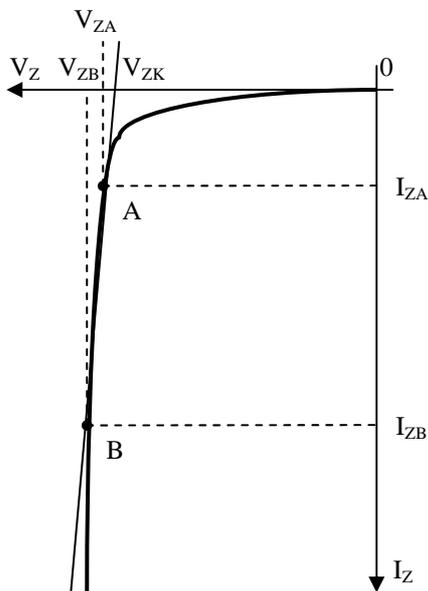


**RILIEVO PER PUNTI DELLA CARATTERISTICA INVERSA DI UN DIODO ZENER.  
 VERIFICA DELLA VARIAZIONE DELLA RETTA DI CARICO AL VARIARE  
 DELL'ALIMENTAZIONE E AL VARIARE DEL CARICO.  
 DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL DIODO  
 ZENER E VERIFICA DELLA SUA VALIDITÀ.  
 VERIFICA DEL FUNZIONAMENTO DI UNO STABILIZZATORE DI TENSIONE  
 UTILIZZANTE IL DIODO ZENER DI CUI SI È DETERMINATA LA CURVA  
 CARATTERISTICA E IL CIRCUITO EQUIVALENTE.**

**CIRCUITO EQUIVALENTE DEL DIODO ZENER**

Il diodo zener si comporta da normale diodo in polarizzazione diretta, mentre in polarizzazione inversa presenta una tensione  $V_Z$  alla quale entra in conduzione inversa e la corrente può variare quasi indipendentemente dalla tensione  $V_Z$ .



Dalla caratteristica inversa si ottiene il suo circuito equivalente. Il tratto più lineare della curva caratteristica può essere approssimato da una retta. Si scelgono due opportuni punti  $A(V_{ZA} ; I_{ZA})$  e  $B(V_{ZB} ; I_{ZB})$  e si approssima la caratteristica reale con tale retta; ovviamente tale approssimazione è valida solo nel tratto compreso tra i punti A e B.

Pertanto il punto di lavoro del diodo zener si farà variare (nel tratto AB) non più sulla caratteristica ma su tale retta, ossia si è linearizzato il comportamento del diodo zener e lo si schematizzerà mediante elementi lineari.

L'equazione della retta AB è del tipo  $I_Z = mV_Z + q$ .  
 Le quantità m e q si ricavano imponendo che tale retta passi per i punti A e B:

$$\begin{cases} I_{ZB} = mV_{ZB} + q \\ I_{ZA} = mV_{ZA} + q \end{cases}$$

Sottraendo membro a membro, si ottiene m:

$$\begin{cases} I_{ZB} = mV_{ZB} + q \\ I_{ZA} = mV_{ZA} + q \end{cases}$$

$$I_{ZB} - I_{ZA} = m(V_{ZB} - V_{ZA}) \Rightarrow m = \frac{I_{ZB} - I_{ZA}}{V_{ZB} - V_{ZA}} = \frac{1}{R_Z}$$

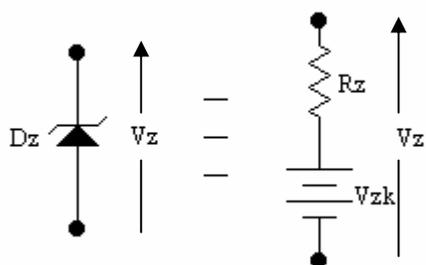
m ha le dimensioni dell'inverso di una resistenza.

Sostituendo  $m = \frac{1}{R_Z}$  in una delle due equazioni del sistema, si ottiene q:  $q = I_{ZA} - mV_{ZA}$ .

L'equazione della retta è: 
$$I_Z = \frac{1}{R_Z} V_Z + \left( I_{ZA} - \frac{V_{ZA}}{R_Z} \right).$$

Per  $I_Z = 0$  si ha l'intercetta con l'asse  $V_Z$ :  $V_Z = V_{ZA} - R_Z I_{ZA} = V_{ZK}$ , che, essendo una quantità costante viene indicata con  $V_{ZK}$ .

- $R_Z$ , valore costante, è la resistenza differenziale del diodo zener in polarizzazione inversa e giustifica l'aumento di tensione ai capi del diodo zener all'aumentare della corrente.
- $V_{ZK}$ , valore costante, fissa il valore di tensione al quale il diodo zener inizia a condurre inversamente.



L'equazione della retta, infine, è:

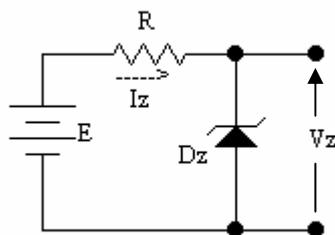
$$I_Z = \frac{1}{R_Z} V_Z - \frac{V_{ZK}}{R_Z} \Rightarrow V_Z = R_Z I_Z + V_{ZK}$$

- Il primo termine  $R_Z I_Z$ , tramite  $R_Z$ , tiene conto degli aumenti di differenza di potenziale di  $V_Z$  all'aumentare della corrente.
- Il secondo termine  $V_{ZK}$  viene schematizzato da un generatore di tensione che impone la minima tensione che si dovrà applicare tra catodo e anodo perché il diodo entri in conduzione inversa.

Il circuito a sinistra nella figura è il **circuito equivalente** del diodo zener funzionante tra i punti A e B della curva caratteristica.

## POLARIZZAZIONE DEL DIODO ZENER E RETTA DI CARICO

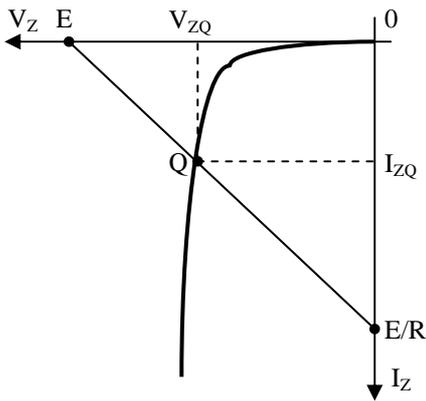
Consideriamo il circuito di polarizzazione del diodo zener.



$R$  è la resistenza di polarizzazione del diodo zener, ed è detta resistenza di carico del diodo. Applicando il secondo principio di Kirchhoff, si ha:

$$E = R I_Z + V_Z \Rightarrow I_Z = -\frac{1}{R} V_Z + \frac{E}{R}$$

Tale equazione viene detta **retta di carico** del diodo zener. Tale retta nel piano  $V_Z$ - $I_Z$ , in cui viene riportata anche la curva caratteristica, e una retta i cui punti rappresentano tutti i possibili punti di lavoro del diodo zener.

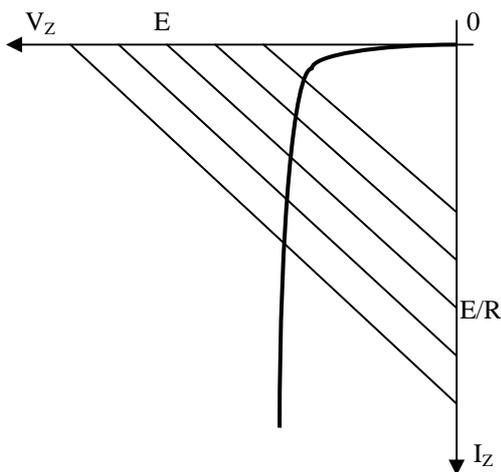


Poiché il punto di lavoro deve stare anche sulla curva caratteristica, il punto di lavoro del diodo sarà il punto di intersezione tra la retta di carico e la curva caratteristica, come mostrato in figura.

La retta di carico viene tracciata calcolando i suoi punti di intersezione con gli assi

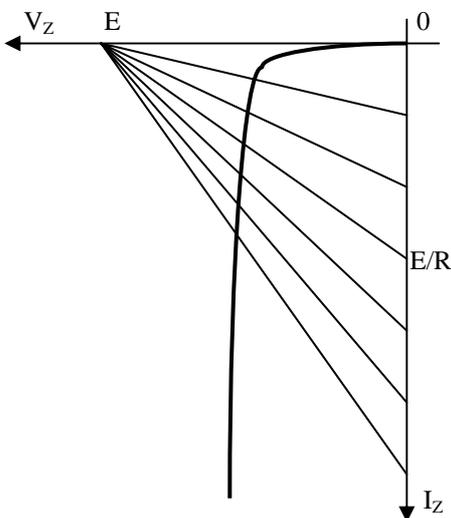
$$I_z = -\frac{1}{R} V_z + \frac{E}{R}$$

$V_z$	$I_z$
0	$E/R$
$E$	0



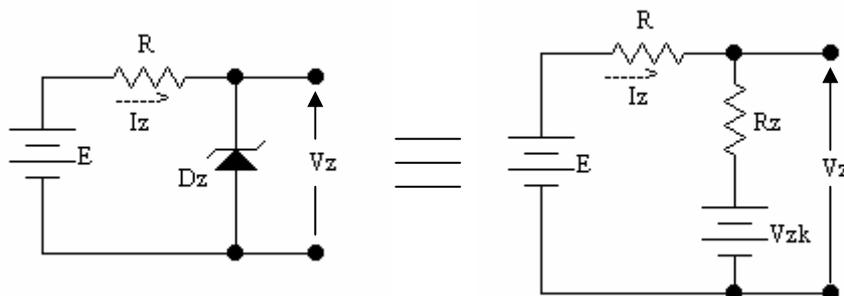
Al variare della tensione E di alimentazione o al variare della resistenza di carico, cambia la retta di carico e, quindi, il punto di lavoro.

Se cambia la tensione di alimentazione E mentre la resistenza di carico rimane costante R rimane costante, il coefficiente angolare della retta di carico rimane costante e si ottiene, al variare di E, un fascio di rette parallele, come mostrato in figura.



Se si tiene fissa E e si varia R, cambia il coefficiente angolare e si ottengono rette di carico che, essendo costante E, danno origine ad un fascio di rette per il punto (E ; 0), come mostrato in figura.

La verifica della validità del circuito equivalente si effettua calcolando i punti di lavoro del diodo zener dal circuito in cui al posto del diodo zener è stato messo il suo circuito equivalente.



Le formule per il calcolo del punto di lavoro teorico si ottengono applicando il secondo principio di Kirchhoff:

$$E = (R + R_Z)I_Z + V_{ZK} \Rightarrow I_Z = \frac{E - V_{ZK}}{R + R_Z} \quad \text{e} \quad V_Z = R_Z I_Z + V_{ZK}$$

I valori di  $V_Z$  e  $I_Z$  che si ottengono devono essere quasi coincidenti con quelli che si misurano. Tale confronto confermerà la validità del circuito equivalente sperimentalmente determinato.

**Dimensionamento del circuito. Rilievo della curva caratteristica e circuito equivalente. Variazione della retta di carico per variazione di R.**

Si utilizza un diodo zener  $P_Z = \frac{1}{2}W$  con  $V_Z = 5,6V$ .

Corrente massima  $I_{ZM}$  del diodo zener:  $I_{ZM} = \frac{P_Z}{V_Z} = \frac{0,5}{5,6} = 89,28mA$

Si fissa  $I_{ZMAX} = 10mA$  in corrispondenza di  $E = E_M = 10V$  e si dimensiona R:

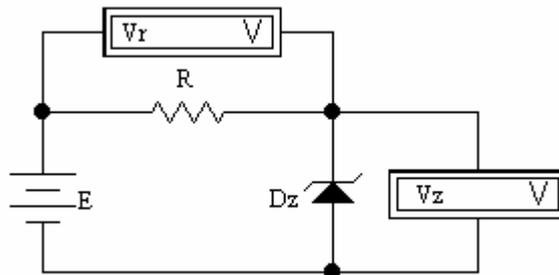
$$R = \frac{E_M - V_Z}{I_{ZMAX}} = \frac{10 - 5,6}{10 \cdot 10^{-3}} = 440\Omega, \quad \text{valore commerciale } 390\Omega.$$

La tensione E dell'alimentatore si fa variare da 0V a 10V come riportato nella corrispondente tabella. In corrispondenza di ogni valore di E, per il quale il diodo zener conduce, si ha una retta di carico.

