

# MISURA DELLE CARATTERISTICHE DI UN TRIODO

**Esperienza effettuata il giorno 22 aprile 1997 da :**  
**Maurizio Antonelli**  
**Rosa De Matteis**  
**Myra Cardellina**



Some rights reserved: <http://www.maury.it/licenza>

## Scopo dell'esperienza

Studio delle caratteristiche della valvola termoelettronica (triodo).

Determinazione delle caratteristiche anodiche (caratteristica anodica propriamente detta e caratteristica mutua) e delle caratteristiche di griglia.

## Valvole termoelettroniche

Gli elementi passivi presi in esame nello studio dei circuiti in corrente continua ed in corrente alternata (resistori, condensatori, induttori) sono caratterizzati dal fatto che per essi esiste una relazione di continuità e di linearità tra la tensione applicata e la corrente in essi circolante.

Esiste invece una vasta gamma di componenti elettronici che sono caratterizzati da un funzionamento discontinuo e non lineare. Il funzionamento discontinuo (o a soglia) è dovuto al fatto che la conduzione di corrente può avvenire solo in un verso e viene innescata soltanto quando la differenza di potenziale ai capi del componente supera un valore limite (soglia) caratteristico del componente in esame. In altri termini il componente elettronico si comporta come un interruttore in dipendenza della tensione applicata: aperto se quest'ultima è inferiore al valore di soglia  $\Delta V_s$ , chiuso in caso contrario. A causa di questo precipuo comportamento tali componenti elettronici sono stati designati con il nome di valvole.

La seconda caratteristica delle valvole elettroniche è rappresentata dalla non linearità: cioè in condizioni di conduzione ( $V_B - V_A > \Delta V_s$ ) la corrente circolante nella valvola è una funzione non lineare della differenza di potenziale applicata. E' importante sottolineare il fatto che nei circuiti e nella strumentazione con valvole si sfrutta in genere la prima caratteristica cercando però di far operare la valvola, quando è in conduzione, nella regione di maggior linearità.

Questo tipo di valvole basano il loro funzionamento sull'emissione di elettroni dalla superficie di un filamento metallico quando questo è riscaldato a temperature elevate (effetto termoelettronico-Edison-1883). La densità di corrente emessa per effetto termoelettronico da una superficie  $S$  del metallo che si trova alla temperatura assoluta  $T$  è data dalla legge di Richardson-Fermi:  $J = I/S = A \cdot T^2 \cdot e^{-W/kT}$ , dove  $A = 60.2 \cdot 10^4 \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$  è una costante indipendente dal metallo considerato,  $W$  è l'energia di estrazione degli elettroni,  $k$  è la costante di Boltzmann. L'energia di estrazione degli elettroni assume valori compresi tra 2 e 6 eV (equivalenti a circa  $3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ) mentre la massima energia termica (corrispondente alla temperatura di fusione del metallo) è dell'ordine di alcuni decimi di eV.

Per le applicazioni dell'effetto termoelettronico sono più convenienti i materiali altofondenti, con bassa tensione di vapore (allo scopo di mantenere un vuoto spinto nella valvola quando è in operazione), ma soprattutto i materiali con basso potenziale di estrazione. Per questa ragione il tungsteno è il materiale normalmente usato come filamento nelle valvole elettroniche in quanto presenta un'elevata temperatura di fusione ed una bassa tensione di vapore anche a temperature molto elevate. In alcuni casi il filamento di tungsteno viene rivestito con torio, un materiale che presenta un'energia potenziale di estrazione  $W$  notevolmente più bassa di quella del tungsteno, di modo che è possibile far lavorare il filamento a temperature inferiori (tipicamente  $1500^\circ\text{C}$  anziché  $2500^\circ\text{C}$ ) con ugual rendimento.

La legge di Richardson-Fermi, che risulta in accordo con i risultati sperimentali, è stata dedotta assumendo che gli elettroni si comportino all'interno del metallo come un gas degenere confinato da barriere di potenziale di ampiezza  $W$ . Mediante il riscaldamento del materiale gli elettroni acquistano energie il cui valore quadratico medio ( $E_c = kT$ ) risulta notevolmente inferiore alla barriera di potenziale e quindi insufficiente per l'emissione della maggior parte degli elettroni liberi. Tuttavia, a causa della distribuzione delle velocità, una frazione degli elettroni, sia pure assai piccola, viene a possedere una energia cinetica uguale o superiore all'energia potenziale di estrazione e pertanto può superare la barriera. Pur essendo tale frazione molto piccola ( $f = e^{-W/kT}$  con  $W/kT$  circa 20-30) la corrente di elettroni è ugualmente apprezzabile dato l'elevato numero di elettroni liberi presenti nei metalli ( $N$  circa  $6 \cdot 10^{23}$  elettroni/mole). La teoria cinetica del gas degenere di elettroni, per il quale si applica la statistica di Fermi, porta, per quanto riguarda la densità di corrente emessa da una superficie, alla espressione di  $J$  precedente.

