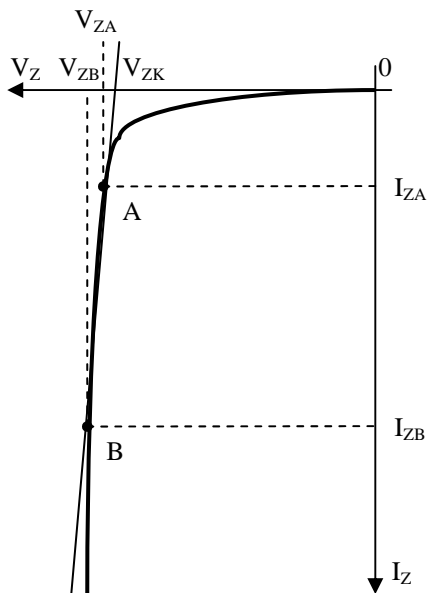


**RILIEVO PER PUNTI DELLA CARATTERISTICA INVERSA DI UN DIODO ZENER.
 VERIFICA DELLA VARIAZIONE DELLA RETTA DI CARICO AL VARIARE
 DELL'ALIMENTAZIONE E AL VARIARE DEL CARICO.
 DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL DIODO
 ZENER E VERIFICA DELLA SUA VALIDITÀ.
 VERIFICA DEL FUNZIONAMENTO 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:

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

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

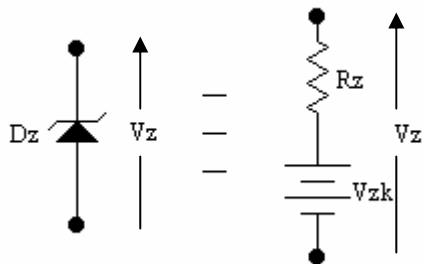
m ha le dimensioni dell'inverso di una resistenza.

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:

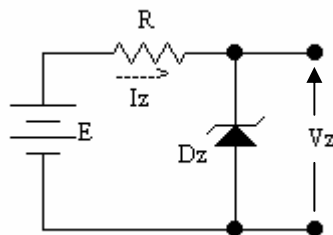
$$I_Z = \frac{1}{R_Z} V_Z - \frac{V_{ZK}}{R_Z} \Rightarrow V_Z = R_Z I_Z + V_{ZK}$$

- 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

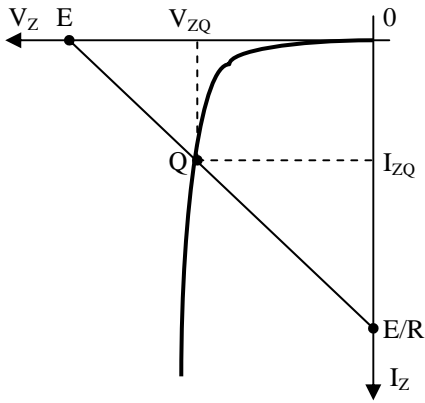
Consideriamo il circuito di polarizzazione del diodo zener.



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.

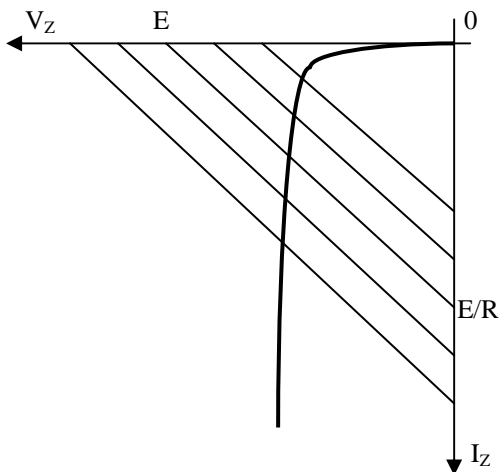


Poiché il punto di lavoro deve stare anche sulla curva caratteristica, il punto di lavoro del diodo sarà il punto di intersezione tra la retta di carico e la curva caratteristica, come mostrato in figura.

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

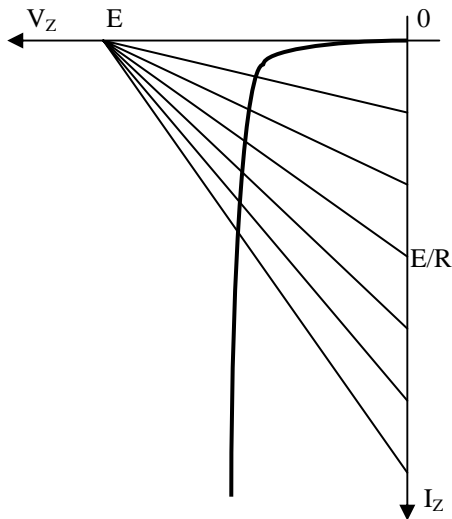
$$I_z = -\frac{1}{R} V_z + \frac{E}{R}$$

V_z	I_z
0	E/R
E	0



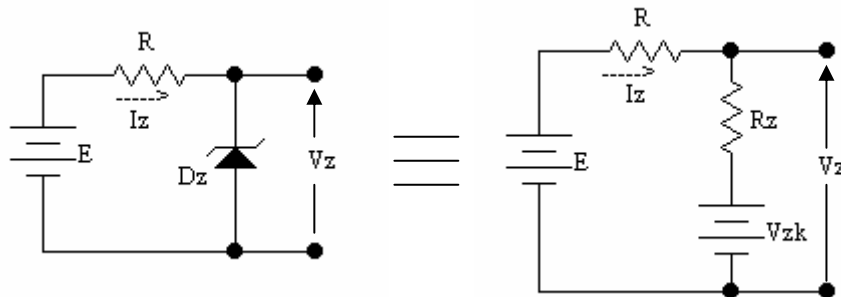
Al variare della tensione E di alimentazione o al variare della resistenza di carico, cambia la retta di carico e, quindi, il punto di lavoro.