Per ottenere il fascio di rette per un punto al variare di R, se ne fa variare il valore in più e in meno rispetto il valore di 390Ω come riportato nella corrispondente tabella. In corrispondenza di ogni valore di resistenza R si ha una retta di carico.

In entrambe le misure verrà impiegato un alimentatore variabile e un multimetro 4½ digit.

**Circuito di cablaggio e di misura**



**Procedimento della misura**

**Rilievo per punti della curva caratteristica**

1. Si collegano il generatore e il multimetro utilizzato come voltmetro ai morsetti dell'alimentatore e si regola l'alimentatore a 2V.
2. Si sposta il voltmetro ai capi della resistenza R e si misura la differenza di potenziale  $V_R$  ai suoi capi.

3. Si sposta il voltmetro ai capi del diodo zener e si misura la differenza di potenziale  $V_Z$  ai suoi capi.
4. Utilizzando i valori misurati si calcolano: la corrente  $I_Z = \frac{V_R}{R}$  e l'intercetta con l'asse  $I_Z$   $\frac{E}{R}$ .
5. si ripetono i punti 2; 3; 4 con i seguenti valori di E: 4V; 5V; 5,8V; 6V; 6,1V; 6,2V; 6,5V; 7V; 8V; 9V; 10V.
6. Si tabulano i dati. Nella tabella vengono anche riportati il punto alternativo dal quale far passare la retta di carico nel caso il valore dell'intercetta sia tale da essere fuori grafico e i valori di  $I_Z$  e di  $V_Z$  calcolati dal circuito equivalente mediante foglio Excell (le formule da usare sono quelle di seguito determinate).

### **Determinazione sperimentale del circuito equivalente e tracciamento delle curve caratteristiche al variare di E**

7. Si riportano i punti ( $V_Z$ ;  $I_Z$ ) misurati su carta millimetrata su un piano  $V_Z$ - $I_Z$ ; si uniscono i punti con un tratto continuo ad ottenere la curva caratteristica.
8. Si scelgono due punti A e B tra i quali la curva caratteristica è pressappoco rettilinea e si calcolano gli elementi  $R_Z$  e  $V_{ZK}$  del circuito equivalente.
9. Si traccia, su un altro foglio di carta millimetrata, la curva caratteristica e vi si riportano le rette di carico che si hanno al variare del valore E dell'alimentazione. Nel caso il valore E/R risulti fuori grafico, si utilizza il punto alternativo.
10. I punti di lavoro trovati sperimentalmente devono risultare ognuno sulla propria retta di carico (o quasi). Inoltre, i punti di lavoro trovati sperimentalmente devono avere valori molto prossimi a quelli calcolati con il circuito equivalente determinato sperimentalmente.

### **Variatione della retta di carico al variare di R e verifica dell'esattezza del circuito equivalente**

11. Si fissa il valore del generatore  $E = 8V$ .
12. Si inserisce il valore  $R = 100\Omega$ , si misurano  $V_Z$  e  $V_R$  e si calcolano  $I_Z = \frac{V_R}{R}$  e  $\frac{E}{R}$ .
13. Si ripete il punto 12 per i seguenti valori di R: 120 $\Omega$ ; 150 $\Omega$ ; 180 $\Omega$ ; 220 $\Omega$ ; 270 $\Omega$ ; 330 $\Omega$ ; 390 $\Omega$ ; 470 $\Omega$ ; 680 $\Omega$ ; 1k $\Omega$ ; 2,2k $\Omega$ .
14. Si tabulano i dati. Nella tabella vengono anche riportati il punto alternativo dal quale far passare la retta di carico nel caso il valore dell'intercetta sia tale da essere fuori grafico e i valori di  $I_Z$  e di  $V_Z$  calcolati dal circuito equivalente, prima determinato, mediante foglio Excell (le formule da usare sono quelle di seguito determinate determinate).
15. Si traccia, su un altro foglio di carta millimetrata, la curva caratteristica e vi si riportano le rette di carico che si hanno al variare del valore R della resistenza di carico. Nel caso il valore E/R risulti fuori grafico, si utilizza il punto alternativo.
16. I punti di lavoro trovati sperimentalmente devono risultare ognuno sulla propria retta di carico (o quasi). Inoltre, i punti di lavoro trovati sperimentalmente devono avere valori molto prossimi a quelli calcolati con il circuito equivalente determinato sperimentalmente.

### **Calcolo del punto alternativo**

Per le intercette E/R che cadono fuori dal grafico considerato si deve calcolare il punto alternativo da cui farla passare.

Si fissa il valore della corrente  $I_{Z1}$ , in modo che il punto della retta che si ottiene cada nel grafico, e si calcola il corrispondente valore  $V_{Z1}$ .

$$\begin{cases} I_Z = I_{Z1} \\ V_{Z1} = E - RI_{Z1} \end{cases}$$

### Curva caratteristica. Variazione della retta di carico al variare dell'alimentazione.

Valori misurati						Valori calcolati dal circuito equivalente		Punto alternativo		
Volt		mA			$\Omega$	Volt	Volt	mA	Volt	mA
E	$V_Z$	$V_R$	$I_Z$	E/R	$R_Z$	$V_{ZK}$	$I_Z$	$V_Z$	$V_{Z1}$	$I_{Z1}$
2	2	0	0	5,128	10	5,324	0	2	---	---
4	4	0	0	10,256	10	5,324	0	4	---	---
5	5	0	0	12,820	10	5,324	0	5	---	---
5,8	5,35	0,45	1,153	14,871	10	5,324	1,19	5,335	1,9	10
6	5,37	0,63	1,615	15,384	10	5,324	1,69	5,340	2,1	10
6,1	5,38	0,72	1,846	15,641	10	5,324	1,94	5,343	2,2	10
6,2	5,38	0,82	2,102	15,897	10	5,324	2,19	5,345	2,3	10
6,5	5,4	1,1	2,820	16,666	10	5,324	2,94	5,353	2,6	10
7	5,42	1,58	4,051	17,948	10	5,324	4,19	5,365	3,1	10
8	5,44	2,56	6,564	20,512	10	5,324	6,69	5,390	4,1	10
9	5,46	3,54	9,076	23,076	10	5,324	9,19	5,415	5,1	10
10	5,47	4,53	11,615	25,641	10	5,324	11,69	5,440	6,1	10

### Determinazione del circuito equivalente

Si scelgono i punti A(5,37 ;  $1,615 \cdot 10^{-3}$ ) e B(5,47 ;  $11,615 \cdot 10^{-3}$ )

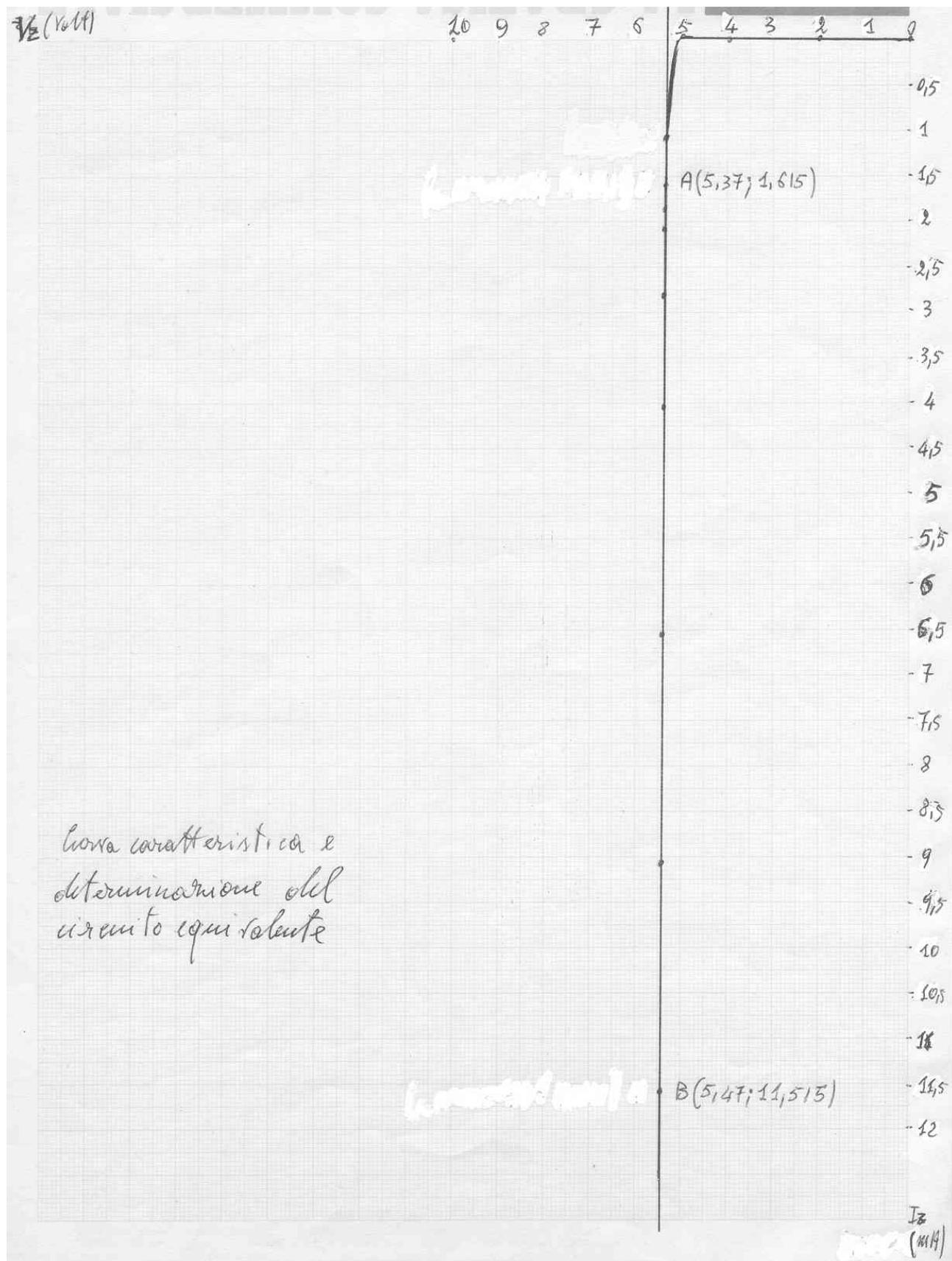
$$R_Z = \frac{1}{m} = \frac{V_{ZB} - V_{ZA}}{I_{ZB} - I_{ZA}} = \frac{5,47 - 5,37}{11,615 \cdot 10^{-3} - 1,615 \cdot 10^{-3}} = 10\Omega$$

$$V_{ZK} = V_{ZA} - R_Z I_{ZA} = 5,37 - 10 \cdot 1,615 \cdot 10^{-3} = 5,354V$$

### Variazione della retta di carico al variare di R.

Valori misurati						Valori calcolati dal circuito equivalente		Punto alternativo			
k $\Omega$	Volt		mA		Volt	$\Omega$	Volt	Volt	mA	Volt	mA
R	E	$V_Z$	$V_R$	$I_Z$	E/R	$R_Z$	$V_{ZK}$	$I_Z$	$V_Z$	$I_{Z1}$	$V_{Z1}$
0,1	8	5,49	2,51	25,1	80	10	5,324	24,327	5,567	20	6
0,12	8	5,51	2,49	20,75	66,666	10	5,324	20,584	5,529	20	5,6
0,15	8	5,5	2,5	16,666	53,333	10	5,324	16,725	5,491	20	5
0,18	8	5,47	2,53	14,055	44,444	10	5,324	14,084	5,464	20	4,4
0,22	8	5,45	2,55	11,590	36,363	10	5,324	11,634	5,440	20	3,6
0,27	8	5,45	2,55	9,444	29,629	10	5,324	9,557	5,419	20	2,6
0,33	8	5,44	2,56	7,757	24,242	10	5,324	7,870	5,402	---	---
0,39	8	5,44	2,56	6,564	20,512	10	5,324	6,69	5,390	---	---
0,47	8	5,43	2,57	5,468	17,021	10	5,324	5,575	5,379	---	---
0,68	8	5,41	2,59	3,808	11,764	10	5,324	3,878	5,362	---	---
1	8	5,39	2,61	2,61	8	10	5,324	2,649	5,350	---	---
2,2	8	5,35	2,65	1,204	3,636	10	5,324	1,210	5,336	---	---

