

Senza carico $R_L$						
volt	Valori misurati			Valori calcolati		
	volt	mA		volt	mA	
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_D$
-15	-0,824	-14,186	-14,186	-0,7	-14,3	-14,3
-10	-0,812	-9,188	-9,188	-0,7	-9,3	-9,3
-5	-0,788	-4,212	-4,212	-0,7	-4,3	-4,3
-3	-0,769	-2,231	-2,231	-0,7	-2,3	-2,3

-1	-0,708	-0,292	-0,292	-0,7	-0,3	-0,3
-0,8	-0,681	-0,119	-0,119	-0,7	-0,1	-0,1
-0,7	-0,652	-0,048	-0,048	-0,7	0	0
-0,5	-0,5	0	0	-0,5	0	0
0	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	3	0	0
5	5	0	0	5	0	0
6,5	6,5	0	0	6,5	0	0
6,7	6,7	0	0	6,7	0	0
6,8	6,796	0,004	0,004	6,8	0	0
6,9	6,858	0,042	0,042	6,8	0,1	0,1
7	6,859	0,141	0,141	6,8	0,2	0,2
10	6,896	3,104	3,104	6,8	3,2	3,2
12	6,914	5,086	5,086	6,8	5,2	5,2
15	6,941	8,059	8,059	6,8	8,2	8,2

Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-15 ; -0,824) e B(-1 ; -0,708) per il primo tratto orizzontale; i punti C(7 ; 6,859) e D(15 ; 6,941) per il secondo tratto orizzontale; i punti E(0 ; 0) e F(5 ; 5) per il tratto obliquo.

Primo tratto orizzontale: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{-0,708 + 0,824}{-1 + 15} = 0,008$$

Secondo tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{6,941 - 6,859}{15 - 7} = 0,01$$

Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_F - y_E}{x_F - x_E} = \frac{5 - 0}{5 - 0} = 1$$

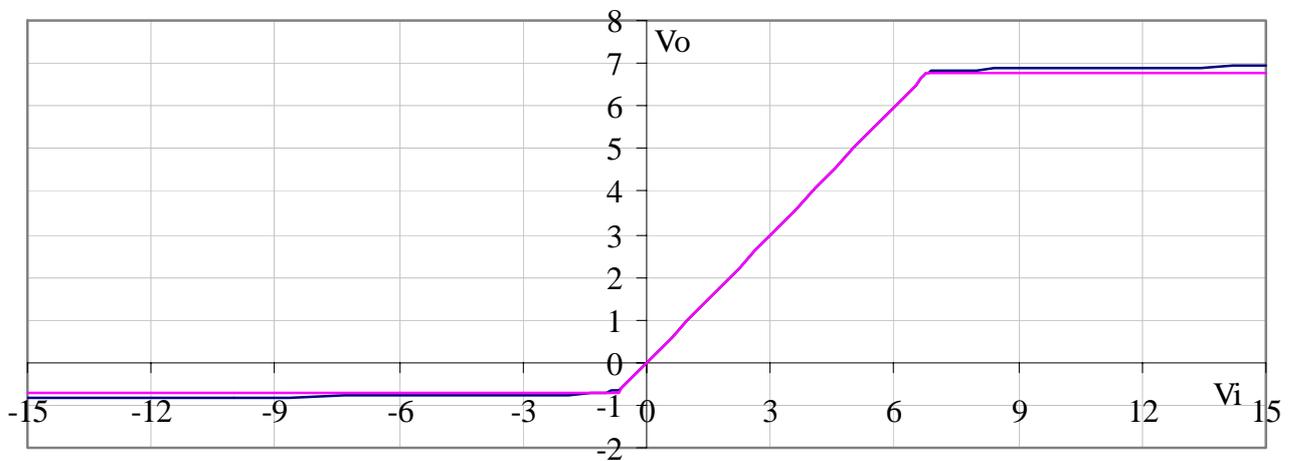
Con carico $R_L$										
volt	Valori misurati					Valori calcolati				
	volt			mA		volt		mA		
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$
-15	-0,824	-14,186	-14,186	-0,250	-13,926	-0,7	-14,3	-14,3	-0,212	-14,09
-10	-0,810	-9,19	-9,19	-0,245	-8,945	-0,7	-9,3	-9,3	-0,212	-9,088
-5	-0,785	-4,215	-4,215	-0,238	-3,977	-0,7	-4,3	-4,3	-0,212	-4,088
-2	-0,745	-1,255	-1,255	-0,226	-1,00	-0,7	-1,3	-1,3	-0,212	-1,088
-1,5	-0,726	-0,774	-0,774	-0,220	-0,554	-0,7	-0,8	-0,8	-0,212	-0,588
-1	-0,678	-0,322	-0,322	-0,205	-0,117	-0,7	-0,3	-0,3	-0,212	-0,088
-0,5	-0,386	-0,114	-0,114	-0,117	0	-0,383	-0,116	-0,116	-0,116	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	3,846	1,115	1,115	1,165	0	3,835	1,165	1,165	1,165	0
7	5,382	1,618	1,618	1,631	0	5,369	1,631	1,631	1,631	0
8,5	6,527	1,973	1,973	1,978	0	6,5195	1,9805	1,9805	1,9805	0
8,8	6,763	2,037	2,037	2,05	0	6,7496	2,0504	2,0504	2,0504	0
9	6,860	2,14	2,14	2,079	0,061	6,8	2,2	2,2	2,06	0,14
9,2	6,865	2,335	2,335	2,08	0,225	6,8	2,4	2,4	2,06	0,34
10	6,878	3,122	3,122	2,084	1,038	6,8	3,2	3,2	2,06	1,14
12	6,898	5,102	5,102	2,09	3,012	6,8	5,2	5,2	2,06	3,14
15	6,923	8,077	8,077	2,10	5,977	6,8	8,2	8,2	2,06	6,14

Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-15 ; -0,824) e B(-1 ; -0,678) per il primo tratto orizzontale; i punti C(8,5 ; 6,527) e D(15 ; 6,923) per il secondo tratto orizzontale; i punti E(0 ; 0) e F(5 ; 3,846) per il tratto obliquo.

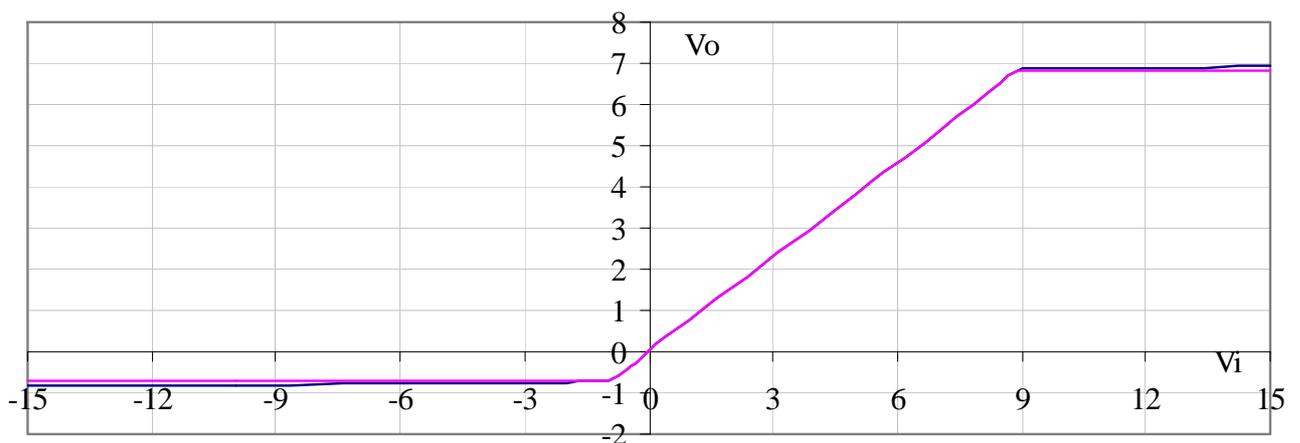
Primo tratto orizzontale: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{-0,678 + 0,824}{-1 + 15} = 0,01$$

