

Studio sperimentale di celle fotovoltaiche

Una proposta didattica sviluppata nel progetto IRDIS

Giacomo Torzo

Introduzione

La *cella fotovoltaica* è sostanzialmente un diodo cioè una giunzione PN tra due semiconduttori, uno drogato P ed uno drogato N.

Si tratta tuttavia di un diodo particolare, in cui il semiconduttore drogato P ha uno spessore sottile, così da permettere alla luce di penetrare nella regione prossima alla superficie della giunzione: qui le coppie elettrone-lacuna, create per effetto fotoelettrico interno¹, migrano nel campo elettrico della giunzione e generano in un circuito esterno una *corrente fotovoltaica*.

E' un dispositivo che può funzionare come *sensore di luce*, ma anche come *generatore di elettrico*, ad esempio per caricare una batteria.

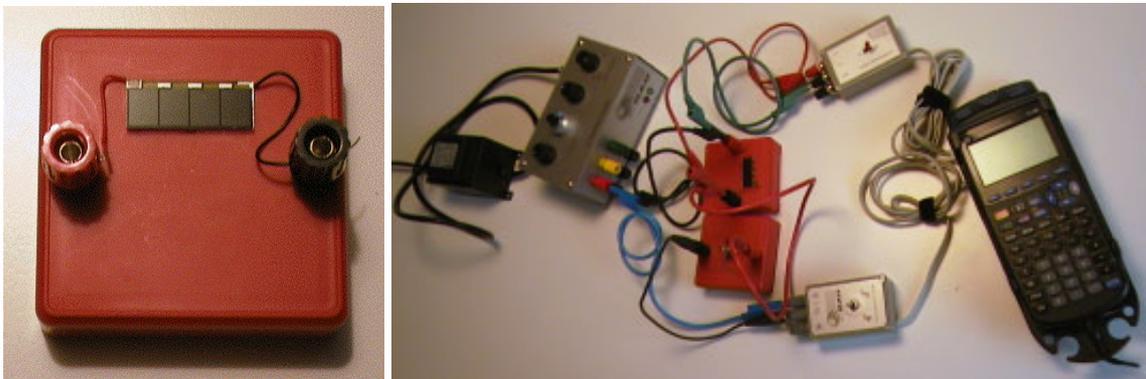


Fig. 1

L'effetto fotoelettrico (o fotovoltaico) è un fenomeno a *soglia*: esso si verifica solo con luce la cui lunghezza d'onda è inferiore ad un valore critico, detto lunghezza d'onda di soglia λ_s che è quella per cui vale la relazione $hc/\lambda = hv = E_g$ (ove E_g è il salto energetico che l'elettrone deve fare per passare dalla banda di conduzione alla banda di valenza, h è la costante di Plank, v è la frequenza della luce e c la velocità della luce).

L'effetto fu osservato per la prima volta da Becquerel in una cella elettrolitica, e successivamente (1876) venne ritrovato in un dispositivo a stato solido (di selenio da Smith, Adams Day). La prima cella fotoelettrica di silicio fu realizzata nel 1954 presso i laboratori Bell (Person, Fuller, Chapin).

Le celle fotovoltaiche al giorno d'oggi sono dispositivi abbastanza comuni: ad esempio se ne trova una in ogni dispositivo alimentato ad energia solare (ad esempio calcolatori

¹ Si distingue qui tra effetto fotoelettrico *interno* (questo, in cui i portatori di carica restano nel volume solido o liquido) e l'effetto fotoelettrico *esterno*, quello cioè in cui elettroni vengono emessi da una superficie libera (anodo) attraverso uno spazio vuoto e migrano verso un altro elettrodo (catodo) nel campo elettrico applicato tra i due elettrodi.

tascabili, orologi, giocattoli...). La figura ne mostra un tipo montato su una basetta adatta a studiarne il comportamento con un sistema RTL.

Caratteristiche di fotodiode

Il comportamento di una cella fotovoltaica (o fotodiode) è descrivibile schematicamente mediante un grafico tensione/corrente come quello di figura 2, che riporta in ordinata la corrente che attraversa la giunzione ed in ascissa la tensione ai capi della giunzione.