**Grafici della curva caratteristica e variazione della retta di carico per variazione dell'alimentazione e della resistenza di carico.**



$V_E$  (Volt)

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

-0,5  
-1  
-1,5  
-2  
-2,5  
-3  
-3,5  
-4  
-4,5  
-5  
-5,5  
-6  
-6,5  
-7  
-7,5  
-8  
-8,5  
-9  
-9,5  
-10  
-10,5  
-11  
-11,5  
-12  
-12,5  
-13

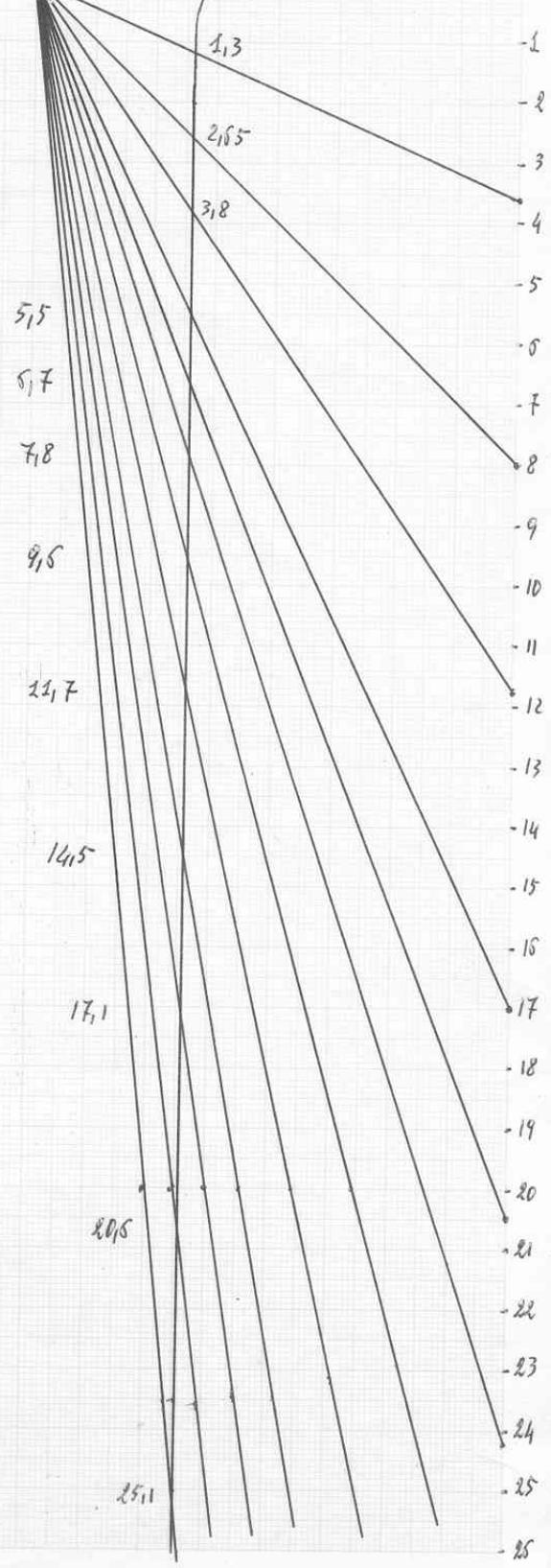
Variazione della retta  
di carico per variazioni  
di  $E$

2,8  
4,5  
5,55  
9,15  
11,65

$I_E$  (mA)

$V_2$  (Volt)

8 7 6 5 4 3 2 1 0



Variazione della d.d.t.  
di carico per variazione  
di R

$I_2$  (mA)

## Conclusioni

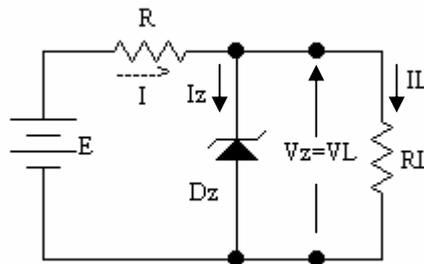
I valori misurati di  $V_Z$  e di  $I_Z$  e quelli calcolati utilizzando il circuito equivalente sperimentale, sono praticamente coincidenti; ciò evidenzia che il circuito equivalente determinato schematizza, tra i punti A e B, molto bene il comportamento del diodo zener, ossia ne dimostra la validità.

Le rette di carico determinate sperimentalmente al variare della tensione di alimentazione danno origine ad un fascio di rette parallele ed ognuna di esse passa per il punto di lavoro del diodo zener per quel dato valore di E.

Le rette di carico determinate sperimentalmente al variare della resistenza di carico danno origine ad un fascio di rette per il punto (8 ; 0) ed ognuna di esse passa per il punto di lavoro del diodo zener per quel dato valore di R.

## VERIFICA DEL FUNZIONAMENTO DI UNO STABILIZZATORE DI TENSIONE UTILIZZANTE IL DIODO ZENER DI CUI SI È DETERMINATA LA CURVA CARATTERISTICA E IL CIRCUITO EQUIVALENTE

### Richiami teorici



R è la resistenza di stabilizzazione;  $R_L$  è il carico. Il diodo zener, in conduzione inversa, fissa il valore della differenza di potenziale sul carico alla tensione  $V_Z$ . Se si hanno variazioni sia di carico, sia di alimentazione, purché il diodo zener rimanga in zona di conduzione inversa, stabilizza la tensione  $V_L$  al valore  $V_Z$ .

### Variazioni del carico $R_L$

$$E = RI + V_Z = RI + V_L = RI + R_L I_L \quad ; \quad I = I_Z + I_L$$

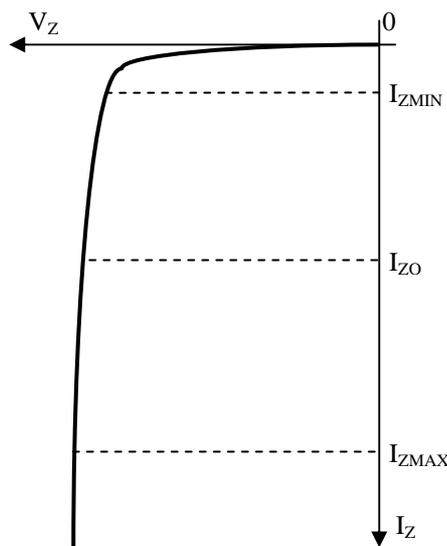
- Se  $R_L$  aumenta  $\Rightarrow$  poiché  $V_L = R_L I_L = V_Z = \text{costante} \Rightarrow I_L$  deve diminuire  $\Rightarrow$  poiché  $E = RI + V_Z = \text{costante}$  e  $I = I_Z + I_L = \text{costante} \Rightarrow$  tale variazione varrà compensata da un aumento di  $I_Z \Rightarrow V_L$  rimane costante.
- Se  $R_L$  diminuisce  $\Rightarrow I_L$  aumenta  $\Rightarrow I_Z$  diminuisce compensando l'aumento di  $I_L$  dovuta alla variazione del carico  $\Rightarrow V_L$  rimane costante.

### Variazioni dell'alimentazione E

– Se  $E$  aumenta, poiché  $I = \frac{E - V_Z}{R} \Rightarrow I$  aumenta  $\Rightarrow$  essendo  $I = I_L + I_Z = \frac{V_Z}{R_L} + I_Z$ ,  $I_L$  non può aumentare  $\Rightarrow$  deve aumentare  $I_Z$ , compensando la variazione di differenza di potenziale su  $R$  causata dall'aumento di  $E \Rightarrow V_L$  rimane costante.

– Se  $E$  diminuisce  $\Rightarrow I$  diminuisce  $\Rightarrow I_Z$  diminuisce  $\Rightarrow V_L$  rimane costante.

Il tutto è valido se le variazioni di  $I_Z$  non sono tali da portare il diodo zener né in zona di interdizione (sopra il ginocchio della curva caratteristica) né in una zona prossima a quella di massima dissipazione della potenza. Pertanto, si dovrà fissare un valore minimo  $I_{ZMIN}$  e un valore massimo  $I_{ZMAX}$  tra cui far variare la corrente  $I_Z$  del diodo zener.



Per ottenere il massimo campo di variazione bisogna fissare la corrente  $I_Z$  al centro di tale intervallo, ossia:

$$I_{ZO} = \frac{I_{ZMIN} + I_{ZMAX}}{2}$$

Il valore  $I_{ZMIN}$  si sceglie dalla curva caratteristica, appena sotto il ginocchio.

Il valore  $I_{ZMAX}$  si sceglie in modo che almeno 5 o 10 volte più piccolo di  $I_{ZM} = \frac{P_Z}{V_Z}$  = corrente massima assoluta del diodo zener.

### Retta di carico e sua variazione. Definizione di $R_{LMIN}$ e di $R_{LMAX}$ .

L'equazione della retta di carico si ottiene esplicitando  $I_Z$  in funzione di  $V_Z$  dalle seguenti due equazioni associate al circuito stabilizzatore.

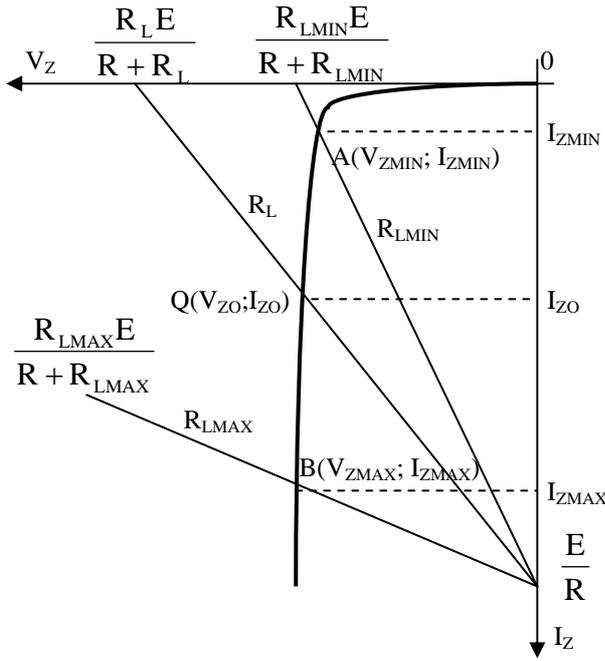
$$\begin{cases} E = RI + V_Z \\ I = I_Z + I_L \\ I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_L} \end{cases} \Rightarrow I = \frac{E - V_Z}{R} = I_Z + I_L = I_Z + \frac{V_Z}{R_L} \Rightarrow \frac{E - V_Z}{R} = I_Z + \frac{V_Z}{R_L} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_Z = -\frac{V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_L} + \frac{E}{R} \Rightarrow I_Z = -\frac{R + R_L}{RR_L} V_Z + \frac{E}{R} \quad \text{retta di carico del diodo zener.}$$

Il coefficiente angolare è:  $m = -\frac{R + R_L}{RR_L} = -\frac{1}{R // R_L}$

e intercetta gli assi nei punti

$V_Z$	$I_Z$
0	$\frac{E}{R}$
$\frac{R_L E}{R + R_L}$	0



### Variation of the load $R_L$

Se varia il carico  $R_L$ , il punto  $(0 ; E/R)$ , l'intercetta dell'asse  $I_Z$ , rimane costante, mentre varia il coefficiente angolare della retta di carico.