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:

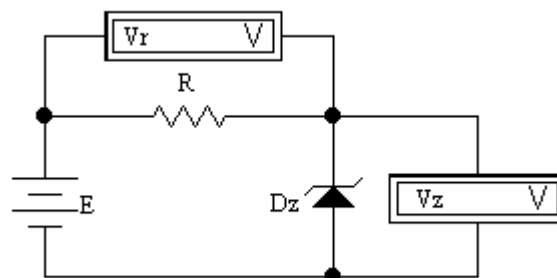
$$R = \frac{E_M - V_Z}{I_{ZMAX}} = \frac{10 - 5,6}{10 \cdot 10^{-3}} = 440\Omega, \quad \text{valore commerciale } 390\Omega.$$

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.

Variazione 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 Ω ; 150 Ω ; 180 Ω ; 220 Ω ; 270 Ω ; 330 Ω ; 390 Ω ; 470 Ω ; 680 Ω ; 1k Ω ; 2,2k Ω .
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			Ω	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 ; $11,615 \cdot 10^{-3}$)

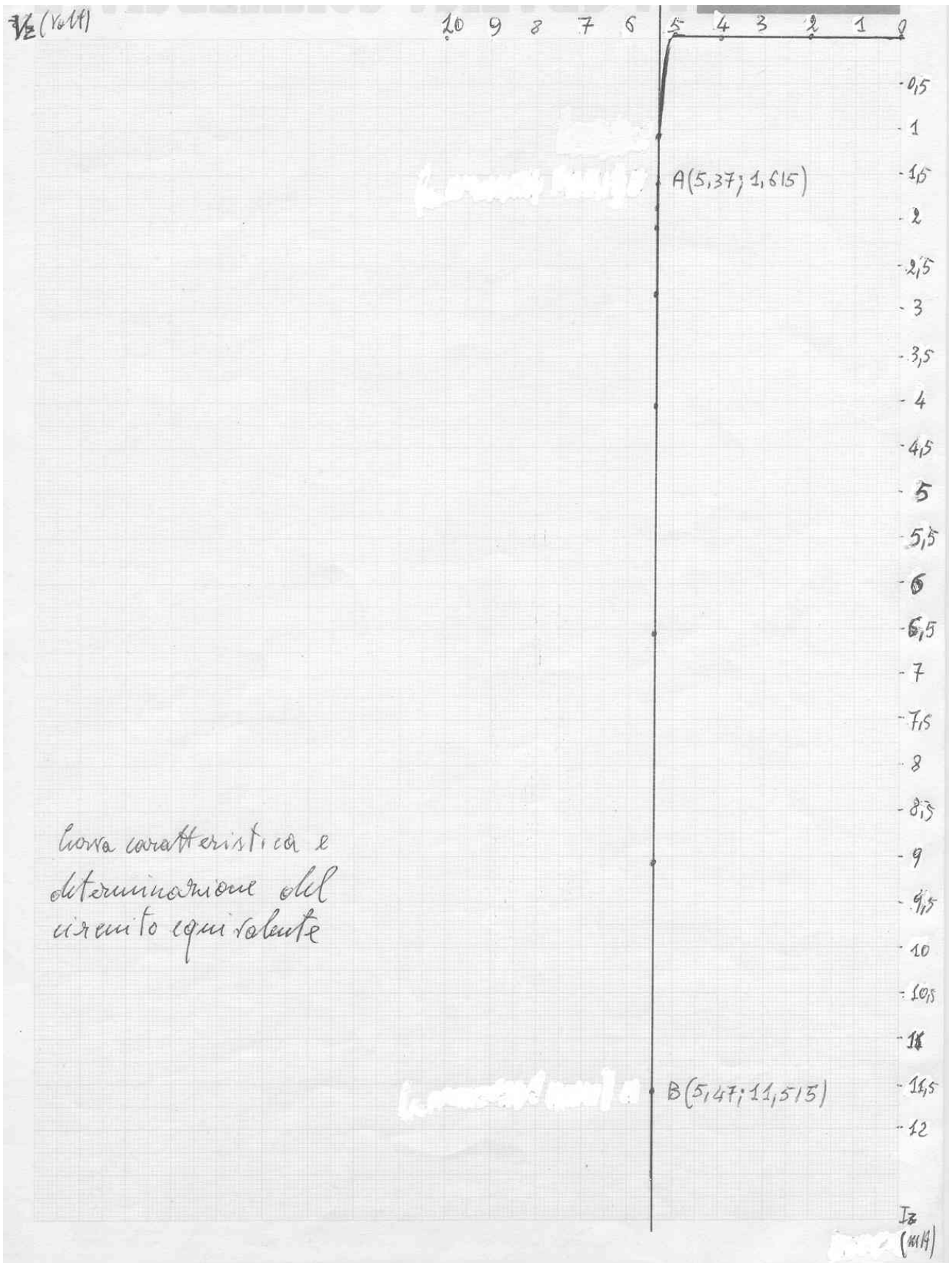
$$R_Z = \frac{1}{m} = \frac{V_{ZB} - V_{ZA}}{I_{ZB} - I_{ZA}} = \frac{5,47 - 5,37}{11,615 \cdot 10^{-3} - 1,615 \cdot 10^{-3}} = 10\Omega$$

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

Variazione della retta di carico al variare di R.

Valori misurati						Valori calcolati dal circuito equivalente		Punto alternativo			
k Ω	Volt		mA		Volt	Ω	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