Secondo tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{6,923 - 6,527}{15 - 8,5} = 0,061$$

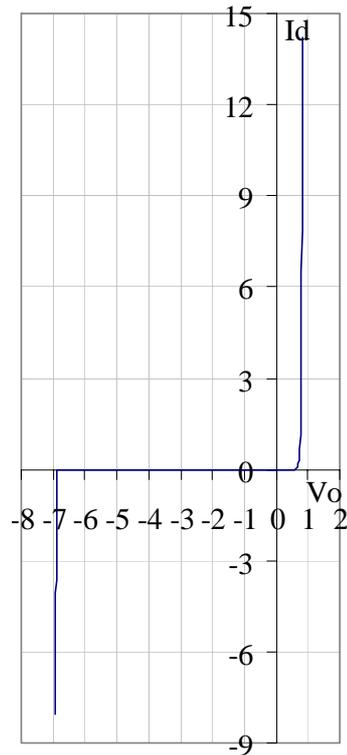
Tratto obliquo: 
$$m_{EF} = \frac{y_F - y_E}{x_F - x_E} = \frac{3,846 - 0}{5 - 0} = 0,769$$



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica senza carico.



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica col carico.



Curva caratteristica sperimentale del diodo utilizzato.

### Calcolo dei valori teorici

Poiché  $V_i$  si ottiene tarando il generatore continuo variabile esattamente al valore richiesto, si assume tale valore sperimentale coincidente col valore teorico.

**Senza carico:**  $V_{is1} = -V_\gamma = -0,7V$  ;  $V_{is2} = V_z = 6,8V$

$$- \quad V_i \leq V_{is1} \Rightarrow V_o = -V_\gamma = -0,7V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i + 0,7V; \quad I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3}$$

$$- \quad V_{is1} < V_i < V_{is2} \Rightarrow V_o = V_i; \quad V_R = 0; \quad I_D = 0$$

$$- \quad V_i \geq V_{is2} \Rightarrow V_o = V_z = 6,8V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i - 6,8V; \quad I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3}$$

$$\text{Col carico: } V_{is1} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_\gamma = -\left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{3,3 \cdot 10^3}\right) \cdot 0,7 = 0,91V$$

$$V_{is2} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_z = \left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{3,3 \cdot 10^3}\right) \cdot 6,8 = 8,86V$$

$$- \quad V_i \leq V_{is1} \Rightarrow V_o = -V_\gamma = -0,7V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i + 0,7V; \quad I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3}$$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{-0,7}{3,3 \cdot 10^3} = -0,212 \text{mA}; \quad I_D = I_R - I_L$$

$$- \quad V_{is1} < V_i < V_{is2} \Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i = \frac{3,3 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 3,3 \cdot 10^3} \cdot V_i = 0,767 V_i;$$

$$V_R = V_i - V_o = V_i - 0,767 V_i = 0,233 V_i; \quad I_R = I_L = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R_L} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3} = \frac{V_o}{3,3 \cdot 10^3}; \quad I_D = 0$$

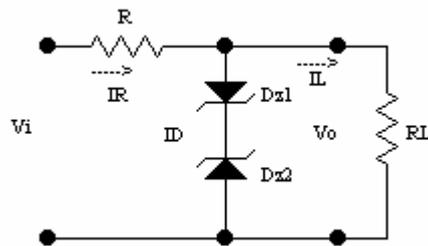
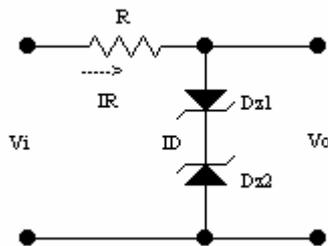
$$- \quad V_i \geq V_{is2} \Rightarrow V_o = V_z = 6,8 \text{V}; \quad V_R = V_i - V_o = V_i - 6,8 \text{V}; \quad I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3}$$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{6,8}{3,3 \cdot 10^3} = 2,06 \text{mA}; \quad I_D = I_R - I_L$$

### LIMITATORE DOPPIO - LIMITAZIONE DELLA TENSIONE D'USCITA TRA DUE GENERICI VALORI CON DIODO ZENER 6,8V

L'uscita viene limitata tra  $-(V_z + V_\gamma) = -7,5 \text{V}$  e  $+(V_z + V_\gamma) = +7,5 \text{V}$ .

Si hanno due soglie d'ingresso:  $V_{is1}$  quando  $V_o = -(V_z + V_\gamma) = -7,5 \text{V}$ ;  $V_{is2}$  quando  $V_o = V_z + V_\gamma = +7,5 \text{V}$ .



Il caso più sfavorevole, nel dimensionare la resistenza R, è con uscita aperta e ramo con i diodi in conduzione. In corrispondenza di  $V_{iMAX} = 15 \text{V}$ , si fissa una corrente  $I_{DMAX} = 8 \text{mA}$ . Assunto  $V_o = V_z + V_\gamma = +7,55 \text{V}$  e uscita aperta, si ha:

$$R = \frac{V_{iMAX} - V_z - V_\gamma}{I_{DMAX}} = \frac{15 - 6,8 - 0,7}{8 \cdot 10^{-3}} = 0,9375 \text{k}\Omega \rightarrow 1 \text{k}\Omega.$$

La tensione di soglia d'ingresso senza carico è  $V_z + V_\gamma = 7,5 \text{V}$ . L'inserimento del carico dovrà produrre una variazione della tensione di soglia d'ingresso di circa 2V, portandola da 7,5V a 9,5V. Dalla funzione d'uscita con carico, posto  $V_o = V_z + V_\gamma = 7,5 \text{V}$  e  $V_i = V_{is2} = 9,5 \text{V}$ , si ha:

$$V_z + V_\gamma = \frac{R_L}{R + R_L} V_{is2} \Rightarrow \frac{1}{1 + \frac{R}{R_L}} = \frac{V_z + V_\gamma}{V_{is2}} \Rightarrow 1 + \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is2}}{V_z + V_\gamma} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{R}{R_L} = \frac{V_{is2}}{V_z + V_\gamma} - 1 \Rightarrow \frac{R_L}{R} = \frac{1}{\frac{V_{is2}}{V_\gamma} - 1} \Rightarrow R_L = \frac{R}{\frac{V_{is2}}{V_\gamma} - 1} = \frac{1 \cdot 10^3}{\frac{9,5}{7,5} - 1} = 3,75 \text{ k}\Omega \rightarrow 3,9 \text{ k}\Omega$$

Con tale valore, si ha:  $V_{is12} = \pm \left( 1 + \frac{R}{R_L} \right) (V_z + V_\gamma) = \pm \left( 1 + \frac{1 \cdot 10^3}{3,9 \cdot 10^3} \right) \cdot 7,5 = \pm 9,42 \text{ V}.$

Riassumendo:  $R = 1 \text{ k}\Omega$  ;  $R_L = 3,9 \text{ k}\Omega$  ;  $D_z: 4,3 \text{ V } 1/2 \text{ W}.$

## VERIFICA IN CONTINUA

Si riportano nelle tabelle i valori misurati e quelli calcolati.