La retta di carico ruoterà attorno al punto  $(0 ; E/R)$ .

Poiché

$$m = -\frac{R + R_L}{RR_L} = -\frac{1}{R // R_L} = -\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_L}\right),$$

un aumento del carico  $R_L$  produce una diminuzione, in valore assoluto, del coefficiente angolare. Il valore limite per  $R_{LMAX}$  si ottiene imponendo che per tale valore la retta di carico passi per il punto B della curva caratteristica corrispondente alla  $I_{ZMAX}$  fissata.

Pertanto:

$$\begin{aligned} I_{ZMAX} &= -\frac{R + R_{LMAX}}{RR_{LMAX}} V_{ZMAX} + \frac{E}{R} \Rightarrow RR_{LMAX} I_{ZMAX} = -RV_{ZMAX} - R_{LMAX} V_{ZMAX} + R_{LMAX} E \Rightarrow \\ &\Rightarrow RR_{LMAX} I_{ZMAX} + R_{LMAX} V_{ZMAX} - R_{LMAX} E = -RV_{ZMAX} \Rightarrow \\ &\Rightarrow R_{LMAX} (RI_{ZMAX} + V_{ZMAX} - E) = -RV_{ZMAX} \Rightarrow R_{LMAX} = \frac{RV_{ZMAX}}{E - RI_{ZMAX} - V_{ZMAX}} \end{aligned}$$

I valori  $V_{ZMIN}$  e  $V_{ZMAX}$  si determinano dalla curva caratteristica una volta fissati i valori di  $I_{ZMIN}$  e  $I_{ZMAX}$ .

Una diminuzione del carico  $R_L$  produce un aumento, in valore assoluto, del coefficiente angolare. Il valore limite per  $R_{LMIN}$  si ottiene imponendo che per tale valore la retta di carico passi per il punto A della curva caratteristica corrispondente alla  $I_{ZMIN}$  fissata. Pertanto:

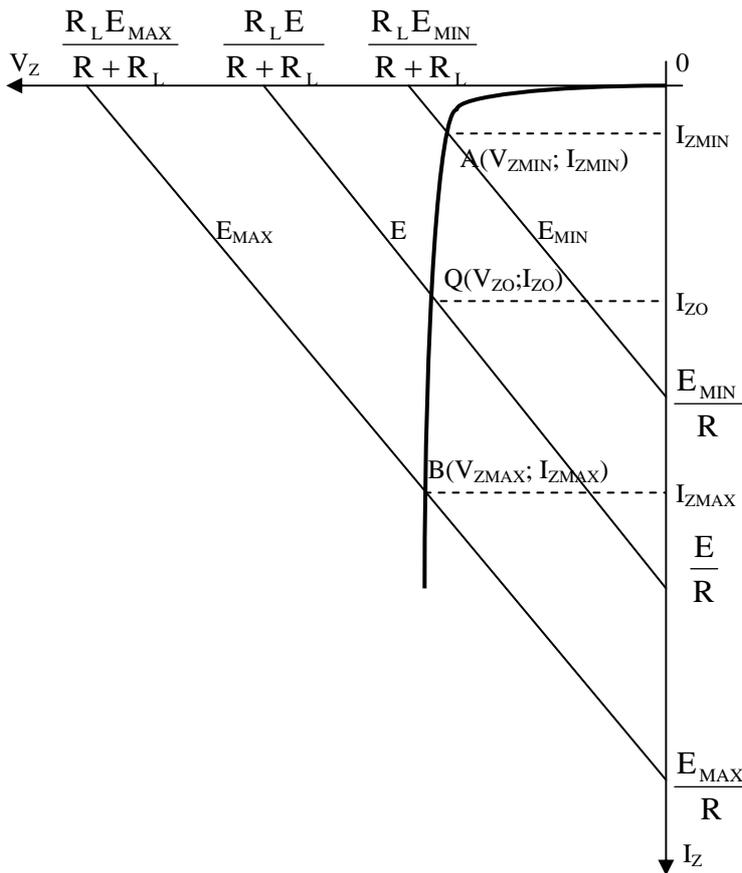
$$I_{ZMIN} = -\frac{R + R_{LMIN}}{RR_{LMIN}} V_{ZMIN} + \frac{E}{R} \Rightarrow R_{LMIN} = \frac{RV_{ZMIN}}{E - RI_{ZMIN} - V_{ZMIN}}$$

Quando varia  $E$ , il coefficiente angolare rimane costante, mentre variano le intercette. La retta di carico si sposterà parallelamente a se stessa.

I valori massimo  $E_{MAX}$  e minimo  $E_{MIN}$  che l'alimentazione può raggiungere senza che il circuito perda la sua caratteristica di stabilizzatore si ottengono in corrispondenza delle rette di carico passanti per i punti A e B.

Per il valore massimo  $E_{MAX}$  si ha:

$$I_{ZMAX} = -\frac{R + R_L}{RR_L} V_{ZMAX} + \frac{E_{MAX}}{R} \Rightarrow \frac{E_{MAX}}{R} = I_{ZMAX} + \frac{R + R_L}{RR_L} V_{ZMAX} \Rightarrow$$



$$\Rightarrow E_{MAX} = RI_{ZMAX} + \frac{R + R_L}{R_L} V_{ZMAX}$$

Per il valore massimo  $E_{MIN}$  si ha:

$$I_{ZMIN} = -\frac{R + R_L}{RR_L} V_{ZMIN} + \frac{E_{MIN}}{R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{MIN} = RI_{ZMIN} + \frac{R + R_L}{R_L} V_{ZMIN}$$

### Dimensionamento del circuito

Si fissa:  $E = 10V$  ;  $I_{ZMIN} = 1mA$  ;  $I_{ZMAX} = 19mA$  ;  $R_L = 1k\Omega$  ;  $R_Z = 10\Omega$  ;  $V_{ZK} = 5,354V$ .

Si calcolano le coordinate del punto Q:  $I_{ZO} = \frac{I_{ZMIN} + I_{ZMAX}}{2} = \frac{1 \cdot 10^{-3} + 19 \cdot 10^{-3}}{2} = 10mA$  ;

in corrispondenza di tale corrente, dalla curva caratteristica, risulta:  $V_{ZO} = 5,46V$  ;

oppure dal circuito equivalente:  $V_{ZO} = R_Z I_{ZO} + V_{ZK} = 10 \cdot 10 \cdot 10^{-3} + 5,354 = 5,454V$  .

Si dimensiona R assumendo il carico di valore infinito:  $R = \frac{E - V_{ZO}}{I_{ZO}} = \frac{10 - 5,46}{10 \cdot 10^{-3}} = 454\Omega$  , valore commerciale usato  $390\Omega$ . La corrente risulterà di poco superiore a  $10mA$ .

### Calcolo di $R_{LMAX}$ ; $R_{LMIN}$ ; $E_{MAX}$ ; $E_{MIN}$

Dalla curva caratteristica si ha:  $V_{ZMIN} = 5,35V$  ;  $V_{ZMAX} = 5,51V$ ,

oppure, dal circuito equivalente,  $V_{ZMIN} = R_Z I_{ZMIN} + V_{ZK} = 10 \cdot 1 \cdot 10^{-3} + 5,354 = 5,364V$

$$V_{ZMAX} = R_Z I_{ZMAX} + V_{ZK} = 10 \cdot 19 \cdot 10^{-3} + 5,354 = 5,44V$$

$$R_{LMAX} = \frac{RV_{ZMAX}}{E - RI_{ZMAX} - V_{ZMAX}} = \frac{390 \cdot 5,51}{10 - 0,39 \cdot 10^3 \cdot 19 \cdot 10^{-3} - 5,51} = -736\Omega .$$

Il valore negativo sta ad indicare che non esiste un limite superiore per  $R_L$ , ossia  $I_Z$  risulta minore di  $I_{ZMAX}$  per qualunque valore di  $R_L$  (anche  $R_L = \infty$ ).

$$R_{LMIN} = \frac{R V_{ZMIN}}{E - R I_{ZMIN} - V_{ZMIN}} = \frac{390 \cdot 5,35}{10 - 0,39 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} - 5,35} = 490 \Omega$$

$$E_{MAX} = R I_{ZMAX} + \frac{R + R_L}{R_L} V_{ZMAX} = 0,39 \cdot 10^3 \cdot 19 \cdot 10^{-3} + \frac{0,39 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \cdot 5,51 = 15,07V$$

$$E_{MIN} = R I_{ZMIN} + \frac{R + R_L}{R_L} V_{ZMIN} = 0,39 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} + \frac{0,39 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \cdot 5,35 = 7,83V$$

### Scelta dei valori di $R_L$ e di $E$ da utilizzare nella verifica

**Variatione di  $R_L$ :** poiché  $490 \Omega \leq R_L \leq \infty$ , si scelgono i seguenti valori:

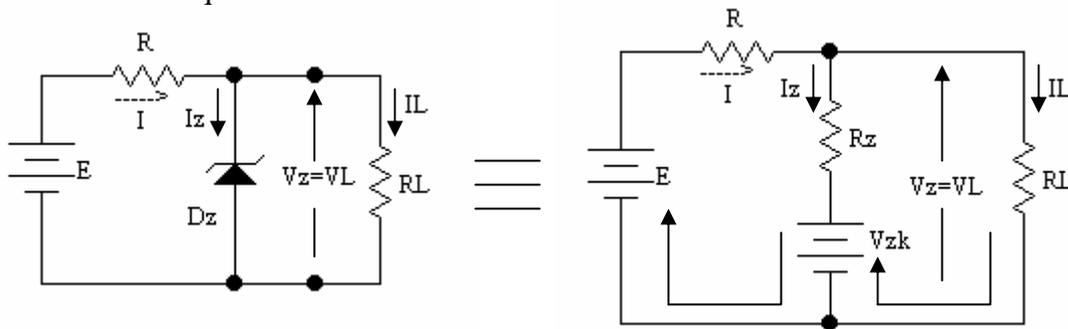
$\infty$  ; 12k $\Omega$  ; 4,7k $\Omega$  ; 3,3k $\Omega$  ; 2,2k $\Omega$  ; 1,5k $\Omega$  ; 1,2k $\Omega$  ; 1k $\Omega$  ; 0,82k $\Omega$  ; 0,68k $\Omega$  ; 0,56k $\Omega$  ; 0,47k $\Omega$

**Variatione di  $E$ :** poiché  $7,83V \leq E \leq 15,07V$ , si fissa una variazione di  $\pm 20\%$  di  $E$ , ossia si fa variare  $E$  tra i valori  $8V \leq E \leq 12V$ . si scelgono i seguenti valori di  $E$ :

8V ; 8,5V ; 9V ; 9,5V ; 10V ; 10,5V ; 11V ; 11,5V ; 12V

### Calcolo teorico dei valori da misurare

Si utilizza il circuito equivalente del diodo zener



Utilizzando i principi di Kirchhoff si calcolano  $I$  ;  $I_Z$  ;  $I_L$ , e, quindi, applicando la legge di Ohm, si calcolano  $V_R$  ;  $V_Z$  ;  $V_L$ . Si sostituisce la prima nella seconda; dalla terza si esplicita  $I_L$  e si sostituisce nella seconda.