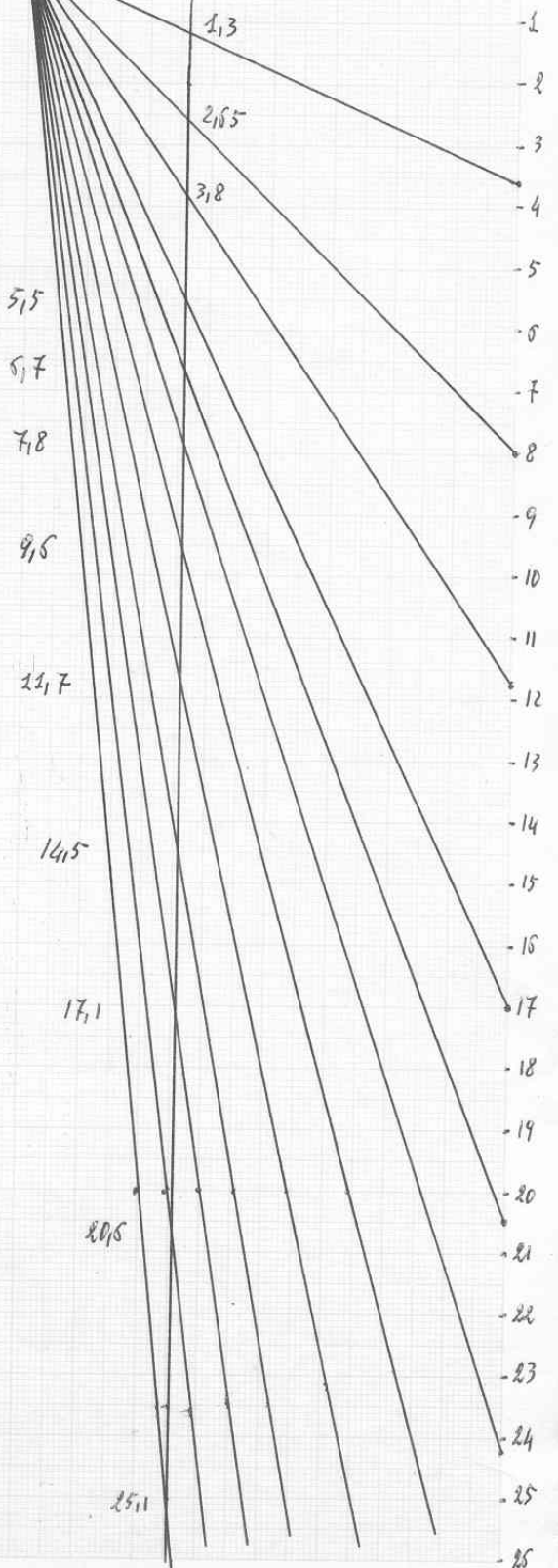
Variazione della retta
di carico per variazioni
di E

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



I_2 (mA)

Variazione della retta
di carico per variazione
di R

Conclusioni

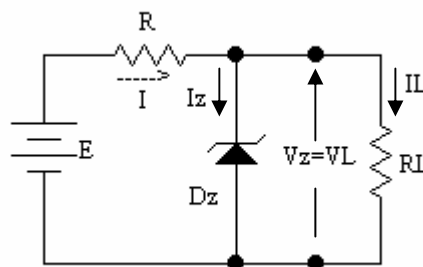
I valori misurati di V_Z e di I_Z e quelli calcolati utilizzando il circuito equivalente sperimentale, sono praticamente coincidenti; ciò evidenzia che il circuito equivalente determinato schematizza, tra i punti A e B, molto bene il comportamento del diodo zener, ossia ne dimostra la validità.

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

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

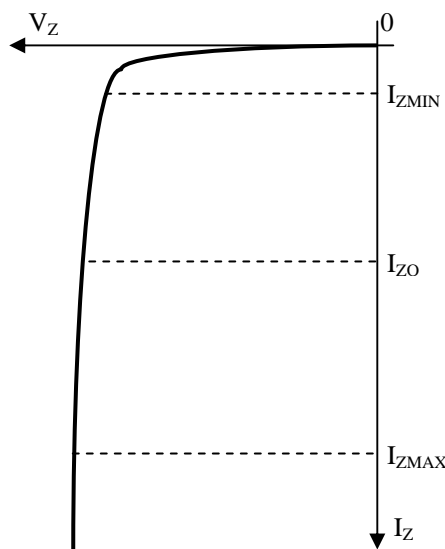
- Se R_L aumenta \Rightarrow poiché $V_L = R_L I_L = V_Z = \text{costante} \Rightarrow I_L$ deve diminuire \Rightarrow poiché $E = RI + V_Z = \text{costante}$ e $I = I_Z + I_L = \text{costante} \Rightarrow$ tale variazione varrà compensata da un aumento di $I_Z \Rightarrow V_L$ rimane costante.
- Se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

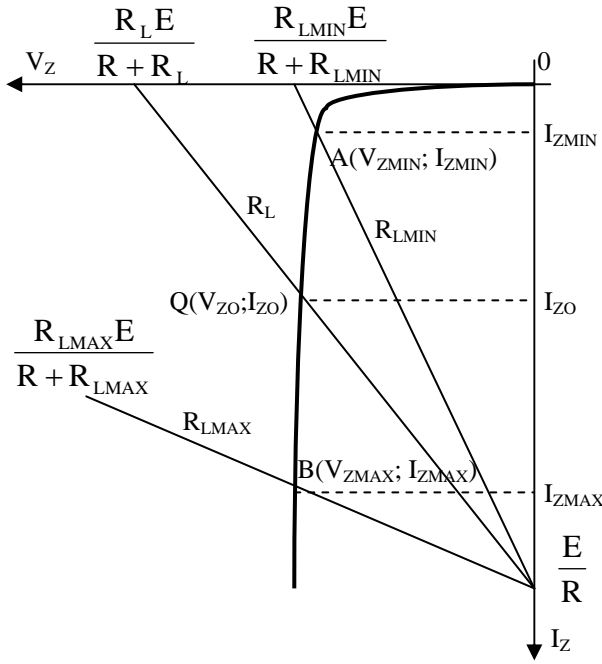
$$\begin{cases} E = RI + V_Z \\ I = I_Z + I_L \\ I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_L} \end{cases} \Rightarrow I = \frac{E - V_Z}{R} = I_Z + I_L = I_Z + \frac{V_Z}{R_L} \Rightarrow \frac{E - V_Z}{R} = I_Z + \frac{V_Z}{R_L} \Rightarrow$$

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

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

If the load R_L varies, the point $(0; E/R)$, the intercept on the I_Z axis, remains constant, while the angular coefficient of the load line varies.

The load line will rotate around the point $(0; E/R)$.

Since

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

an increase of the load R_L produces a decrease, in absolute value, of the angular coefficient. The limit value for R_{LMAX} is obtained by imposing that for this value the load line passes through point B of the characteristic curve corresponding to the fixed I_{ZMAX} .