Si riportano i punti ( $V_i$  ;  $V_o$ ), sperimentali e teorici, sia senza carico sia con carico, su due grafici distinti  $V_i$ - $V_o$  e si tracciano, sullo stesso grafico, le curve caratteristiche sperimentale e teorica, per un immediato confronto. Della caratteristica sperimentale si rileva la pendenza (coefficiente angolare) scegliendo, nei tratti rettilinei, tre opportune coppie di punti.

Poiché la tensione  $V_o$  coincide con la differenza di potenziale ai capi del ramo con i diodi ( $V_D$ ), riportando su un grafico  $I_D$  in funzione di  $V_o$ , si ottiene la curva rappresentativa della variazione della corrente nel ramo con i diodi, e, quindi, una valutazione del suo comportamento sia durante la semionda positiva sia durante la semionda negativa..

Senza carico $R_L$						
volt	Valori misurati			Valori calcolati		
	volt		mA	volt		mA
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_D$
-15	-7,642	-7,358	-7,358	-7,5	-7,5	-7,5
-12	-7,600	-4,40	-4,40	-7,5	-4,5	-4,5
-10	-7,563	-2,437	-2,437	-7,5	-2,5	-2,5
-8	-7,490	-0,51	-0,51	-7,5	-0,5	-0,5
-7,8	-7,471	-0,329	-0,329	-7,5	-0,3	-0,3
-7,5	-7,421	-0,079	-0,079	-7,5	0	0
-7,3	-7,293	-0,007	-0,007	-7,3	0	0
-6,5	-6,5	0	0	-6,5	0	0
-6	-6	0	0	-6	0	0
-3	-3	0	0	-3	0	0
0	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	3	0	0
6	6	0	0	6	0	0
7,3	7,294	0,006	0,006	7,3	0	0
7,5	7,473	0,027	0,027	7,5	0	0
7,8	7,551	0,249	0,249	7,5	0,3	0,3
8	7,573	0,427	0,427	7,5	0,5	0,5
10	7,654	2,346	2,346	7,5	2,5	2,5
12	7,690	4,31	4,31	7,5	4,5	4,5
15	7,730	7,27	7,27	7,5	7,5	7,5

Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-15 ; -7,642) e B(-8 ; -7,490) per il primo tratto orizzontale; i punti C(8 ; 7,573) e D(15 ; 7,730) per il secondo tratto orizzontale; i punti E(-6 ; -6) e F(6 ; 6) per il tratto obliquo.

Primo tratto orizzontale: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{-7,490 + 7,642}{-8 + 15} = 0,022$$

Secondo tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{7,730 - 7,573}{15 - 8} = 0,022$$

Tratto obliquo: 
$$m_{AB} = \frac{y_F - y_E}{x_F - x_E} = \frac{6 + 6}{6 + 6} = 1$$

Con carico $R_L$										
	Valori misurati					Valori calcolati				
volt	volt		mA			Volt		mA		
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$I_R$	$I_L$	$I_D$
-15	-7,615	-7,385	-7,385	-1,952	-5,433	-7,5	-7,5	-7,5	-1,923	-5,577
-12	-7,567	-4,433	-4,433	-1,940	-2,493	-7,5	-4,5	-4,5	-1,923	-2,577
-10	-7,498	-2,502	-2,502	-1,922	-0,58	-7,5	-2,5	-2,5	-1,923	-0,577
-9,8	-7,480	-2,320	-2,320	-1,918	-0,402	-7,5	-2,3	-2,3	-1,923	-0,377
-9,5	-7,445	-2,055	-2,055	-1,909	-0,146	-7,5	-2	-2	-1,923	-0,077
-9,3	-7,389	-1,911	-1,911	-1,895	0	-7,403	-1,897	-1,897	-1,898	0
-9	-7,168	-1,832	-1,832	-1,838	0	-7,164	-1,836	-1,836	-1,837	0
-8	-6,376	-1,624	-1,624	-1,635	0	-6,368	-1,632	-1,632	-1,633	0
-6	-4,781	-1,219	-1,219	-1,226	0	-4,776	-1,224	-1,224	-1,224	0
-3	-2,392	-0,608	-0,608	-0,613	0	-2,388	-0,612	-0,612	-0,612	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2,393	0,607	0,607	0,613	0	2,388	0,612	0,612	0,612	0
6	4,781	1,219	1,219	1,226	0	4,776	1,224	1,224	1,224	0
8	6,379	1,621	1,621	1,635	0	6,368	1,632	1,632	1,633	0
9	7,174	1,826	1,826	1,839	0	7,164	1,836	1,836	1,837	0
9,3	7,404	1,896	1,896	1,898	0	7,403	1,898	1,898	1,898	0
9,5	7,507	1,993	1,993	1,925	0,068	7,5	2	2	1,923	0,077
9,8	7,559	2,241	2,241	1,938	0,303	7,5	2,3	2,3	1,923	0,377
10	7,578	2,242	2,242	1,943	0,479	7,5	2,5	2,5	1,923	0,577
12	7,654	4,346	4,346	1,962	2,384	7,5	4,5	4,5	1,923	2,577
15	7,700	7,300	7,300	1,974	5,323	7,5	7,5	7,5	1,923	5,577

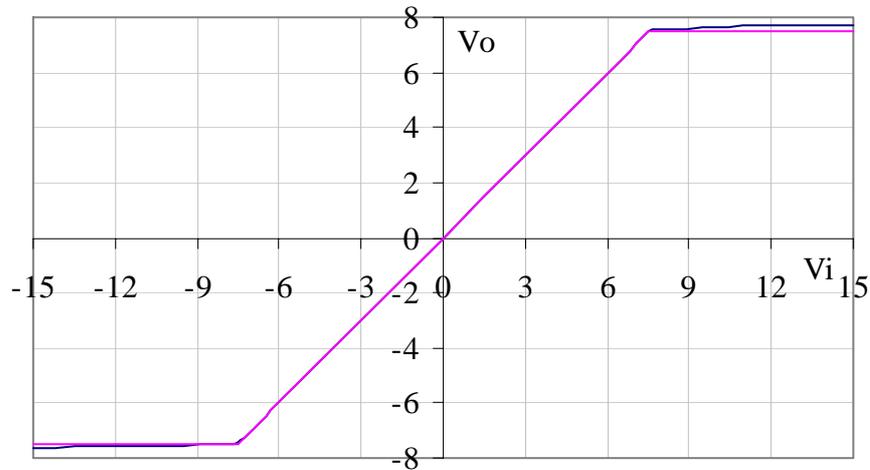
Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-15 ; -7,615) e B(-10 ; -7,498) per il primo tratto orizzontale; i punti C(10 ; 7,578) e D(15 ; 7,700) per il secondo tratto orizzontale; i punti E(-8 ; -6,376) e F(8 ; 6,379) per il tratto obliquo.