$$\begin{cases} I = I_Z + I_L \\ E - V_{ZK} = R I + R_Z I_Z \Rightarrow R I_Z + R I_L + R_Z I_Z = E - V_{ZK} \Rightarrow (R + R_Z) I_Z + R I_L = E - V_{ZK} \Rightarrow \\ V_{ZK} = -R_Z I_Z + R_L I_L \Rightarrow I_L = \frac{V_{ZK} + R_Z I_Z}{R_L} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow (R + R_Z)I_Z + R \frac{V_{ZK} + R_Z I_Z}{R_L} &= E - V_{ZK} \Rightarrow (R + R_Z)I_Z + \frac{R}{R_L} V_{ZK} + \frac{RR_Z}{R_L} I_Z = E - V_{ZK} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left( R + R_Z + \frac{RR_Z}{R_L} \right) I_Z = E - V_{ZK} - \frac{R}{R_L} V_{ZK} \Rightarrow \\ \Rightarrow (RR_L + R_Z R_L + RR_Z) I_Z &= R_L E - R_L V_{ZK} - R V_{ZK} \Rightarrow I_Z = \frac{R_L (E - V_{ZK}) - R V_{ZK}}{RR_L + R_Z R_L + RR_Z} \end{aligned}$$

Nota  $I_Z$  si calcolano  $I_L$  e  $I$ :  $I = I_Z + I_L$  ;  $I_L = \frac{V_{ZK} + R_Z I_Z}{R_L}$

e quindi  $V_Z = R_Z I_Z + V_{ZK}$  ;  $V_L = R_L I_L$  ;  $V_R = RI$

### Procedimento della verifica

#### Variazioni del carico $R_L$

1. Si collega l'alimentatore variabile e lo si regola a 10V.
2. Si lasciano aperti i morsetti del carico
3. Si misurano  $V_L = V_Z$  e  $V_R$ . quindi, con i valori misurati, si calcolano:

$$I = \frac{V_R}{R} ; I_L = \frac{V_L}{R_L} ; I_Z = I - I_L ; \frac{R_L E}{R + R_L} ; \frac{E}{R}$$

4. Si inseriscono, in successione i valori di  $R_L$ : 12k $\Omega$  ; 4,7k $\Omega$  ; 3,3k $\Omega$  ; 2,2k $\Omega$  ; 1,5k $\Omega$  ; 1,2k $\Omega$  ; 1k $\Omega$  ; 0,82k $\Omega$  ; 0,68k $\Omega$  ; 0,56k $\Omega$  ; 0,47k $\Omega$ , e per ognuno di essi si ripete il punto 3.
5. Si tabulano i dati. Nella tabella vengono anche riportati il punto alternativo dal quale far passare la retta di carico nel caso il valore dell'intercetta sia tale da essere fuori grafico e i valori di  $I_Z$  e di  $V_Z$  calcolati dal circuito equivalente, prima determinato, mediante foglio Excell.
6. Si riportano sul grafico della curva caratteristica le rette di carico che intercettano gli assi nei punti  $\left( \frac{R_L E}{R + R_L}; 0 \right)$  e  $\left( 0; \frac{E}{R} \right)$ . Si determinano graficamente le correnti per ogni retta e si confrontano con quelli misurati e quelli calcolati.

#### Variazioni dell'alimentazione

7. Si fissa il valore di  $R_L$  a 1k $\Omega$  e si regola l'alimentatore variabile  $E$  a 8V.
8. Si misurano  $V_L = V_Z$  e  $V_R$ . quindi, con i valori misurati, si calcolano:

$$I = \frac{V_R}{R} ; I_L = \frac{V_L}{R_L} ; I_Z = I - I_L ; \frac{R_L E}{R + R_L} ; \frac{E}{R}$$

9. Si regola, in successione, l'alimentatore  $E$  a 8,5V ; 9V ; 9,5V ; 10V ; 10,5V ; 11V ; 11,5V ; 12V e, per ognuno, si ripete il punto 8.

10. Si tabulano i dati. Nella tabella vengono anche riportati il punto alternativo dal quale far passare la retta di carico nel caso il valore dell'intercetta sia tale da essere fuori grafico e i valori di  $I_Z$  e di  $V_Z$  calcolati dal circuito equivalente, prima determinato, mediante foglio Excell.
11. Si riportano sul grafico della curva caratteristica le rette di carico che intercettano gli assi nei punti  $\left(\frac{R_L E}{R + R_L}; 0\right)$  e  $\left(0; \frac{E}{R}\right)$ . Si determinano graficamente le correnti per ogni retta e si confrontano con quelli misurati e quelli calcolati.

### Determinazione del punto alternativo

Nel caso che una, o entrambe, delle intersezioni con gli assi cada fuori dal grafico, è necessario calcolare un altro punto, o due, della retta che cada nel grafico.

Si fissa il valore di  $I_Z = I_{Z1}$  e si calcola  $V_{Z1}$ :

$$I_{Z1} = -\frac{R + R_L}{R R_L} V_{Z1} + \frac{E}{R} \Rightarrow V_{Z1} = \frac{R_L}{R + R_L} E - \frac{R R_L}{R + R_L} I_{Z1} = \frac{R_L}{R + R_L} (E - R I_{Z1})$$

### Variazione della retta di carico al variare di $R_L$

Valori misurati							Intercette		Punto alternativo	
kΩ	Volt			mA			Volt	mA	mA	Volt
$R_L$	E	$V_L=V_Z$	$V_R$	I	$I_L$	$I_Z$	$R_L E / (R + R_L)$	E/R	$I_{Z1}$	$V_{Z1}$
∞	10	5,48	4,52	11,589	0	11,589	9,996	25,641	10	6,097
12	10	5,48	4,52	11,589	0,4566	11,133	9,685	25,641	10	5,907
4,7	10	5,47	4,53	11,615	1,1638	10,451	9,233	25,641	10	5,632
3,3	10	5,47	4,53	11,615	1,6575	9,9578	8,943	25,641	10	5,455
2,2	10	5,47	4,53	11,615	2,4863	9,129	8,494	25,641	10	5,181
1,5	10	5,46	4,54	11,641	3,64	8,001	7,936	25,641	10	4,841
1,2	10	5,46	4,54	11,641	4,55	7,091	7,547	25,641	10	4,603
1	10	5,45	4,55	11,666	5,45	6,216	7,194	25,641	10	4,388
0,82	10	5,44	4,56	11,692	6,6341	5,058	6,776	25,641	10	4,133
0,68	10	5,43	4,57	11,717	7,9852	3,732	6,355	25,641	10	3,876
0,56	10	5,4	4,6	11,794	9,6428	2,152	5,894	25,641	10	3,595
0,47	10	5,48	4,52	11,589	11,589	0	5,465	25,641	10	3,333

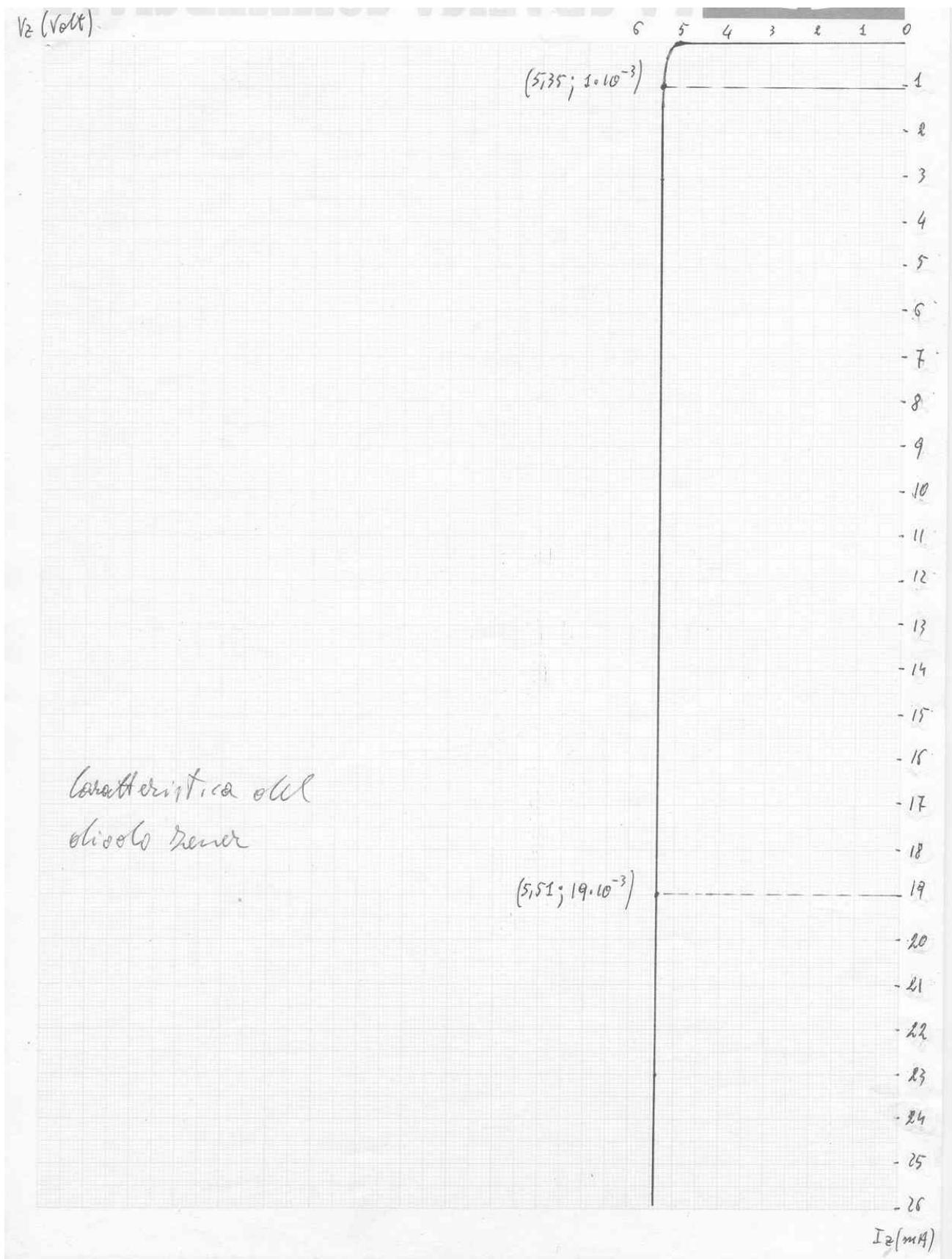
Valori misurati						
kΩ	Volt			mA		
$R_L$	E	$V_L=V_Z$	$V_R$	I	$I_L$	$I_Z$
∞	10	5,440	4,559	11,690	0	11,684
12	10	5,436	4,563	11,701	0,453	11,248
4,7	10	5,429	4,570	11,718	1,155	10,563
3,3	10	5,424	4,575	11,731	1,643	10,087
2,2	10	5,416	4,583	11,751	2,462	9,2893
1,5	10	5,405	4,594	11,780	3,603	8,1762
1,2	10	5,397	4,602	11,802	4,497	7,3048
1	10	5,388	4,611	11,824	5,388	6,4363
0,82	10	5,376	4,623	11,853	6,557	5,2966
0,68	10	5,36	4,636	11,887	7,888	3,9989
0,56	10	5,347	4,652	11,928	9,549	2,3791
0,47	10	5,330	4,669	11,973	11,341	0,632

Relativamente all'ultima riga della tabella dei valori misurati, in corrispondenza del carico  $R_L = 470\Omega$ , il diodo risulta non in conduzione, ossia il punto di lavoro risulta al di sopra della zona del ginocchio della curva caratteristica.