Therefore:

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

The values V_{ZMIN} and V_{ZMAX} are determined from the characteristic curve once the values of I_{ZMIN} and I_{ZMAX} are fixed.

A decrease of the load R_L produces an increase, in absolute value, of the angular coefficient. The limit value for R_{LMIN} is obtained by imposing that for this value the load line passes through point A of the characteristic curve corresponding to the fixed I_{ZMIN} . Therefore:

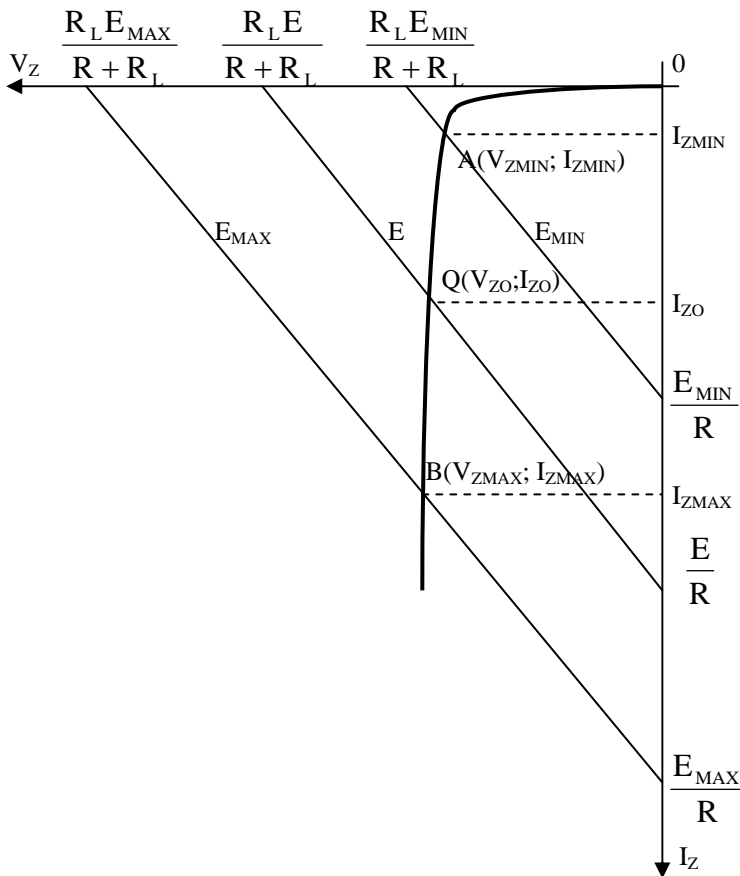
$$I_{ZMIN} = -\frac{R + R_{LMIN}}{R R_{LMIN}} V_{ZMIN} + \frac{E}{R} \Rightarrow R_{LMIN} = \frac{R V_{ZMIN}}{E - R I_{ZMIN} - V_{ZMIN}}$$

When E varies, the angular coefficient remains constant, while the intercepts vary. The load line shifts parallel to itself.

The maximum E_{MAX} and minimum E_{MIN} values that the supply can reach without the circuit losing its stabilizer characteristic are obtained in correspondence of the load lines passing through points A and B.

For the maximum E_{MAX} we have:

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



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

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 390Ω . 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, $V_{ZMIN} = R_Z I_{ZMIN} + V_{ZK} = 10 \cdot 1 \cdot 10^{-3} + 5,354 = 5,364V$

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

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

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:

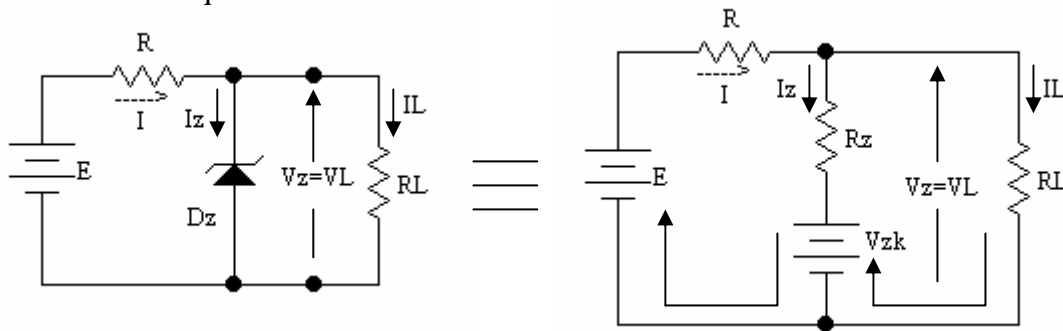
∞ ; 12k Ω ; 4,7k Ω ; 3,3k Ω ; 2,2k Ω ; 1,5k Ω ; 1,2k Ω ; 1k Ω ; 0,82k Ω ; 0,68k Ω ; 0,56k Ω ; 0,47k Ω

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.

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

$$\Rightarrow (R + R_Z)I_Z + R \frac{V_{ZK} + R_Z I_Z}{R_L} = E - V_{ZK} \Rightarrow (R + R_Z)I_Z + \frac{R}{R_L} V_{ZK} + \frac{RR_Z}{R_L} I_Z = E - V_{ZK} \Rightarrow$$

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

$$\Rightarrow (RR_L + R_Z R_L + RR_Z) I_Z = R_L E - R_L V_{ZK} - R V_{ZK} \Rightarrow I_Z = \frac{R_L (E - V_{ZK}) - R V_{ZK}}{RR_L + R_Z R_L + RR_Z}$$

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 Ω ; 4,7k Ω ; 3,3k Ω ; 2,2k Ω ; 1,5k Ω ; 1,2k Ω ; 1k Ω ; 0,82k Ω ; 0,68k Ω ; 0,56k Ω ; 0,47k Ω , 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 Ω 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