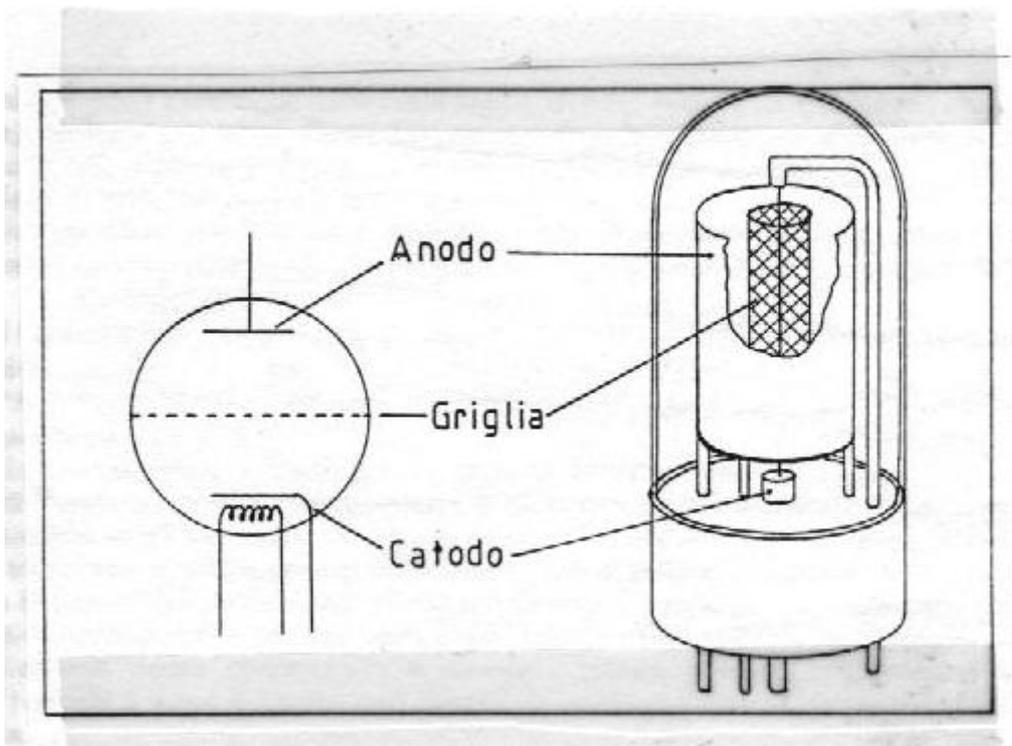
## Triodo

Il triodo è una valvola elettronica, simile al diodo, in cui tra catodo ed anodo è inserito un terzo elettrodo (griglia) che può essere portato ad un potenziale negativo o positivo rispetto al catodo.