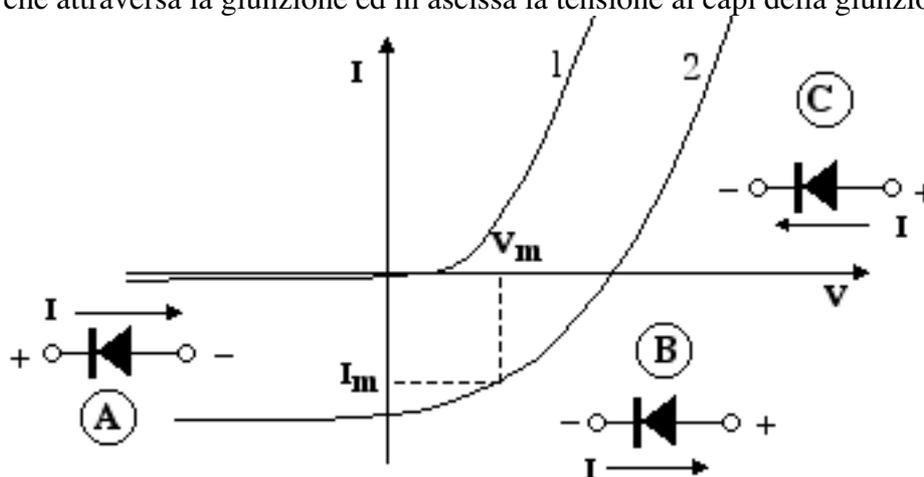


Fig. 2

Le caratteristiche attraversano 3 quadranti: la curva indicata con 1 è quella in condizioni di buio, la curva indicata con 2 è quella che si ottiene in condizioni di illuminamento.

Nel quadrante A il fotodiode è polarizzato inversamente (elettrodo P negativo rispetto ad elettrodo N nella giunzione PN): nelle condizioni di buio la corrente inversa è trascurabile², come per ogni diode raddrizzatore, che non conduce se polarizzato inversamente. Nelle condizioni di illuminamento tuttavia si nota che esso è attraversato da una apprezzabile corrente inversa. La pendenza di tale curva è prossima a zero: la corrente è praticamente indipendente dalla tensione di polarizzazione.

Nel quadrante C il fotodiode è polarizzato direttamente, e la corrente diretta, che scorre dall'elettrodo P a quello N, cresce esponenzialmente con la tensione applicata, come in ogni diode (anche se si usa approssimare l'esponenziale con una retta, che intercetta l'asse delle tensioni ad un valore che viene chiamato V_F).

Nel quadrante B (quello normalmente utilizzato nella produzione fotovoltaica di energia elettrica), pur essendo il fotodiode polarizzato direttamente, esso è attraversato da una corrente inversa e si comporta come se avesse resistenza negativa. Di conseguenza, se si pone una resistenza tra gli elettrodi P e N il fotodiode si comporta come una sorgente di forza elettromotrice, anche in assenza di un generatore di tensione.

² Si tratta della generazione spontanea di coppie elettrone-lacuna nella prossimità della giunzione PN per effetto termico: cresce con la temperatura

Le batterie solari

La cella fotovoltaica è quindi anche detta *fotopila* o *batteria solare*, perchè è in grado di trasformare direttamente l'energia delle radiazioni luminose in energia elettrica.

Il rendimento massimo teorico della trasformazione di energia solare in energia elettrica è del 32%. Le celle fotovoltaiche attualmente disponibili hanno un rendimento del 10% circa. Le vere e proprie batterie solari (pannelli fotovoltaici) sono costituite di solito da molti fotodiodi in serie e in parallelo tra loro per fornire elevate correnti (fino a qualche Ampere) ed elevate tensioni (fino a decine di Volt).

L'effetto fotovoltaico nelle giunzioni a semiconduttore

Per capire meglio in che cosa consiste l'effetto fotovoltaico si deve innanzitutto considerare il funzionamento di una generica giunzione PN, o diodo a semiconduttore.

I materiali semiconduttori possono essere puri (Germanio, Silicio) o leghe (GaAs, InAs, InP, GaP, InGaAs, GaAsP...) ed in generale appartengono ai gruppi IV, II e VI, III e V della tavola di Mendeleiev.

Le loro proprietà possono essere modificate introducendo delle impurezze nel reticolo cristallino (bastano pochi atomi per miliardo): si ottengono così semiconduttori "*drogati*" che si dicono di tipo P o di tipo N a seconda del tipo di impurezze.