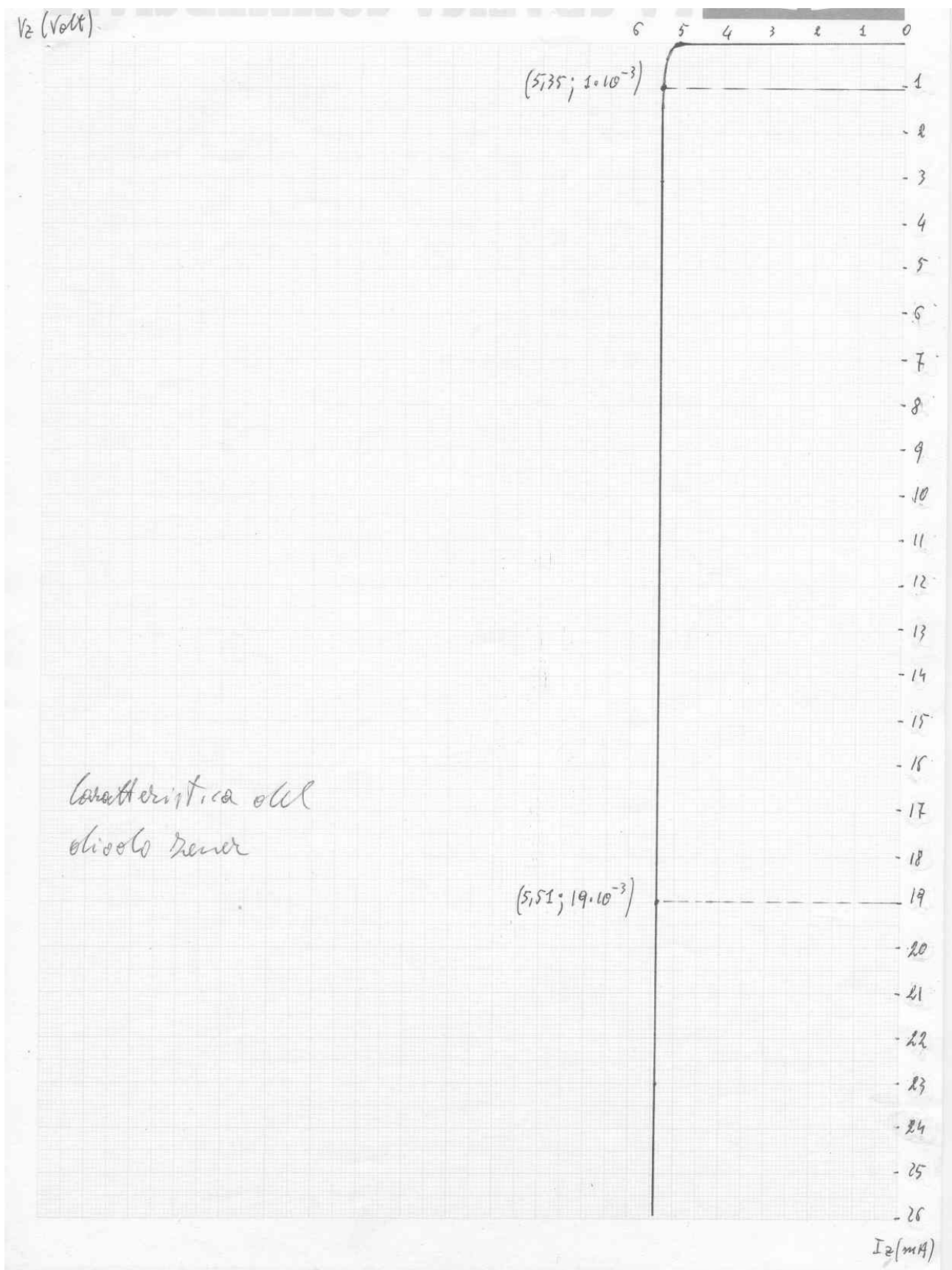
Valori misurati						
kΩ	Volt			mA		
R_L	E	$V_L=V_Z$	V_R	I	I_L	I_Z
∞	10	5,440	4,559	11,690	0	11,684
12	10	5,436	4,563	11,701	0,453	11,248
4,7	10	5,429	4,570	11,718	1,155	10,563
3,3	10	5,424	4,575	11,731	1,643	10,087
2,2	10	5,416	4,583	11,751	2,462	9,2893
1,5	10	5,405	4,594	11,780	3,603	8,1762
1,2	10	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.

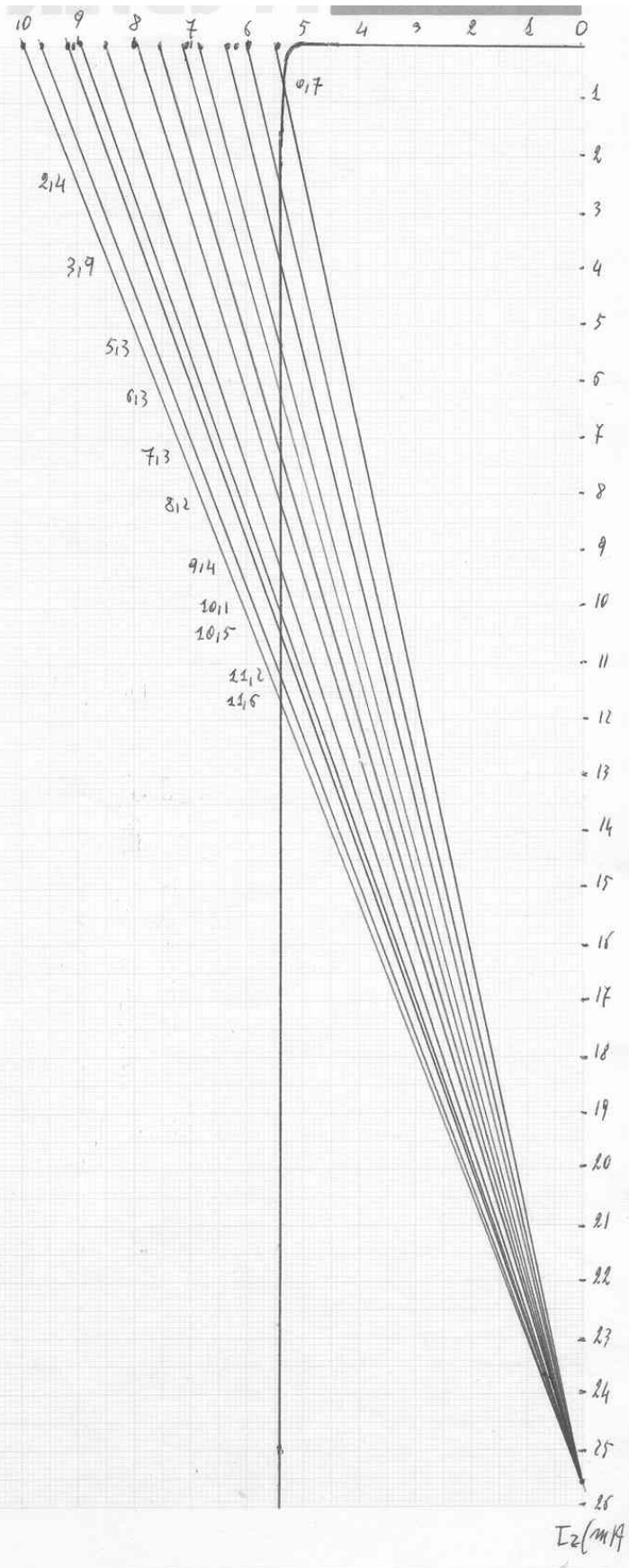
Valori misurati							Intercette		Punto alternativo	
k Ω	Volt			mA			Volt	mA	mA	Volt
R _L	E	V _L =V _Z	V _R	I	I _L	I _Z	R _L E/(R+R _L)	E/R	I _{Z1}	V _{Z1}
1	8	5,36	2,64	6,769	5,36	1,409	5,755	20,512	10	2,949
1	8,5	5,4	3,1	7,948	5,4	2,548	6,115	21,794	10	3,309
1	9	5,42	3,58	9,179	5,42	3,759	6,474	23,076	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 Ω	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.