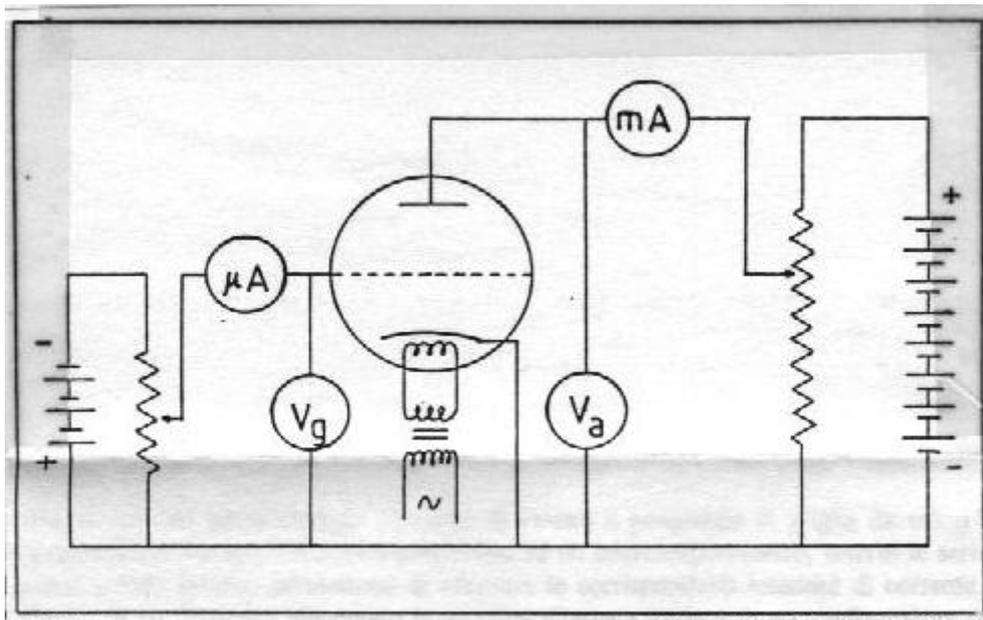
La figura della pagina successiva mostra il simbolo normalmente utilizzato per rappresentare un triodo (con catodo a riscaldamento indiretto) nei circuiti elettrici e la configurazione reale di tale valvola.

La griglia che risulta sostanzialmente trasparente al flusso di elettroni governa la corrente anodica in maniera molto più efficace dell'anodo: piccole variazioni del potenziale di griglia (pochi volt nell'intorno del potenziale di catodo) producono gli stessi incrementi della corrente anodica per i quali sono richiesti ampie variazioni del potenziale anodico (alcune decine di volt). L'efficacia della griglia si spiega tenendo presente che essa è posta in prossimità del catodo e quindi è in grado di produrre campi elettrostatici molto più intensi di quelli prodotti dall'anodo a parità di differenza di potenziale applicata.

Mentre nel diodo i parametri variabili (fissata la temperatura d'esercizio del catodo) sono soltanto due ( $I_a, V_a$ ), nel triodo, a causa della presenza di un terzo elettrodo, i parametri variabili diventano quattro: il potenziale anodico  $V_a$ , il potenziale di griglia  $V_g$ , la corrente anodica  $I_a$  e la corrente di griglia  $I_g$ . La corrente anodica  $I_a = I_a(V_a, V_g)$  e la corrente di griglia  $I_g = I_g(V_a, V_g)$  rappresentano le due famiglie di caratteristiche mediante le quali si può descrivere completamente il funzionamento di un triodo.



La caratteristica anodica  $I_a = I_a(V_a, V_g)$  è la più importante e la sua determinazione viene effettuata con il seguente circuito.



Un partitore di tensione con una presa centrale permette di variare il potenziale di griglia da valori negativi a valori positivi rispetto al potenziale di catodo. Un milliamperometro ed un microamperometro, inseriti in serie rispettivamente sulle maglie dell'anodo e della griglia, permettono di misurare le corrispondenti intensità di corrente. Il catodo viene riscaldato indirettamente da un filamento alimentato in corrente alternata attraverso un trasformatore collegato alla rete di distribuzione dell'energia elettrica.

La misura di  $I_a$ , per una determinata tensione di alimentazione del filamento, viene effettuata mantenendo costante la tensione di griglia e variando la tensione anodica (caratteristica anodica propriamente detta) oppure mantenendo costante la tensione anodica e variando la tensione di griglia (caratteristica mutua).

Si può ricavare dalla famiglia delle caratteristiche mutue che la corrente anodica, quando si è sufficientemente lontani dalle zone di interdizione e di saturazione, ha un andamento lineare sia in funzione del potenziale di griglia sia in funzione del potenziale anodico (le diverse caratteristiche presentano infatti una pendenza costante e sono equidistanti). Ne consegue che la corrente anodica è esprimibile, nella regione ad andamento lineare, mediante una relazione del tipo:  $I_a = S \cdot V_g + (1/\rho)$

$*V_a+I_0$  dove i due coefficienti  $S$  e  $\rho$  rappresentano rispettivamente la conduttanza mutua e la resistenza anodica. Valori tipici di questi coefficienti sono:  $S=1-5 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1}$  e  $r=5-10 \cdot 10^3 \Omega$ . Accanto a questi due coefficienti che permettono di descrivere completamente il comportamento di un triodo (nella regione lineare) si introduce anche un terzo coefficiente indicato come il fattore o coefficiente di amplificazione  $\mu$ . Il fattore di amplificazione è legato ai coefficienti, precedentemente definiti, mediante la relazione:  $\mu=\rho*S$ . Tale coefficiente che tipicamente assume valori compresi tra 10 e 50 rende conto della capacità del triodo ad amplificare segnali di tensione applicati alla griglia. Ad esempio una tensione alternata di piccola intensità (massima tensione di picco 2-3 V) applicata sul circuito di griglia dà origine ad una tensione alternata amplificata ai capi di una resistenza inserita sul circuito anodico.