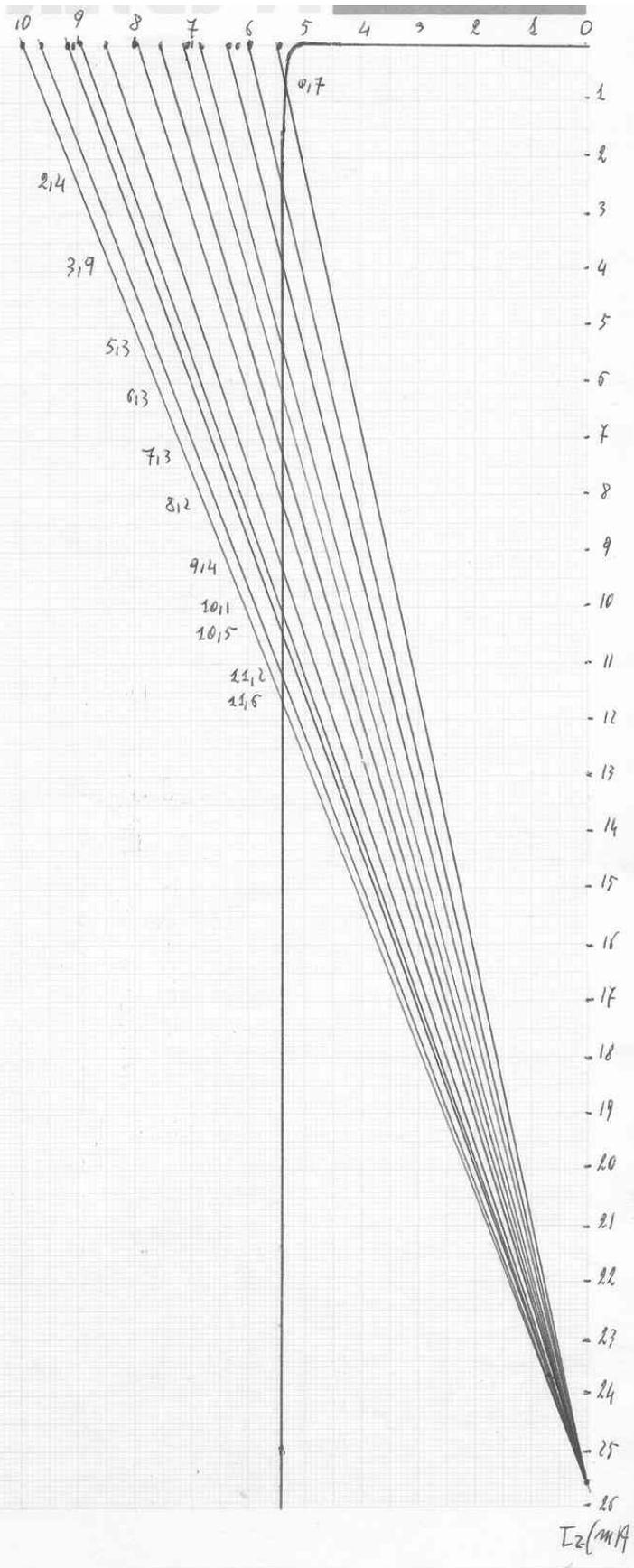
Valori misurati							Intercette		Punto alternativo	
k $\Omega$	Volt			mA			Volt	mA	mA	Volt
$R_L$	E	$V_L=V_Z$	$V_R$	I	$I_L$	$I_Z$	$R_L E / (R + R_L)$	E/R	$I_{Z1}$	$V_{Z1}$
1	8	5,36	2,64	6,769	5,36	1,409	5,755	20,512	10	2,949
1	8,5	5,4	3,1	7,948	5,4	2,548	6,115	21,794	10	3,309
1	9	5,42	3,58	9,179	5,42	3,759	6,474	23,076	10	3,669
1	9,5	5,44	4,06	10,410	5,44	4,970	6,834	24,358	10	4,028
1	10	5,45	4,55	11,666	5,45	6,216	7,194	25,641	10	4,388
1	10,5	5,46	5,04	12,923	5,46	7,463	7,553	26,923	10	4,748
1	11	5,47	5,53	14,179	5,47	8,709	7,913	28,205	10	5,107
1	11,5	5,47	6,03	15,461	5,47	9,991	8,273	29,487	10	5,467
1	12	5,48	6,52	16,717	5,48	11,237	8,633	30,769	10	5,827

Valori misurati						
k $\Omega$	Volt			mA		
$R_L$	E	$V_L=V_Z$	$V_R$	I	$I_L$	$I_Z$
1	8	5,338	2,661	6,823	5,338	1,484
1	8,5	5,351	3,148	8,073	5,351	2,722
1	9	5,363	3,636	9,324	5,363	3,960
1	9,5	5,375	4,124	10,574	5,375	5,198
1	10	5,388	4,611	11,824	5,388	6,436
1	10,5	5,400	5,099	13,075	5,400	7,674
1	11	5,413	5,586	14,325	5,413	8,912
1	11,5	5,425	6,074	15,575	5,425	10,150
1	12	5,437	6,562	16,825	5,437	11,388

**Grafici della curva caratteristica e variazione della retta di carico per variazione dell'alimentazione e del carico.**

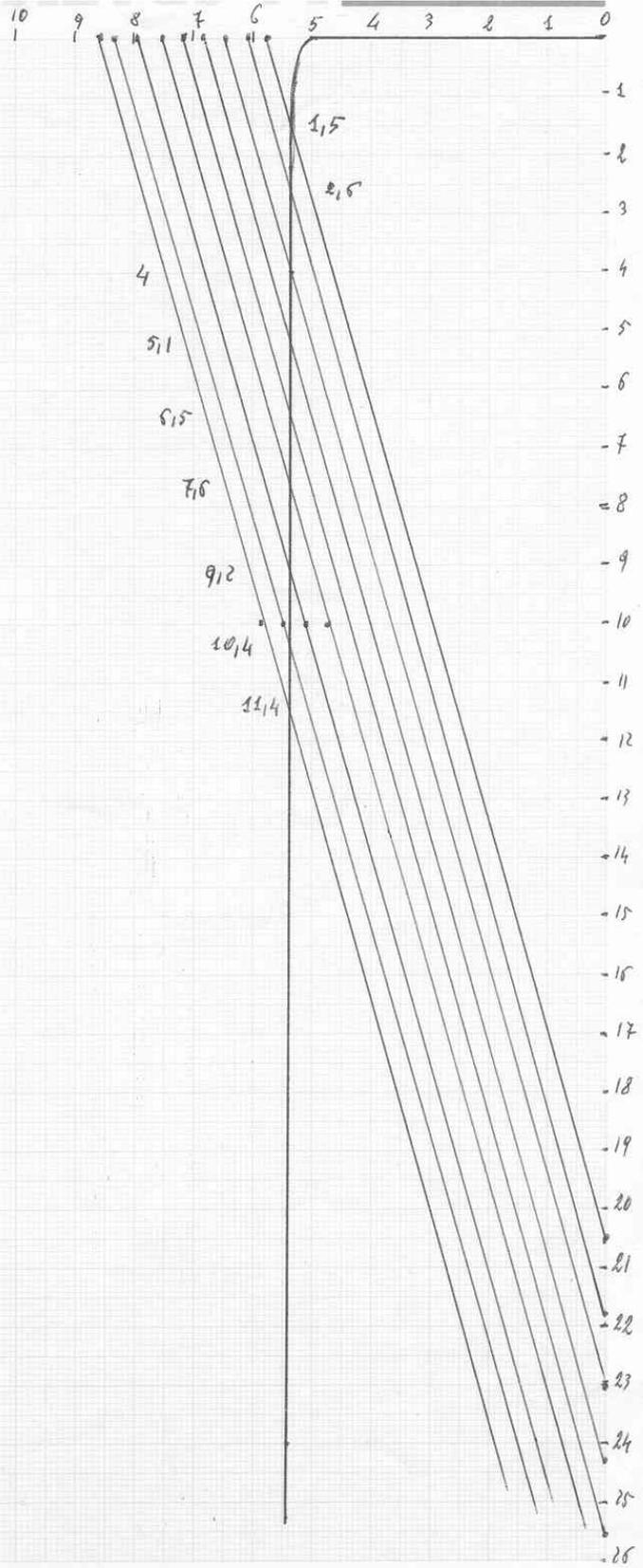


$V_L$  (VOLT) - VARIAZIONI  $R_L$



Rette di carico al variare di  $R_L$

$V_2$  (Volt) VARIAZIONE E



Rette di carico al  
variare di  $E$

## SI RIPETE CON UN DIODO ZENER DI 6,8V ½W

### Diodo zener

### Dimensionamento del circuito. Rilievo della curva caratteristica e circuito equivalente. Variazione della retta di carico per variazione di R.

Si utilizza un diodo zener  $P_Z = \frac{1}{2}W$  con  $V_Z = 6,8V$ .

Corrente massima  $I_{ZM}$  del diodo zener:  $I_{ZM} = \frac{P_Z}{V_Z} = \frac{0,5}{6,8} = 73,53mA$

Si fissa  $I_{ZMAX} = 8mA$  in corrispondenza di  $E = 12V$  e si dimensiona R:

$$R = \frac{E_M - V_Z}{I_{ZMAX}} = \frac{12 - 6,8}{8 \cdot 10^{-3}} = 650\Omega, \quad \text{valore commerciale } 680\Omega.$$

La tensione E dell'alimentatore si fa variare da 0V a 12V come riportato nella corrispondente tabella. In corrispondenza di ogni valore di E, per il quale il diodo zener conduce, si ha una retta di carico.

Per ottenere il fascio di rette per un punto al variare di R, se ne fa variare il valore in più e in meno rispetto il valore di 680Ω come riportato nella corrispondente tabella. In corrispondenza di ogni valore di resistenza R si ha una retta di carico.

In entrambe le misure verrà impiegato un alimentatore variabile e un multimetro 4½ digit.

Nelle tabelle vengono anche riportati il punto alternativo dal quale far passare la retta di carico nel caso il valore dell'intercetta sia tale da essere fuori grafico e i valori di  $I_Z$  e di  $V_Z$  calcolati dal circuito equivalente, prima determinato, mediante foglio Excell.

### Curva caratteristica. Variazione della retta di carico al variare dell'alimentazione.

Valori misurati					Valori calcolati dal circuito equivalente		Punto alternativo			
Volt			mA		Ω	Volt	Volt	mA	Volt	mA
E	V <sub>Z</sub>	V <sub>R</sub>	I <sub>Z</sub>	E/R	R <sub>Z</sub>	V <sub>ZK</sub>	I <sub>Z</sub>	V <sub>Z</sub>	V <sub>Z1</sub>	I <sub>Z1</sub>
0	0	0	0	0	17	6,8	0	0	---	---
1	1	0	0	1,470	17	6,8	0	1	---	---
3	3	0	0	4,411	17	6,8	0	3	---	---
5	5	0	0	7,352	17	6,8	0	5	---	---
6	6	0	0	8,823	17	6,8	0	6	---	---
6,5	6,5	0	0	9,558	17	6,8	0	6,5	---	---
6,7	6,7	0	0	9,852	17	6,8	0	6,7	---	---
6,8	6,782	0,018	0,026	10	17	6,8	0	6,8	---	---
6,9	6,798	0,102	0,15	10,147	17	6,8	0,143	6,802	---	---
7	6,812	0,188	0,276	10,294	17	6,8	0,286	6,804	---	---
8	6,827	1,173	1,725	11,764	17	6,8	1,721	6,829	10	1,2
9	6,85	2,15	3,161	13,235	17	6,8	3,156	6,853	10	2,2
10	6,878	3,122	4,591	14,705	17	6,8	4,591	6,878	10	3,2
11	6,907	4,093	6,019	16,176	17	6,8	6,025	6,902	10	4,2
12	6,935	5,065	7,448	17,647	17	6,8	7,460	6,926	10	5,2

### Determinazione del circuito equivalente

Si scelgono i punti A(6,812 ; 0,274·10<sup>-3</sup>) e B(6,935 ; 7,44·10<sup>-3</sup>)