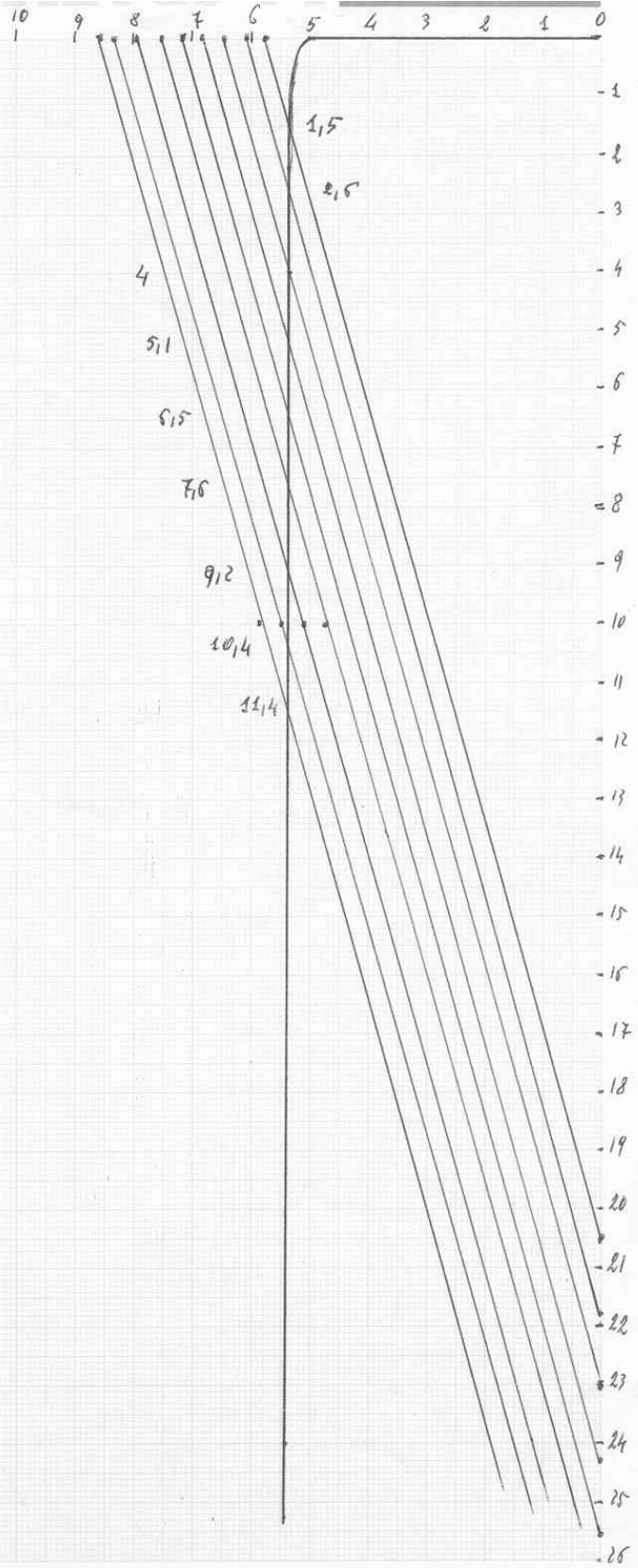
V_L (VOLT) - VARIAZIONI R_L



Rette di carico al variare di R_L

I_L (mA)

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_Z	V_R	I_Z	E/R	R_Z	V_{ZK}	I_Z	V_Z	V_{Z1}	I_{Z1}
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 ; 0,274·10⁻³) e B(6,935 ; 7,44·10⁻³)