Primo tratto orizzontale: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{-7,498 + 7,615}{-10 + 15} = 0,023$$

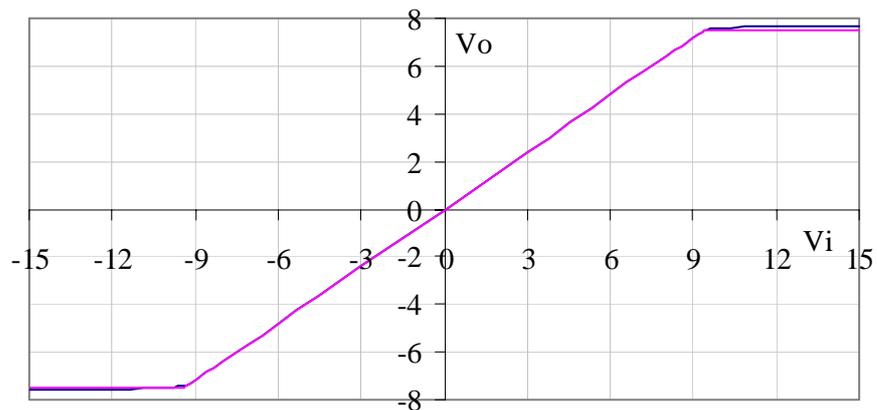
Secondo tratto orizzontale: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{7,700 - 7,578}{15 - 10} = 0,024$$

Tratto obliquo:

$$m_{AB} = \frac{y_F - y_E}{x_F - x_E} = \frac{6,379 + 6,376}{8 + 8} = 0,797$$



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica senza carico.



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica col carico.

### Calcolo dei valori teorici

Poiché  $V_i$  si ottiene tarando il generatore continuo variabile esattamente al valore richiesto, si assume tale valore sperimentale coincidente col valore teorico.

**Senza carico:**  $V_{is1} = -(V_z + V_\gamma) = -7,5V$  ;  $V_{is2} = V_z + V_\gamma = 7,5V$

$$- \quad V_i \leq V_{is1} \Rightarrow V_o = -(V_z + V_\gamma) = -7,5V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i + 7,5V; \quad I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_i + 7,5V}{1 \cdot 10^3}$$

$$- \quad V_{is1} < V_i < V_{is2} \Rightarrow V_o = V_i; \quad V_R = 0; \quad I_D = 0$$

$$- \quad V_i \geq V_{is2} \Rightarrow V_o = V_z + V_\gamma = 7,5V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i - 7,5V; \quad I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_i - 7,5V}{1 \cdot 10^3}$$

**Col carico:**  $V_{is1} = -\left(1 + \frac{R}{R_L}\right)(V_z + V_\gamma) = -\left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{3,9 \cdot 10^3}\right) \cdot 7,5 = -9,42V$

$$V_{is1} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right)(V_z + V_\gamma) = \left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{2,7 \cdot 10^3}\right) \cdot 7,5 = 9,42V$$

-  $V_i \leq V_{is1} \Rightarrow V_o = -(V_z + V_\gamma) = -7,5V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i + 7,5V; \quad I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3}$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{-7,5}{3,9 \cdot 10^3} = -1,923mA; \quad I_D = I_R - I_L$$

-  $V_{is1} < V_i < V_{is2} \Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L} V_i = \frac{3,3 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 3,3 \cdot 10^3} \cdot V_i = 0,796V_i;$

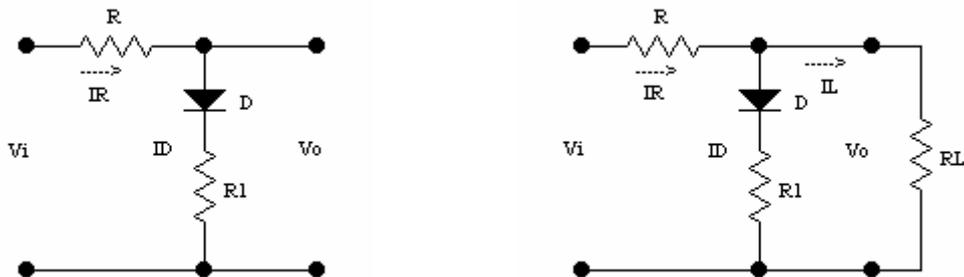
$$V_R = V_i - V_o = V_i - 0,796V_i = 0,204V_i; \quad I_R = I_L = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R_L} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3} = \frac{V_o}{3,3 \cdot 10^3}; \quad I_D = 0$$

-  $V_i \geq V_{is2} \Rightarrow V_o = V_z + V_\gamma = 7,5V; \quad V_R = V_i - V_o = V_i - 7,5V; \quad I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{1 \cdot 10^3}$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{7,5}{3,3 \cdot 10^3} = 1,923mA; \quad I_D = I_R - I_L$$

## LIMITAZIONE DELLA PENDENZA DELLA CURVA CARATTERISTICA DELLA TENSIONE D'USCITA AD INIZIARE DA QUANDO L'USCITA ASSUME IL VALORE $V_\gamma$ . CIRCUITO CON UN SOLO DIODO

La limitazione della pendenza della curva caratteristica inizia quando l'uscita assume il valore  $V_\gamma$ , il circuito e quello di figura, senza carico e col carico.



Come tensione d'ingresso si utilizza una tensione variabile da -10V a +10V. Si fissa a 15mA la massima corrente che dovrà circolare nel diodo in corrispondenza della tensione massima di 10V. Si fissa una variazione della pendenza della curva caratteristica d'uscita del limitatore senza carico del 40% in meno.

**Senza carico:**  $m_- = 1$  e  $m_+ = (1 - 0,4)m_- = 0,6m_- = 0,6$

Dalle condizione imposte, si ha:

$$m_+ = \frac{R_1}{R + R_1} m_- = 0,6 = \frac{3}{5} \quad \text{e} \quad I_{D\text{MAX}} = \frac{V_{i\text{MAX}} - V_\gamma}{R + R_1} = 15\text{mA} = 15 \cdot 10^{-3}$$

Dalla prima, si ha:  $5R_1 = 3R + 3R_1 \Rightarrow 2R_1 = 3R \Rightarrow R_1 = \frac{3}{2}R$

Sostituendo nella seconda, si ha:  $R + R_1 = \frac{V_{i\text{MAX}} - V_\gamma}{I_{D\text{MAX}}} = R + \frac{3}{2}R = \frac{5}{2}R \Rightarrow$

$$\Rightarrow R = \frac{2}{5} \cdot \frac{V_{i\text{MAX}} - V_\gamma}{I_{D\text{MAX}}} = \frac{2}{5} \cdot \frac{10 - 0,7}{15 \cdot 10^{-3}} = 248\Omega \rightarrow 270\Omega$$

$$R_1 = \frac{3}{2}R = \frac{3}{2} \cdot 270 = 405\Omega \rightarrow 390\Omega$$

Con tali valori, si ha:  $m_+ = \frac{R_1}{R + R_1} \cdot m_- = \frac{390}{270 + 390} \cdot m_- = 0,591m_- = 59,1\% m_-$

**Col carico:**  $m_- = \frac{R_L}{R + R_L}$  e  $m_+ = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_1} + \frac{R}{R_L}}$

Si fissa  $m_- = 0,8$  e si dimensiona  $R_L$ :

$$m_- = \frac{R_L}{R + R_L} = 0,8 = \frac{4}{5} \Rightarrow 5R_L = 4R + 4R_L \Rightarrow R_L = 4R = 4 \cdot 270 = 1080\Omega \rightarrow 1k\Omega$$

Con tale valore, si ha:  $m_- = \frac{R_L}{R + R_L} = \frac{1000}{270 + 1000} = 0,79$

$$m_+ = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_1} + \frac{R}{R_L}} = \frac{1}{1 + \frac{270}{390} + \frac{270}{1000}} = 0,51 \Rightarrow m_+ = 0,51 \cdot \frac{m_-}{m_-} = 0,6456m_- = 64,56\% m_-$$

L'inserimento del carico influisce sia sulla pendenza sia sulla soglia della tensione d'ingresso:

$$V_o = V_\gamma = 0,7; \quad V_{is} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right)V_\gamma = \left(1 + \frac{27 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3}\right) \cdot 0,7 = 0,889V \neq 0,9V$$