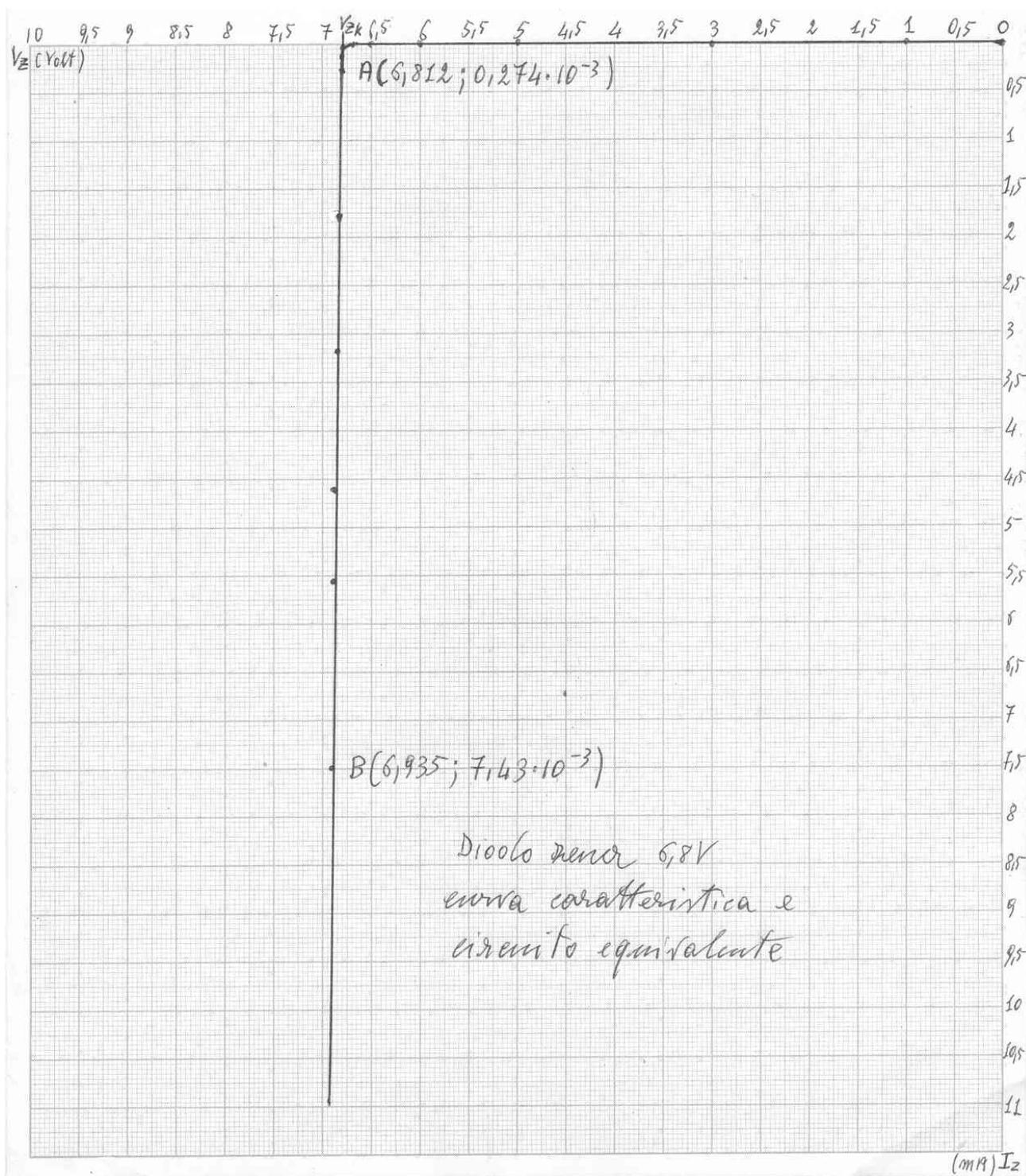
$$R_z = \frac{1}{m} = \frac{V_{ZB} - V_{ZA}}{I_{ZB} - I_{ZA}} = \frac{6,935 - 6,812}{7,44 \cdot 10^{-3} - 0,274 \cdot 10^{-3}} = 17\Omega$$

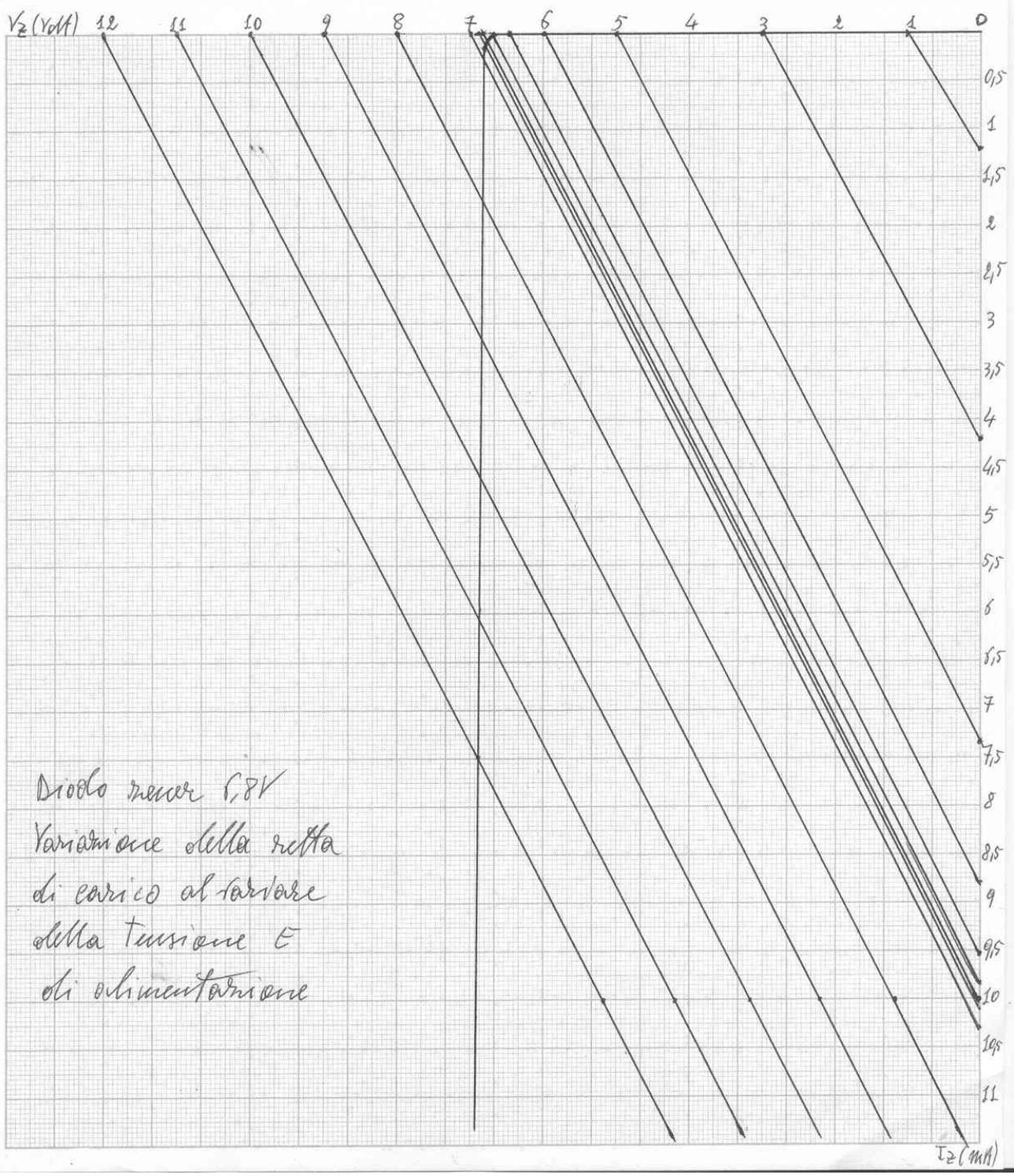
$$V_{ZK} = V_{ZA} - R_z I_{ZA} = 6,812 - 17 \cdot 0,274 \cdot 10^{-3} = 6,8V$$

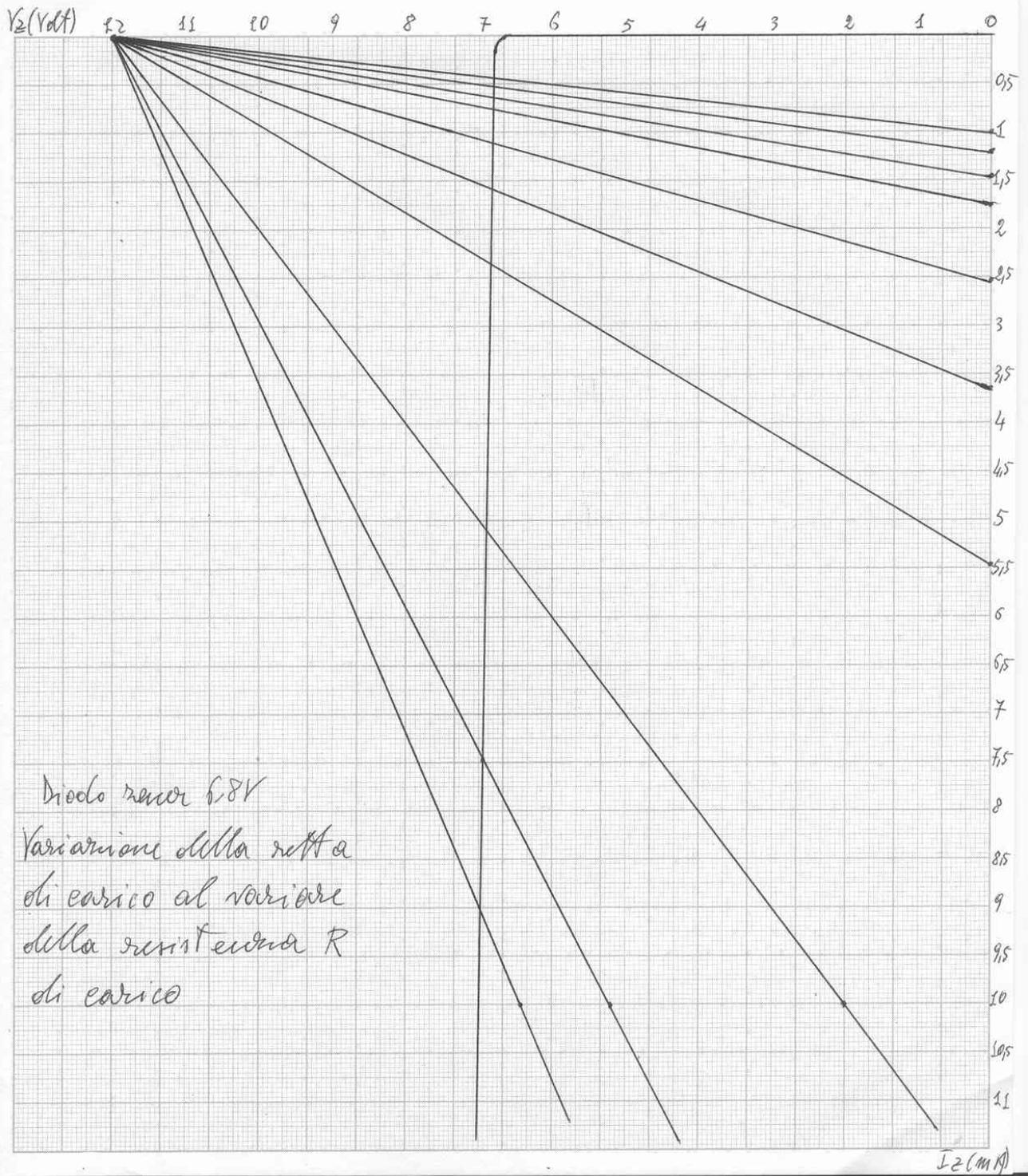
### Variazione della retta di carico al variare di R.