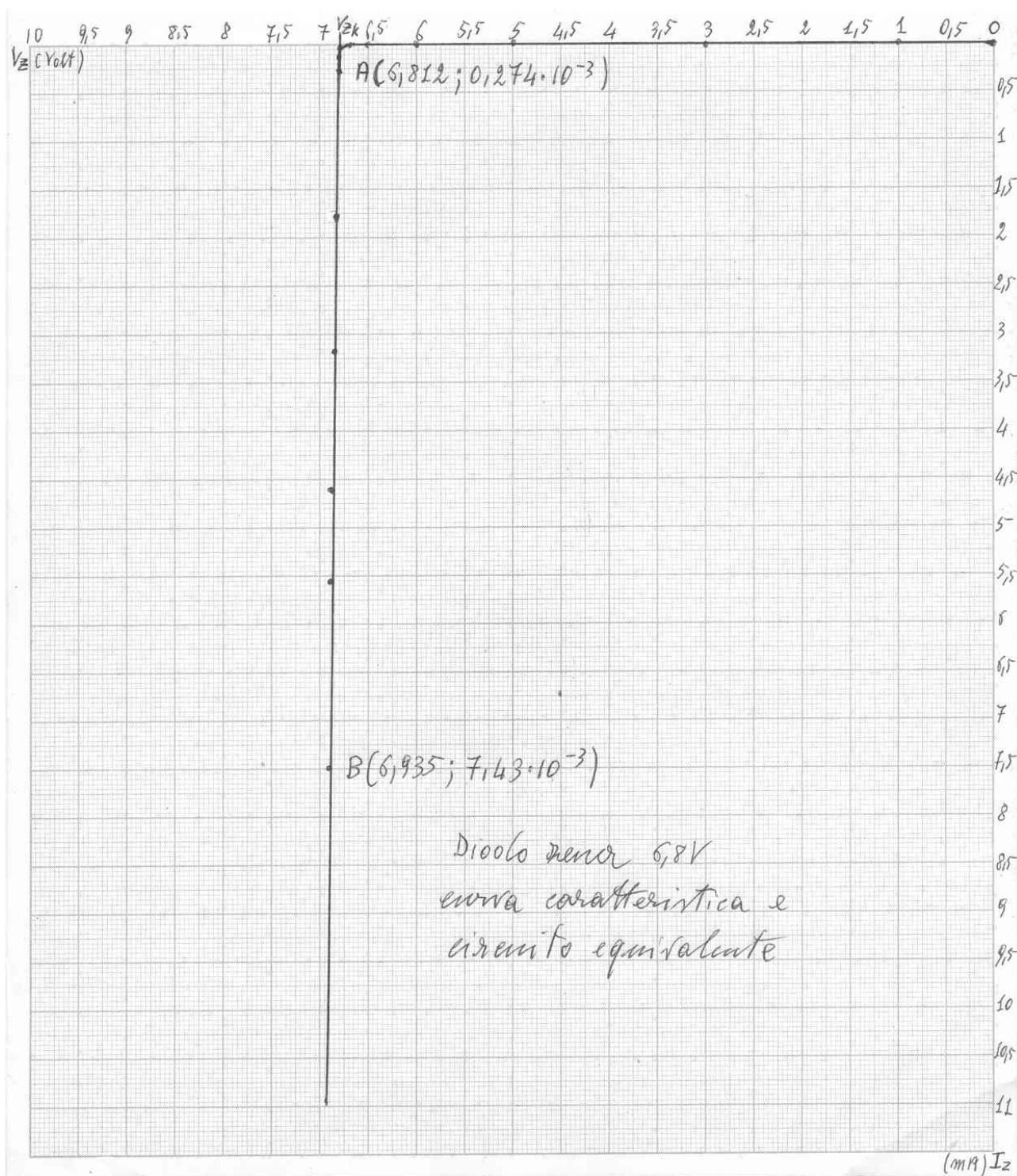
$$R_z = \frac{1}{m} = \frac{V_{ZB} - V_{ZA}}{I_{ZB} - I_{ZA}} = \frac{6,935 - 6,812}{7,44 \cdot 10^{-3} - 0,274 \cdot 10^{-3}} = 17\Omega$$

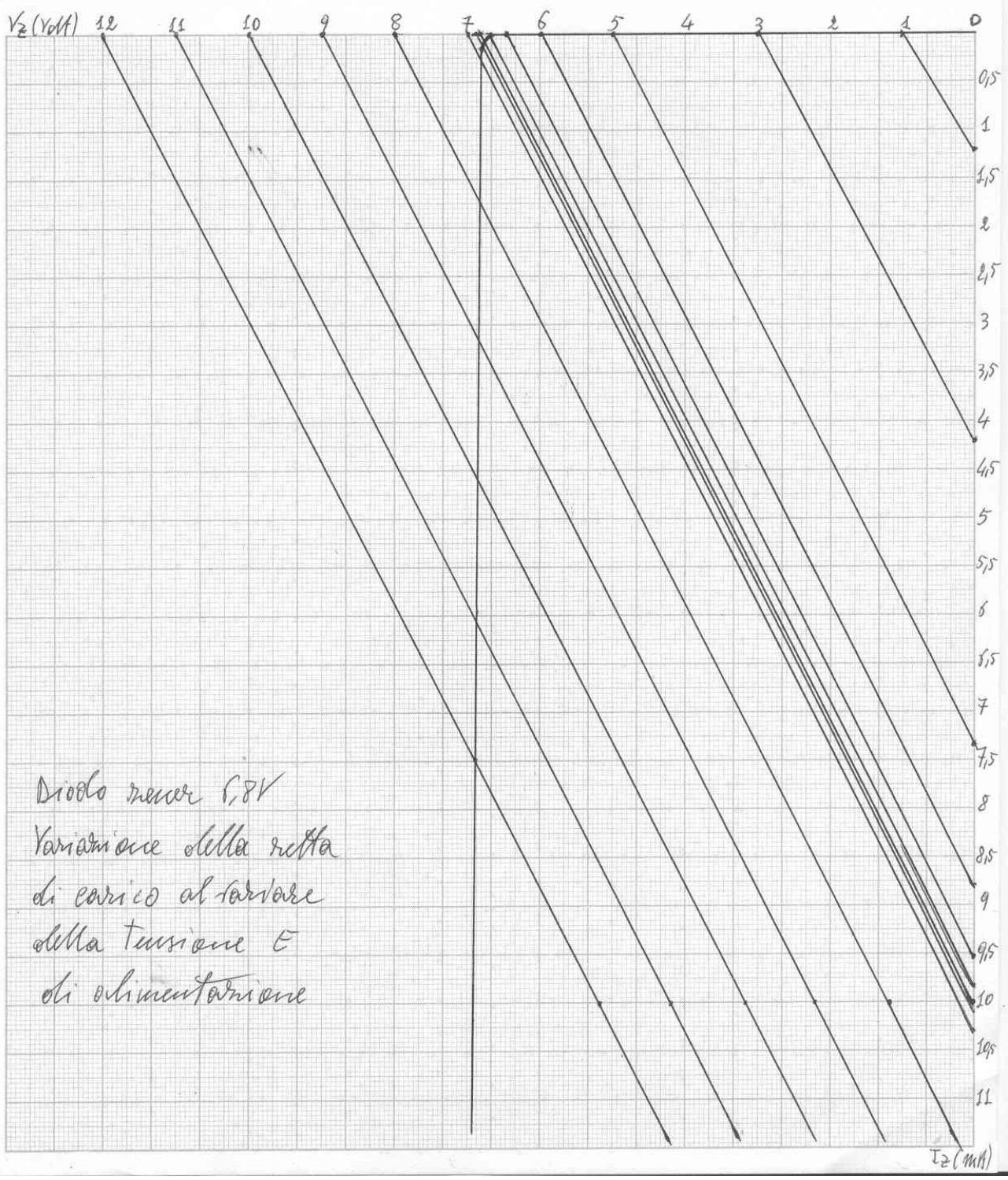
$$V_{ZK} = V_{ZA} - R_z I_{ZA} = 6,812 - 17 \cdot 0,274 \cdot 10^{-3} = 6,8V$$