### Riassumendo

**Senza carico:**  $V_{iMAX} = 10V$ ;  $V_\gamma = 0,7V$ ;  $m_- = 1$ ;  $m_+ = 0,6m_- = 60\% m_- = 0,6$ ;  $m_+ = 0,591m_-$ ;

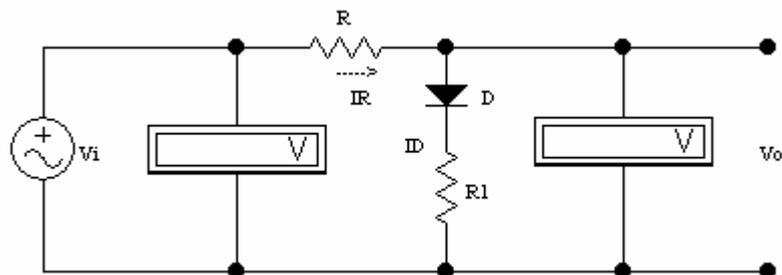
$$R = 270\Omega; R_1 = 390\Omega; V_{os} = V_{is} = V_\gamma \approx 0,7V.$$

**Col carico:**  $V_{iMAX} = 10V$ ;  $V_\gamma = 0,7V$ ;  $m_- = 0,79$ ;  $m_+ \approx 0,65m_- = 65\% m_- = 0,51$ ;

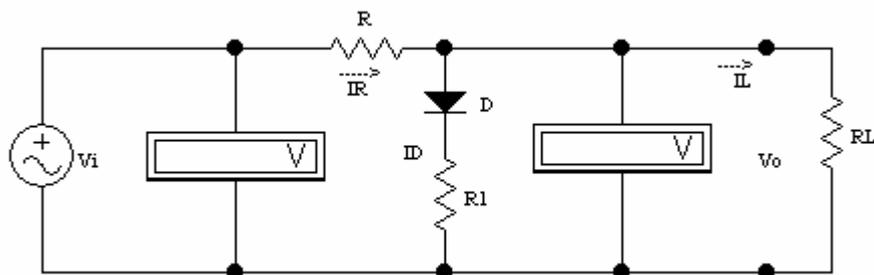
$$R = 270\Omega; R_1 = 390\Omega; R_L = 1k\Omega; V_{os} = V_\gamma \approx 0,7V; V_{is} = 0,9V.$$

### VERIFICA IN CONTINUA

Circuito di verifica senza carico.



Circuito di verifica col carico.



Si riportano nelle tabelle i valori misurati e quelli calcolati.

Si riportano i punti ( $V_i$  ;  $V_o$ ), sperimentali e teorici, sia senza carico sia con carico, su due grafici distinti  $V_i$ - $V_o$  e si tracciano, sullo stesso grafico, le curve caratteristiche sperimentale e teorica, per un immediato confronto. Della caratteristica sperimentale si rileva la pendenza (coefficiente angolare) scegliendo, nei tratti rettilinei, tre opportune coppie di punti.

Senza carico $R_L$										
	Valori misurati					Valori calcolati				
	volt					mA				
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$V_{R1}$	$V_D$	$I_R = I_D$	$V_o$	$V_R$	$V_{R1}$	$V_D$	$I_R = I_D$
-10	-10,00	0,000	0,000	0,000	0,000	-10	0,000	0,000	0,000	0,000
-9	-9,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-9	0,000	0,000	0,000	0,000
-8	-8,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8	0,000	0,000	0,000	0,000
-7	-7,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-7	0,000	0,000	0,000	0,000
-6	-6,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-6	0,000	0,000	0,000	0,000
-5	-5,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-5	0,000	0,000	0,000	0,000
-4	-4,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	-3,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-3	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	-2,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-2	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	-1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-1	0,000	0,000	0,000	0,000
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000	0,000
0,5	0,494	0,000	0,000	0,494	0,000	0,5	0,000	0,000	0,000	0,000
0,6	0,572	0,000	0,000	0,572	0,000	0,6	0,000	0,000	0,000	0,000
0,7	0,641	0,000	0,000	0,641	0,000	0,7	0,000	0,000	0,000	0,000
0,8	0,710	0,041	0,059	0,651	0,152	0,759	0,041	0,059	0,700	0,152
0,9	0,773	0,082	0,118	0,655	0,303	0,818	0,082	0,118	0,700	0,303
1	0,838	0,123	0,177	0,661	0,455	0,877	0,123	0,177	0,700	0,455
2	1,454	0,532	0,768	0,686	1,970	1,468	0,532	0,768	0,700	1,970
3	2,052	0,941	1,359	0,693	3,485	2,059	0,941	1,359	0,700	3,485
4	2,650	1,350	1,950	0,700	5,000	2,650	1,350	1,950	0,700	5,000
5	3,243	1,759	2,541	0,702	6,515	3,241	1,759	2,541	0,700	6,515
6	3,838	2,168	3,132	0,706	8,030	3,832	2,168	3,132	0,700	8,030
7	4,431	2,577	3,723	0,708	9,545	4,423	2,577	3,723	0,700	9,545
8	5,020	2,986	4,314	0,706	11,061	5,014	2,986	4,314	0,700	11,061
9	5,515	3,395	4,905	0,610	12,576	5,605	3,395	4,905	0,700	12,576
10	6,205	3,805	5,495	0,710	14,091	6,195	3,805	5,495	0,700	14,091

Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-10 ; -10) e B(0 ; 0) per il tratto obliquo; i punti C(1 ; 0,838) e D(10 ; 6,205) per il tratto orizzontale.

Tratto obliquo negativo: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{0 + 10}{0 + 10} = 1$$

Tratto obliquo positivo: 
$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{6,205 - 0,838}{10 - 1} = 0,596$$

Con carico $R_L$								
volt	Valori misurati				Valori calcolati			
	volt				volt			
$V_i$	$V_o$	$V_R$	$V_{R1}$	$V_D$	$V_{oc}$	$V_R$	$V_{R1}$	$V_D$
-10	-7,839	-2,161	-0,064	-7,775	-7,874	-2,126	0	-7,874
-9	-7,051	-1,949	-0,065	-6,986	-7,087	-1,913	0	-7,087
-8	-6,273	-1,727	-0,048	-6,225	-6,299	-1,701	0	-6,299
-7	-5,488	-1,512	-0,044	-5,444	-5,512	-1,488	0	-5,512
-6	-4,704	-1,296	-0,037	-4,667	-4,724	-1,276	0	-4,724
-5	-3,919	-1,081	-0,033	-3,886	-3,937	-1,063	0	-3,937
-4	-3,138	-0,862	-0,021	-3,117	-3,15	-0,85	0	-3,15
-3	-2,352	-0,648	-0,019	-2,333	-2,362	-0,638	0	-2,362
-2	-1,57	-0,43	-0,009	-1,561	-1,575	-0,425	0	-1,575
-1	-0,785	-0,215	-0,004	-0,781	-0,787	-0,213	0	-0,787
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,7	0,536	0,164	0,0278	0,5082	0,5512	0,1488	0	0,5512
0,8	0,597	0,203	0,0604	0,5366	0,6299	0,1701	0	0,6299
0,9	0,657	0,243	0,0948	0,5622	0,7056	0,1944	0,0056	0,7
1	0,712	0,288	0,1383	0,5737	0,7566	0,2434	0,0566	0,7
1,1	0,768	0,332	0,18	0,588	0,8075	0,2925	0,1075	0,7
1,2	0,821	0,379	0,2273	0,5937	0,8585	0,3415	0,1585	0,7
2	1,246	0,754	0,6032	0,6428	1,2662	0,7338	0,5662	0,7
3	1,762	1,238	1,101	0,661	1,7758	1,2242	1,0758	0,7
4	2,274	1,726	1,6063	0,6677	2,2854	1,7146	1,5854	0,7
5	2,787	2,213	2,1096	0,6774	2,795	2,205	2,095	0,7
6	3,296	2,704	2,6203	0,6757	3,3046	2,6954	2,6046	0,7
7	3,811	3,189	3,12	0,691	3,8142	3,1858	3,1142	0,7
8	4,32	3,68	3,6308	0,6892	4,3238	3,6762	3,6238	0,7
9	4,828	4,172	4,1433	0,6847	4,8334	4,1666	4,1334	0,7
10	5,336	4,664	4,6558	0,6802	5,343	4,657	4,643	0,7