Valori misurati						Valori calcolati dal circuito equivalente				Punto alternativo	
kΩ	Volt		mA		Volt	Ω	Volt	Volt	mA	Volt	mA
R	E	V <sub>Z</sub>	V <sub>R</sub>	I <sub>Z</sub>	E/R	R <sub>Z</sub>	V <sub>ZK</sub>	I <sub>Z</sub>	V <sub>Z</sub>	I <sub>Z1</sub>	V <sub>Z1</sub>
0,56	12	6,967	5,033	8,987	21,428	17	6,8	9,012	6,953	10	6,4
0,68	12	6,935	5,065	7,448	17,647	17	6,8	7,460	6,926	10	5,2
1	12	6,886	5,114	5,114	12	17	6,8	5,113	6,886	10	2
2,2	12	6,836	5,164	2,347	5,454	17	6,8	2,345	6,839	---	---
3,3	12	6,821	5,179	1,569	3,636	17	6,8	1,567	6,826	---	---
4,7	12	6,813	5,187	1,103	2,553	17	6,8	1,102	6,818	---	---
6,8	12	6,803	5,197	0,764	1,764	17	6,8	0,762	6,812	---	---
8,2	12	6,8	5,2	0,634	1,463	17	6,8	0,632	6,810	---	---
10	12	6,798	5,202	0,520	1,2	17	6,8	0,519	6,808	---	---
12	12	6,797	5,203	0,433	1	17	6,8	0,432	6,807	---	---

**Grafici della curva caratteristica e variazione della retta di carico per variazione dell'alimentazione e della resistenza di carico.**







## Stabilizzatore di tensione

### Dimensionamento del circuito

Si fissa:  $E = 12V$  ;  $V_Z = 6,8V$  ;  $I_Z = 10mA$  ;  $R_L = 1,8k\Omega$  ;  $R_Z = 17\Omega$  ;  $V_{ZK} = 6,8V$ .

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{6,8}{1,8 \cdot 10^3} = 3,77mA \quad ; \quad I = I_Z + I_L = 10 \cdot 10^{-3} + 3,77 \cdot 10^{-3} = 13,77mA$$

$$R = \frac{E - V_Z}{I} = \frac{12 - 6,8}{13,77 \cdot 10^{-3}} = 370\Omega \quad , \quad \text{valore commerciale usato } 390\Omega.$$

### Calcolo di $R_{LMAX}$ ; $R_{LMIN}$ ; $E_{MAX}$ ; $E_{MIN}$

Considerando come punti estremi i punti A(6,812 ;  $0,274 \cdot 10^{-3}$ ) e C( 7,14 ;  $20 \cdot 10^{-3}$ ), si ha:

$$I_{ZMIN} = 0,274mA \quad ; \quad I_{ZMAX} = 13,33mA \quad ; \quad V_{ZMIN} = 6,812V \quad ; \quad V_{ZMAX} = 7,03V$$

Con un carico di valore infinito, morsetti del carico aperti, si ha la massima corrente nel diodo; quindi,  $R_L$  non ha un limite superiore. Con  $R_L = \infty \Rightarrow I_Z = I = 13,33mA$ .

$$R_{LMIN} = \frac{R V_{ZMIN}}{E - R I_{ZMIN} - V_{ZMIN}} = \frac{390 \cdot 6,812}{12 - 0,39 \cdot 10^3 \cdot 0,274 \cdot 10^{-3} - 6,812} = 523\Omega$$

$$E_{MAX} = R I_{ZMAX} + \frac{R + R_L}{R_L} V_{ZMAX} = 0,39 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-3} + \frac{0,39 \cdot 10^3 + 1,8 \cdot 10^3}{1,8 \cdot 10^3} \cdot 7,14 = 16,49V$$

$$E_{MIN} = R I_{ZMIN} + \frac{R + R_L}{R_L} V_{ZMIN} = 0,39 \cdot 10^3 \cdot 0,274 \cdot 10^{-3} + \frac{0,39 \cdot 10^3 + 1,8 \cdot 10^3}{1,8 \cdot 10^3} \cdot 6,812 = 8,39V$$

### Scelta dei valori di $R_L$ e di $E$ da utilizzare nella verifica

**Variatione di  $R_L$ :** poiché  $523\Omega \leq R_L \leq \infty$ , si scelgono i seguenti valori:

$\infty$  ;  $12k\Omega$  ;  $4,7k\Omega$  ;  $3,3k\Omega$  ;  $2,2k\Omega$  ;  $1,5k\Omega$  ;  $1,2k\Omega$  ;  $1k\Omega$  ;  $0,82k\Omega$  ;  $0,68k\Omega$  ;  $0,56k\Omega$  ;  $0,47k\Omega$

**Variatione di  $E$ :** poiché  $8,39V \leq E \leq 16,49V$ , si fissa una variazione di  $\pm 20\%$  di  $E = 12V$ , ossia si fa variare  $E$  tra i valori  $9,6V \leq E \leq 14,4V$ . si scelgono i seguenti valori di  $E$ :

$9,5V$  ;  $10V$  ;  $10,5V$  ;  $11V$  ;  $11,5V$  ;  $12V$  ;  $12,5V$  ;  $13V$  ;  $13,5V$  ;  $14V$  ;  $14,5V$

Nelle tabelle vengono anche riportati il punto alternativo dal quale far passare la retta di carico nel caso il valore dell'intercetta sia tale da essere fuori grafico e i valori di  $I_Z$  e di  $V_Z$  calcolati dal circuito equivalente, prima determinato, mediante foglio Excell.

## Variazione della retta di carico al variare di $R_L$

Valori misurati							Intercette		Punto alternativo	
k $\Omega$	Volt			mA			Volt	mA	mA	Volt
$R_L$	E	$V_L=V_Z$	$V_R$	I	$I_L$	$I_Z$	$R_L E / (R + R_L)$	E/R	$I_{Z1}$	$V_{Z1}$
$\infty$	12	6,95	5,05	7,426	0,007	7,419	11,991	17,647	10	5,196
12	12	6,93	5,07	7,455	0,577	6,878	11,356	17,647	10	4,921
4,7	12	6,91	5,09	7,485	1,470	6,015	10,483	17,647	10	4,542
3,3	12	6,9	5,1	7,5	2,090	5,409	9,949	17,647	10	4,311
2,2	12	6,89	5,11	7,514	3,131	4,382	9,166	17,647	10	3,972
1,5	12	6,87	5,13	7,544	4,58	2,964	8,256	17,647	10	3,577
1,2	12	6,84	5,16	7,588	5,7	1,888	7,659	17,647	10	3,319
1	12	6,83	5,17	7,602	6,83	0,772	7,142	17,647	10	3,095
0,82	12	6,8	5,2	7,647	7,647	0	6,56	17,647	10	2,842
0,68	12	6,8	5,2	7,647	7,647	0	6	17,647	10	2,6
0,56	12	6,8	5,2	7,647	7,647	0	5,419	17,647	10	2,348
0,47	12	6,8	5,2	7,647	7,647	0	4,904	17,647	10	2,125

Valori misurati						
k $\Omega$	Volt			mA		
$R_L$	E	$V_L=V_Z$	$V_R$	I	$I_L$	$I_Z$
$\infty$	12	6,926	5,073	7,460	0,007	7,453
12	12	6,917	5,082	7,474	0,576	6,898
4,7	12	6,902	5,097	7,496	1,468	6,027
3,3	12	6,892	5,107	7,511	2,088	5,422
2,2	12	6,875	5,125	7,536	3,125	4,411
1,5	12	6,851	5,148	7,571	4,567	3,004
1,2	12	6,832	5,167	7,599	5,693	1,905
1	12	6,813	5,186	7,626	6,813	0,812
0,82	12	6,789	5,210	7,662	8,279	-0,617
0,68	12	6,761	5,238	7,703	9,943	-2,241
0,56	12	6,727	5,272	7,753	12,013	-4,259
0,47	12	6,690	5,309	7,807	14,235	-6,427

Relativamente alle ultime 4 righe della tabella dei valori calcolati i valori della corrente  $I_Z$  sono negativi; ciò sta ad indicare che il diodo risulta non in conduzione, ossia il punto di lavoro risulta al di sopra della zona del ginocchio della curva caratteristica.

## Variazione della retta di carico al variare di E

Valori misurati							Intercette		Punto alternativo	
k $\Omega$	Volt			mA			Volt	mA	mA	Volt
R <sub>L</sub>	E	V <sub>L</sub> =V <sub>Z</sub>	V <sub>R</sub>	I	I <sub>L</sub>	I <sub>Z</sub>	R <sub>L</sub> E/(R+R <sub>L</sub> )	E/R	I <sub>Z1</sub>	V <sub>Z1</sub>
1	9,5	6,82	2,68	6,871	6,82	0,051	6,834	24,358	10	4,028
1	10	6,84	3,16	8,102	6,84	1,262	7,194	25,641	10	4,388
1	10,5	6,86	3,64	9,333	6,86	2,473	7,553	26,923	10	4,748
1	11	6,6	4,4	11,282	6,6	4,682	7,913	28,205	10	5,107
1	11,5	6,91	4,59	11,769	6,91	4,859	8,273	29,487	10	5,467
1	12	6,93	5,07	13	6,93	6,07	8,633	30,769	10	5,827
1	12,5	6,94	5,56	14,256	6,94	7,316	8,992	32,051	10	6,187
1	13	6,96	6,04	15,487	6,96	8,527	9,352	33,333	10	6,546
1	13,5	6,9	6,6	16,923	6,9	10,023	9,712	34,615	10	6,906
1	14	7,01	6,99	17,923	7,01	10,913	10,071	35,897	10	7,266
1	14,5	7,02	7,48	19,179	7,02	12,159	10,431	37,179	10	7,625

Valori misurati						
k $\Omega$	Volt			mA		
R <sub>L</sub>	E	V <sub>L</sub> =V <sub>Z</sub>	V <sub>R</sub>	I	I <sub>L</sub>	I <sub>Z</sub>
1	8	6,801	2,698	6,918	6,801	0,116
1	8,5	6,822	3,177	8,147	6,822	1,324
1	9	6,843	3,656	9,376	6,843	2,533
1	9,5	6,863	4,136	10,606	6,863	3,742
1	10	6,884	4,615	11,835	6,884	4,951
1	10,5	6,904	5,095	13,064	6,904	6,160
1	11	6,925	5,574	14,294	6,925	7,368
1	11,5	6,945	6,054	15,523	6,945	8,577
1	12	6,966	6,533	16,752	6,966	9,786
1	11,5	6,986	7,013	17,982	6,986	10,995
1	12	7,007	7,492	19,211	7,007	12,204

### Variation of the load line with variation of E and $R_L$

Valori misurati							Intercette		Punto alternativo	
k $\Omega$	Volt			mA			Volt	mA	mA	Volt
$R_L$	E	$V_L=V_Z$	$V_R$	I	$I_L$	$I_Z$	$R_L E / (R + R_L)$	E/R	$I_{Z1}$	$V_{Z1}$
1,8	12	6,878	5,122	13,133	3,821	9,312	9,863	30,769	10	6,657
1,8	9,6	6,828	2,772	7,107	3,793	3,314	7,890	24,615	10	4,684
1,8	14,4	6,933	7,467	19,146	3,851	15,294	11,835	36,923	10	8,630
1,5	12	6,879	5,121	13,130	4,586	8,544	9,523	30,769	10	6,428
2,2	12	6,912	5,088	13,046	3,141	9,904	10,193	30,769	10	6,880
1,5	14,4	6,93	7,47	19,153	4,62	14,533	11,428	36,923	10	8,333
2,2	9,6	6,859	2,741	7,0282	3,117	3,910	8,154	24,615	10	4,841

Valori misurati						
k $\Omega$	Volt			mA		
$R_L$	E	$V_L=V_Z$	$V_R$	I	$I_L$	$I_Z$
1,8	12	6,954	5,045	12,937	3,863	9,074
1,8	9,6	6,854	2,745	7,038	3,808	3,230
1,8	14,4	7,053	7,346	18,836	3,918	14,918
1,5	12	6,941	5,058	12,969	4,627	8,341
2,2	12	6,965	5,034	12,908	3,166	9,742
1,5	14,4	7,040	7,359	18,869	4,693	14,175
2,2	9,6	6,866	2,733	7,01	3,120	3,889

**Grafici della curva caratteristica e variazione della retta di carico per variazione dell'alimentazione e del carico.**