Le polarizzazioni della griglia e dell'anodo (fornite dalle batterie  $G_1$  e  $G_2$ ) vengono scelte in maniera che la zona di lavoro del triodo rimanga confinata nella regione lineare delle caratteristiche. In questa ipotesi le variazioni di potenziale che si manifestano ai capi della resistenza  $R$  sono prodotte dalle variazioni di corrente anodica indotte dalle variazioni del potenziale di griglia. Si tenga presente che a causa delle variazioni di corrente nella resistenza  $R$  si hanno variazioni nel potenziale anodico che a loro volta influenzano l'andamento della corrente anodica. Per determinare l'effetto globale usiamo l'espressione  $I_a=S*V_g+(1/\rho)*V_a+I_0$  e la differenziamo tenendo presente che il potenziale anodico è dato da  $V_a=V_{G1}-R*I_a$ :  $\Delta I_a=S*\Delta V_g-(R/\rho)*\Delta I_a$ .

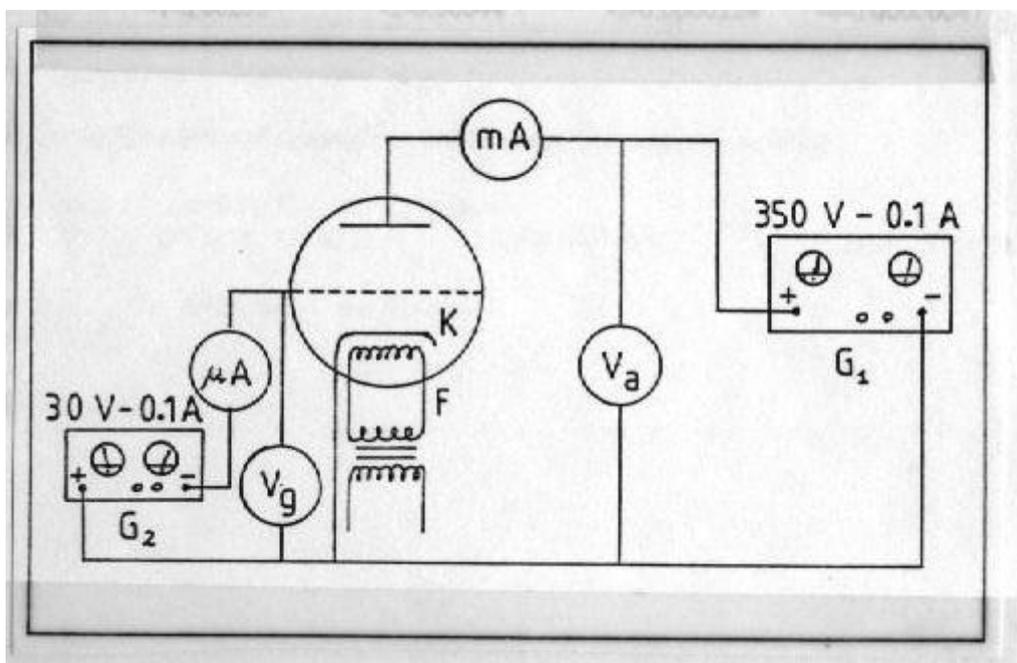
La variazione di tensione ai capi della resistenza  $R$  è data da:  $\Delta V_u=R*\Delta I_a=R*S*\Delta V_g-(R^2/\rho)*\Delta I_a$ . Pertanto il coefficiente di amplificazione reale è dato da:  $A=\Delta V_u/\Delta V_g=R*S-\Delta V_u/\Delta V_g*(R/\rho)$  da cui si ricava:  $A=\Delta V_u/\Delta V_g=R*S/(1+R/\rho)=\mu*R/(R+\rho)$ .

Da questa relazione si ricava che il coefficiente di amplificazione reale si approssima a quello teorico quando  $R \gg \rho$ .