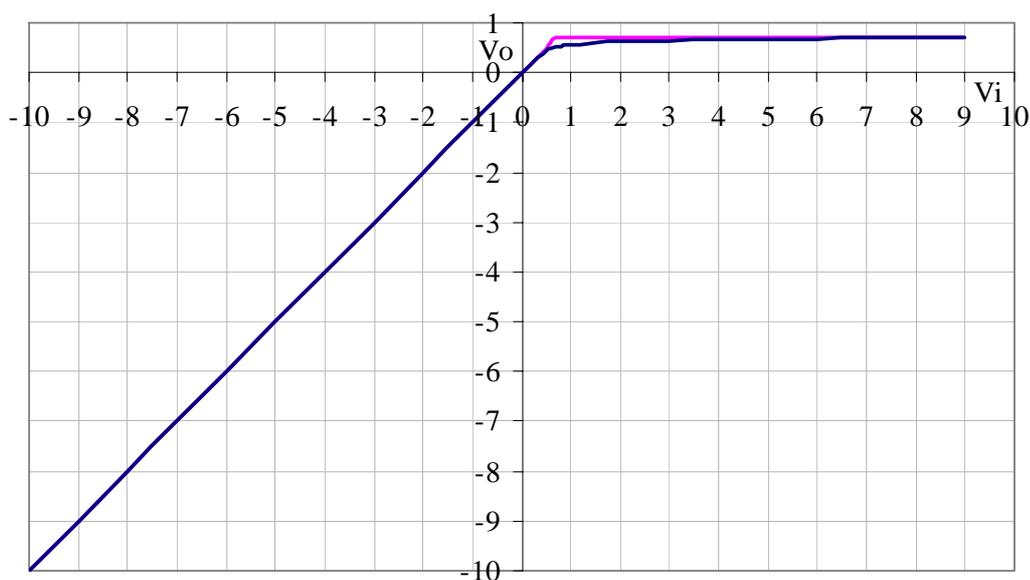
Per il calcolo delle pendenze dei tratti rettilinei si scelgono i punti A(-10 ; -7,839) e B(0 ; 0) per il tratto obliquo; i punti C(1 ; 0,712) e D(10 ; 5,336) per il tratto orizzontale.

Tratto obliquo negativo: 
$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{0 + 10}{0 + 10} = 1$$

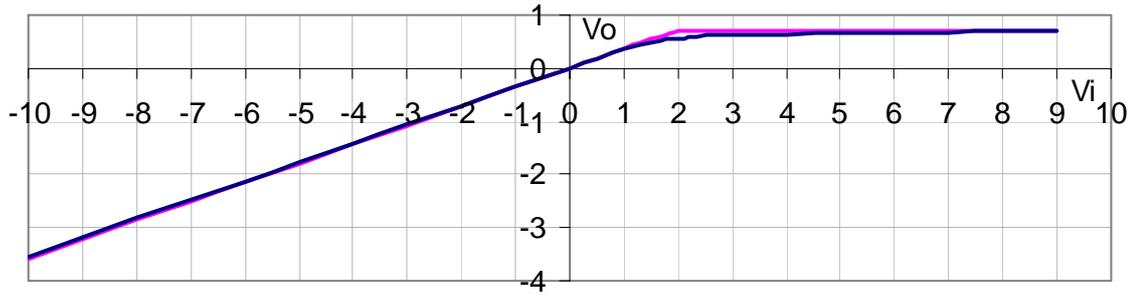
Tratto obliquo positivo:

$$m_{CD} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{5,336 - 0,712}{10 - 1} = 0,51$$

Con carico $R_L$								
volt	Valori misurati				Valori calcolati			
	volt	mA			volt	mA		
$V_i$	$V_o$	$I_R$	$I_L$	$I_D$	$V_{oc}$	$I_R$	$I_L$	$I_D$
-10	-7,839	-8,004	-7,839	-0,165	-7,874	-7,874	-7,874	0
-9	-7,051	-7,219	-7,051	-0,168	-7,087	-7,087	-7,087	0
-8	-6,273	-6,396	-6,273	-0,123	-6,299	-6,299	-6,299	0
-7	-5,488	-5,6	-5,488	-0,112	-5,512	-5,512	-5,512	0
-6	-4,704	-4,8	-4,704	-0,096	-4,724	-4,724	-4,724	0
-5	-3,919	-4,004	-3,919	-0,085	-3,937	-3,937	-3,937	0
-4	-3,138	-3,193	-3,138	-0,055	-3,15	-3,15	-3,15	0
-3	-2,352	-2,4	-2,352	-0,048	-2,362	-2,362	-2,362	0
-2	-1,57	-1,593	-1,57	-0,023	-1,575	-1,575	-1,575	0
-1	-0,785	-0,796	-0,785	-0,011	-0,787	-0,787	-0,787	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,7	0,536	0,6074	0,536	0,0714	0,5512	0,5512	0,5512	0
0,8	0,597	0,7519	0,597	0,1549	0,6299	0,6299	0,6299	0
0,9	0,657	0,9	0,657	0,243	0,7056	0,72	0,7056	0,0144
1	0,712	1,0667	0,712	0,3547	0,7566	0,9016	0,7566	0,145
1,1	0,768	1,2296	0,768	0,4616	0,8075	1,0832	0,8075	0,2757
1,2	0,821	1,4037	0,821	0,5827	0,8585	1,2649	0,8585	0,4064
2	1,246	2,7926	1,246	1,5466	1,2662	2,7179	1,2662	1,4517
3	1,762	4,5852	1,762	2,8232	1,7758	4,5342	1,7758	2,7584
4	2,274	6,3926	2,274	4,1186	2,2854	6,3505	2,2854	4,0651
5	2,787	8,1963	2,787	5,4093	2,795	8,1667	2,795	5,3717
6	3,296	10,015	3,296	6,7188	3,3046	9,983	3,3046	6,6784
7	3,811	11,811	3,811	8,0001	3,8142	11,799	3,8142	7,9851
8	4,32	13,63	4,32	9,3096	4,3238	13,616	4,3238	9,2918
9	4,828	15,452	4,828	10,624	4,8334	15,432	4,8334	10,598
10	5,336	17,274	5,336	11,938	5,343	17,248	5,343	11,905



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica senza carico.



Curva caratteristica d'uscita sperimentale e teorica col carico.

### Calcolo dei valori teorici

Poiché  $V_i$  si ottiene tarando il generatore continuo variabile esattamente al valore richiesto, si assume tale valore sperimentale coincidente col valore teorico.