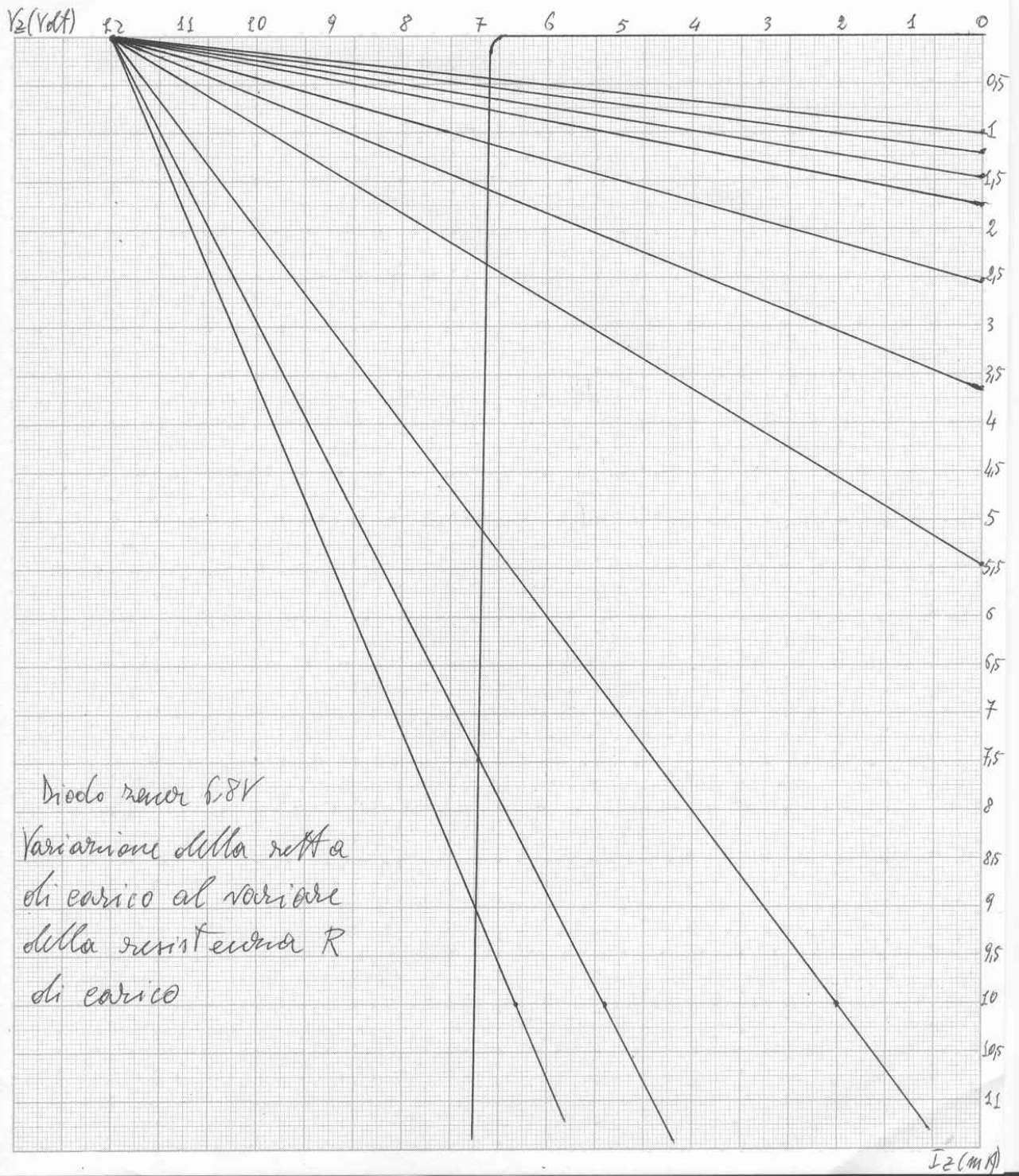
Variazione della retta di carico al variare di R.

Valori misurati							Valori calcolati dal circuito equivalente			Punto alternativo	
kΩ	Volt		mA		Volt	Ω	Volt	Volt	mA	Volt	mA
R	E	V _Z	V _R	I _Z	E/R	R _Z	V _{ZK}	I _Z	V _Z	I _{Z1}	V _{Z1}
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:

∞ ; 12k Ω ; 4,7k Ω ; 3,3k Ω ; 2,2k Ω ; 1,5k Ω ; 1,2k Ω ; 1k Ω ; 0,82k Ω ; 0,68k Ω ; 0,56k Ω ; 0,47k Ω

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 Ω	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}
∞	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 Ω	Volt			mA		
R_L	E	$V_L=V_Z$	V_R	I	I_L	I_Z
∞	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 Ω	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	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 Ω	Volt			mA		
R _L	E	V _L =V _Z	V _R	I	I _L	I _Z
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 Ω	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 Ω	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.