Il triodo, oltre che come amplificatore di segnali, viene utilizzato come amplificatore di potenza (quando il circuito deve azionare dispositivi elettromeccanici) e come generatore di oscillazioni persistenti. Nel primo caso si rinuncia ad avere fattori di amplificazione elevati a vantaggio di una bassa resistenza anodica che consente elevate correnti anodiche. Nel secondo caso il triodo viene inserito in un circuito risonante LC con la funzione di fornire al circuito oscillante l'energia in esso dissipata ad ogni periodo. Tali circuiti, utilizzati prevalentemente nel campo delle trasmissioni radio e televisive, costituiscono delle sorgenti di onde elettromagnetiche in grado di operare sino a frequenze di qualche centinaio di MHz. Per ottenere frequenze elevate ( $T=2\pi(LC)^{1/2}$ ) è necessario operare il triodo con potenziali anodici elevati ( $V_a=500-1000V$ ) affinché il tempo di transito degli elettroni da catodo ad anodo sia piccolo rispetto al periodo  $T$  del circuito risonante.

## Procedura sperimentale

Per determinare le caratteristiche anodiche e le caratteristiche di griglia del triodo in esame abbiamo realizzato il seguente circuito.



Il catodo  $K$  è riscaldato indirettamente dal filamento  $F$  che viene alimentato dalla corrente alternata erogata dal secondario di un piccolo trasformatore. La tensione anodica, fornita dal generatore  $G_1$  e letta dal voltmetro  $V_a$  poteva essere variata tra 0 e 350 V. Il generatore  $G_2$  permetteva di porre la griglia ad un potenziale negativo  $V_g$  ( $V_g=0+-30V$ ) ed il microamperometro inserito in serie consentiva di misurare l'intensità di corrente  $I_g$  della griglia.

Inserito il triodo nel circuito abbiamo proceduto dapprima alla determinazione delle caratteristiche anodiche propriamente dette ( $I_a=I_a(V_a)$  per  $V_g=\text{cost.}$ ), fissando il valore del potenziale di griglia e misurando la corrente anodica (mediante il milliamperometro mA) in funzione della tensione anodica. Abbiamo effettuato tale tipo di misura per diversi valori di  $V_g$  ottenendo così la famiglia delle caratteristiche anodiche.

Abbiamo inoltre misurato le caratteristiche mutue ( $I_a=I_a(V_a)$  per  $V_a=\text{cost.}$ ) effettuando una nuova serie di misure in cui mantenendo fissa la tensione anodica abbiamo misurato la corrente anodica in funzione della tensione di griglia.

Ecco i dati da noi trovati:

$V_g=0V$

$V_a=50V-I_a=0.0028A$	100-0.0072	150-0.0126	200-0.0191	250-0.0252	300-///////
263-0.234	225-0.01814				

$V_g=1V$

50-0.00036	100-0.00256	150-0.00606	200-0.01042	250-0.01567	263-0.0177
225-0.01251					

$V_g=2V$

50-0.00000557	100-0.000420	150-0.00246	200-0.00578	250-0.01005	263-0.011
225-0.00758					

$V_g=3V$

50-0	100-0.0000245	150-0.000555	200-0.00237	250-0.00560	263-0.00644
225-0.00375					

Caratteristica mutua

$V_a=150V$

$V_g=0V-I_a=0.0103A$	-1-0.0062	-2-0.0025	-3-0.0006	-4-0.000072	-5-0.000004
-0.5-0.00846					

$V_a=250V$

$V_g=0V-I_a=0.0219A$	-6-0.000187	-1-0.0159	-2-0.01077	-3-0.00588	-4-0.00243
----------------------	-------------	-----------	------------	------------	------------

$V_a=200V$

0-0.0162	-1-0.01052	-2-0.00592	-3-0.00246	-4-0.00066	-5-0.00013
-0.5-0.01310					

$V_a=100V$

0-0.00634	-1-0.00253	-2-0.00044	-3-0.0000224	-4-0.00000047	-0.5-0.000435
-----------	------------	------------	--------------	---------------	---------------

Le caratteristiche di griglia non le abbiamo determinate.