**Senza carico:**  $V_{is} = V_\gamma = 0,7V$

$$- \quad V_i < V_{is} \Rightarrow V_o = V_i; \quad V_R = 0; \quad I_D = 0$$

$$- \quad V_i \geq V_{is} \Rightarrow V_o = \frac{R_1}{R + R_1}(V_i - V_\gamma) + V_\gamma = \frac{390}{270 + 390}(V_i - 0,7) + 0,7 = 0,591V_i + 0,2863$$

$$V_R = V_i - V_o; \quad V_D = V_\gamma; \quad V_{R1} = V_o - V_D = V_o + V_\gamma; \quad I_R = I_D = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{270}$$

**Col carico:**  $V_{is} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right)V_\gamma = \left(1 + \frac{0,27 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3}\right) \cdot 0,7 = 0,9V$

$$- \quad V_i < V_{is} \Rightarrow V_o = \frac{R_L}{R + R_L}V_i = \frac{1000}{270 + 1000}V_i = 0,787 \cdot V_i; \quad V_R = V_i - V_o = 0,213V_i$$

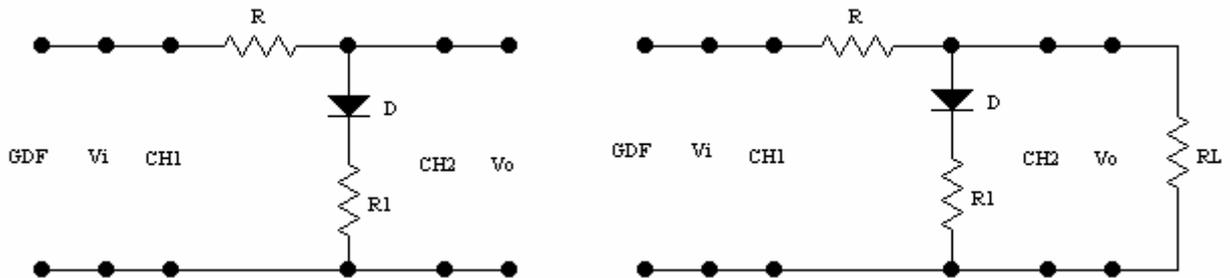
$$V_{R1} = 0; \quad V_D = V_o; \quad I_R = I_L = \frac{V_i}{R + R_L} = \frac{V_i}{1,27 \cdot 10^3}; \quad I_D = 0$$

$$- \quad V_i \geq V_{is} \Rightarrow V_o = \frac{\frac{V_i}{R} + \frac{V_\gamma}{R_1}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_L}} = \frac{\frac{V_i}{270} + \frac{0,7}{390}}{\frac{1}{270} + \frac{1}{390} + \frac{1}{1000}} = 0,51 \cdot V_i + 0,247; \quad V_R = V_i - V_o;$$

$$V_{R1} = V_o - V_\gamma; \quad I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_R}{270}; \quad I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{V_o}{1 \cdot 10^3}; \quad I_D = I_R - I_L$$

## VERIFICA IN ALTERNATA

Circuito di verifica senza carico e con carico.



Si inserisce in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza  $V_{iM} = 10V$  e frequenza  $f = 1kHz$ .

Prima senza carico, poi con il carico, si visualizzano gli oscillogrammi delle forme d'onda d'ingresso e d'uscita. Si fotografano gli oscillogrammi sia con i segnali sovrapposti sia con i segnali correlati (uno sopra l'altro) segnando i valori cui sono posizionate le manopole base tempi (ms/div) e la sensibilità verticale dei due canali (volt/div) dell'oscilloscopio.

Si passa alla scansione xy e si visualizza la curva caratteristica d'uscita. La si posiziona correttamente rispetto agli assi dello schermo e si agisce sulla sensibilità dei canali per ottimizzarne l'aspetto, si rileva la sensibilità dei due canali e si fotografa l'oscillogramma.

si ripete il tutto inserendo in ingresso un'onda triangolare prima, e un'onda quadra poi, con stessa ampiezza e frequenza della sinusoidale.

Dell'onda quadra, venendo limitata solo la parte positiva, si ottiene in uscita un'onda quadra a valore medio non nullo. Di tale segnale si misurerà il valore medio. Il valore medio si rileva misurando di quanto sale, in volt su divisioni, il segnale passando da ingresso DC a ingresso AC, ossia eliminando la componente continua (il valore medio).

Salvo eventuale precisazione successiva, la base tempi è regolata a 0,2ms/div e i canali CH1 e CH2 a 5volt/div. Si riportano le foto degli oscillogrammi.

### Verifica senza carico

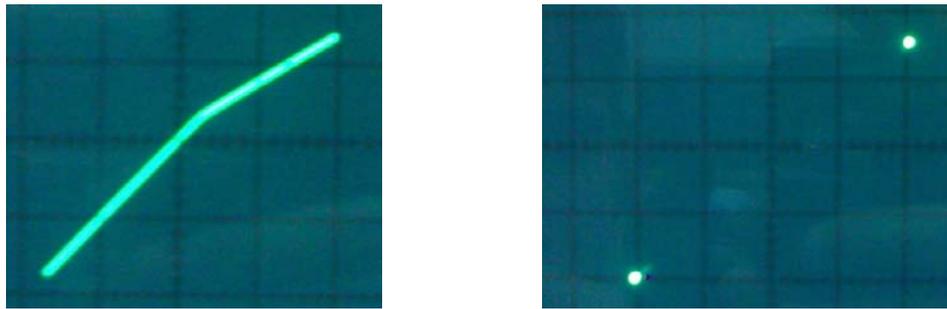
#### Oscillogrammi sovrapposti



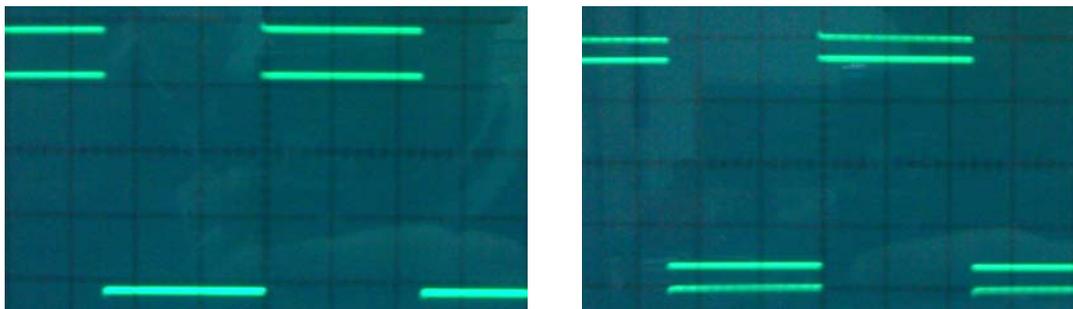
#### Oscillogrammi correlati



### Curva caratteristica d'uscita (sinusoidale 2volt/div e quadra 5volt/div)



### Onda quadra sovrapposta con e senza valore medio (ingresso DC e ingresso AC)



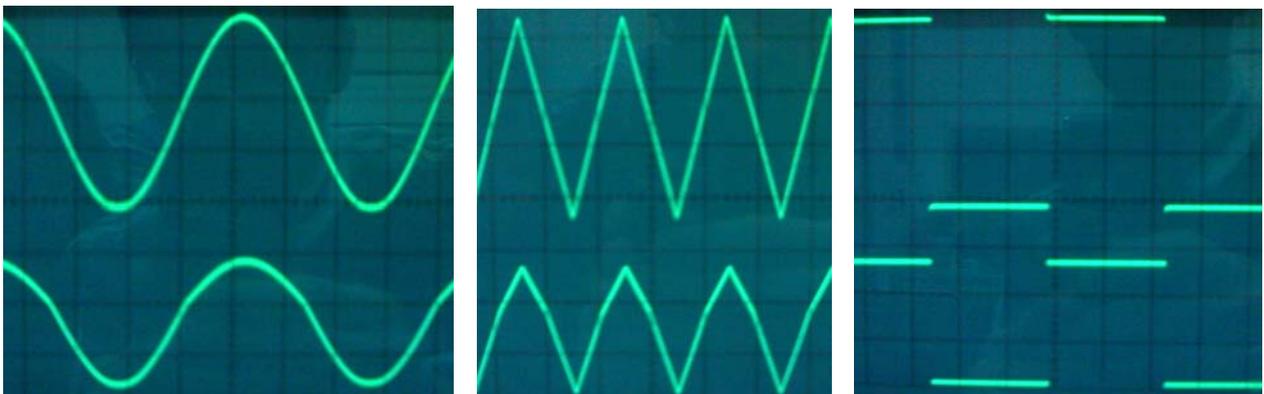
Confrontando i due oscillogrammi e tenendo presente che ogni quadratino vale 5V, il segnale si sposta verso l'alto di circa 0,4 quadratini, ossia il valore medio è circa 2V.

### Verifica con carico

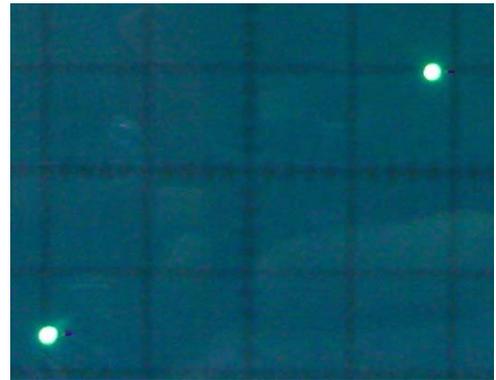
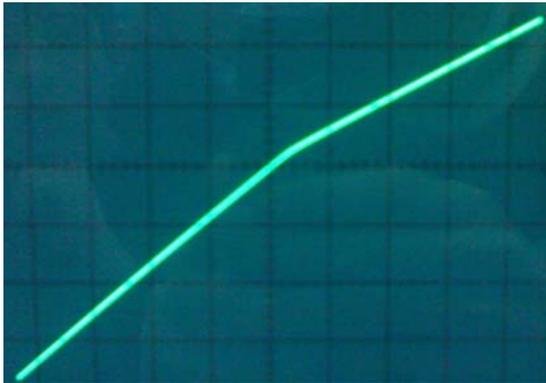
#### Oscillogrammi sovrapposti



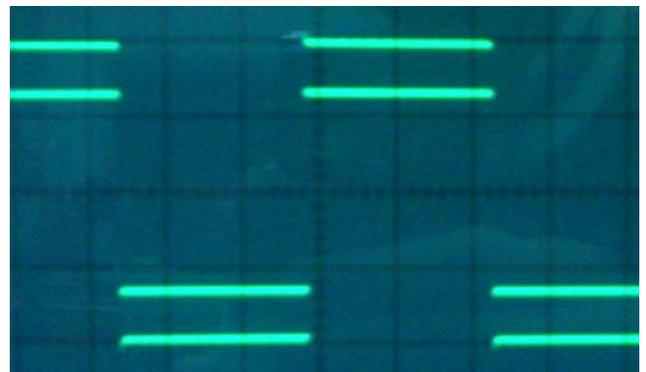
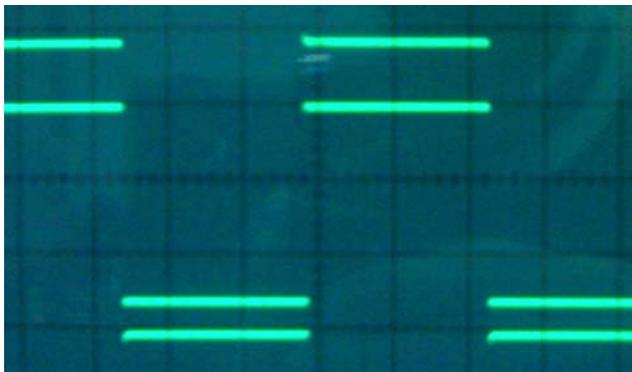
#### Oscillogrammi correlati



### Curva caratteristica d'uscita (sinusoidale 2volt/div e quadra 5volt/div)



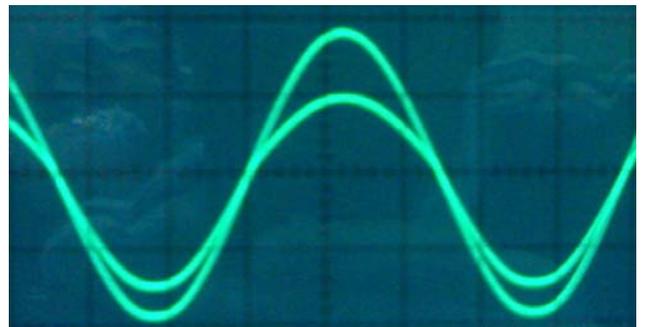
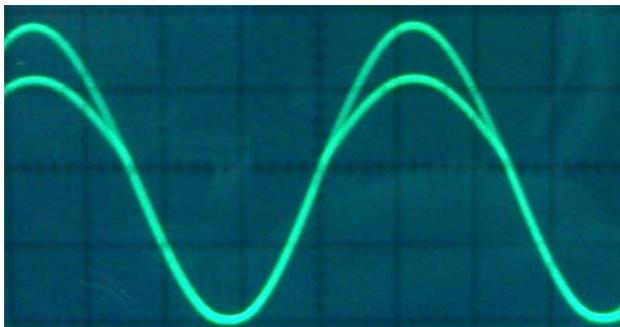
### Onda quadra sovrapposta con e senza valore medio (ingresso DC e ingresso AC)



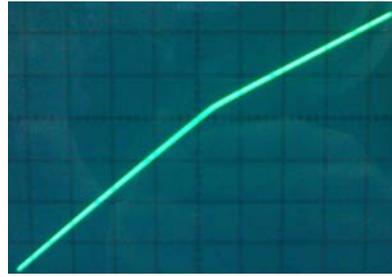
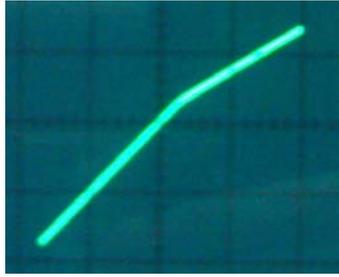
Confrontando i due oscillogrammi e tenendo presente che ogni quadratino vale 5V, il segnale si sposta verso l'alto di circa 0,3 quadratini, ossia il valore medio è circa 1,5V.

### Confronto degli oscillogrammi e rilievi.

L'oscillogramma a destra si riferisce ad uscita senza carico, quello a sinistra con uscita chiusa sul carico .



Senza carico, con il diodo interdetto, l'uscita riproduce l'ingresso, ossia il modulo della funzione di trasferimento vale 1; con il carico, con il diodo interdetto, il modulo della funzione di trasferimento assume il valore (dalle ampiezze d'ingresso e d'uscita)  $1,5/2 = 0,75$ . Ovviamente, le misure oscillografiche non hanno una elevata precisione e sensibilità.



La pendenza della parte negativa della curva caratteristica d'uscita senza carico è  $m_{sc} = -1/-1 = 1$ ;  
con carico è  $m_{cc} = -2,5/-3 = 0,83$ .

La pendenza della parte positiva della curva caratteristica d'uscita senza carico è  $m_{sc} = 0,8/1 = 0,8$ ;  
con carico è  $m_{cc} = 1,6/3 = 0,53$ .