Dalle caratteristiche anodiche abbiamo ricavato con metodi numerici le seguenti quantità:

- resistenza di placca  $\rho=\Delta V_a/\Delta V_i$  per  $V_g=\text{cost.}$

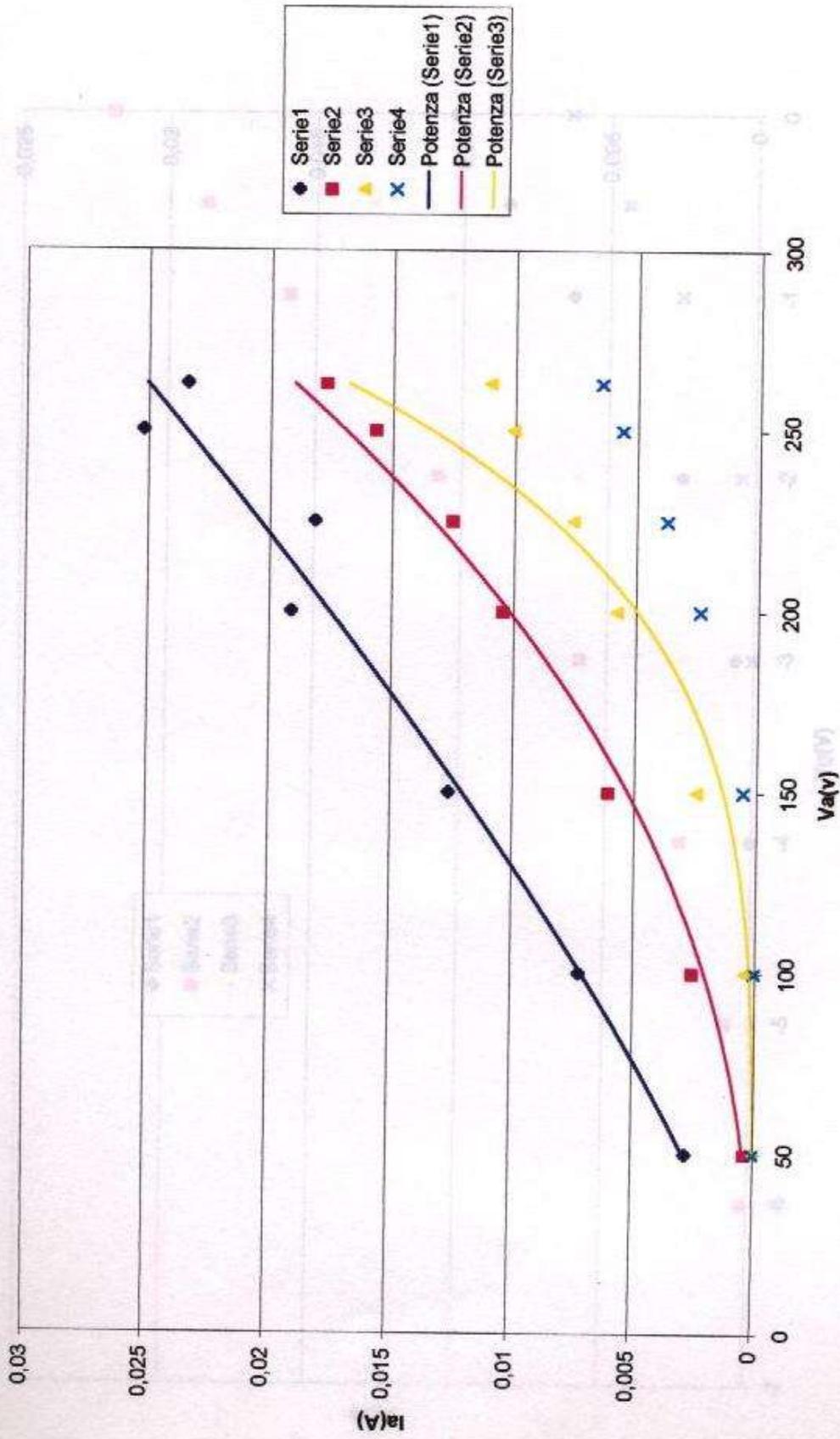
$V_g=0-\rho=1.56*10^{-4}\Omega$	1-1.4858757*10 <sup>4</sup> $\Omega$	2-2.390909*10 <sup>4</sup> $\Omega$	3-2.2636418*10 <sup>4</sup> $\Omega$
---------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------

- transconduttanza  $S=\Delta I_a/\Delta V_g$  per  $V_a=\text{cost.}$

$V_a=150V-S=1.692*10^{-2}$

- fattore di amplificazione  $\mu=\rho*S.$

# CARATTERISTICA ANODICA



# CARATTERISTICA MUTUA