Se si costruisce un dispositivo con due semiconduttori (P e N) adiacenti, la loro superficie di separazione costituisce ciò che viene chiamata una *giunzione PN*³.

Una giunzione PN si comporta elettricamente come un diodo rettificante, ovvero esibisce conducibilità molto diversa a seconda del segno della sua polarizzazione.

Ma le *proprietà rettificanti* della giunzione PN non sono quelle che qui ci interessano: vediamo più in dettaglio le sue *proprietà opto-elettroniche*.

In uno strato sottilissimo adiacente alla giunzione (*strato di svuotamento*) la distribuzione dei portatori di carica (elettroni e lacune) cambia rispetto alla situazione esistente nel volume del semiconduttore P o N: in esso si crea un campo elettrico (sostenuto da un doppio strato carico e fisso nel reticolo) (Figura 3).

³ Due giunzioni PN adiacenti ovvero una doppia giunzione PNP o NPN costituiscono un *transistor*.

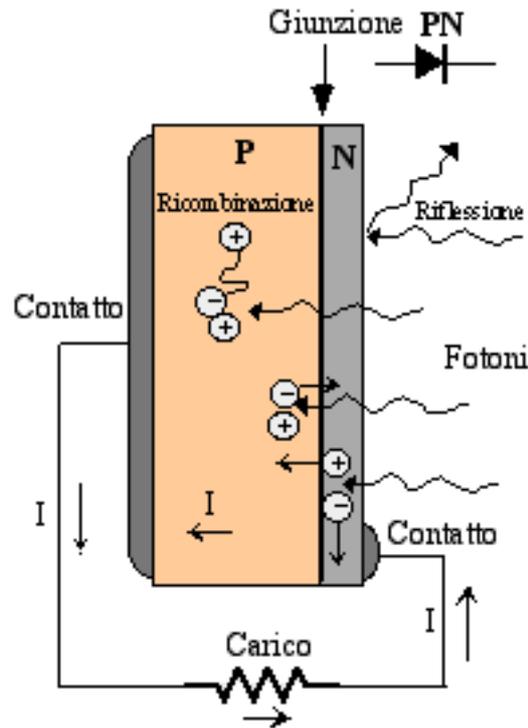


Fig. 3

Nello stato di svuotamento, non ci sono cariche libere e quando esso è colpito dalla luce (fotoni), alcuni elettroni, normalmente *legati* ad un atomo del reticolo cristallino e quindi non disponibili per il trasporto di carica, vengono liberati dal legame e possono muoversi liberamente nel cristallo, lasciando carico positivamente l'atomo cui erano legati. Questa carica positiva viene detta "lacuna". Anche le lacune possono "muoversi" nel cristallo: infatti se uno degli elettroni legati agli atomi adiacenti si sposta nel sito lasciato libero, la lacuna si sposta in direzione opposta. I due tipi di portatori di carica (elettroni e lacune) possono *ricombinarsi* durante la migrazione nel volume del semiconduttore, e cessare così di contribuire alla fotocorrente.

La foto-corrente può essere prodotta solo da un flusso di fotoni (con energia superiore all'energia di soglia : $h\nu > E_g$) che possa raggiungere lo strato di svuotamento.

L'energia di soglia è quella corrispondente alla "banda di energia proibita" (Energy Gap) tipica del semiconduttore di cui è fatta la giunzione PN.

Si capisce quindi come si possa ottenere un sensore di luce da un fotodiode: è sufficiente che la giunzione PN, chiusa su un carico esterno, sia esposta alla luce (ad esempio rendendo molto sottile lo strato drogato N, come in figura 3) perché attraverso di essa si stabilisca una corrente elettrica proporzionale al flusso luminoso, che circola da P a N sul carico esterno e da N a P all'interno del fotodiode (*corrente inversa*).

Viceversa, se una giunzione PN è attraversata da corrente elettrica nel verso della polarizzazione positiva (*corrente diretta*), è possibile osservare una emissione di luce (LED).

Caratterizzazione di una fotocella con sistema RTL.

Utilizzando una sonda di tensione ed una sonda di corrente (o una sonda di tensione differenziale) connesse a CBL, è abbastanza facile ottenere una caratterizzazione di celle fotovoltaiche come quelle descritte in figura 2, se si impiega anche un generatore di tensione alternata (sinusoidale o triangolare) per poter misurare rapidamente tensioni e correnti sia positive che negative.

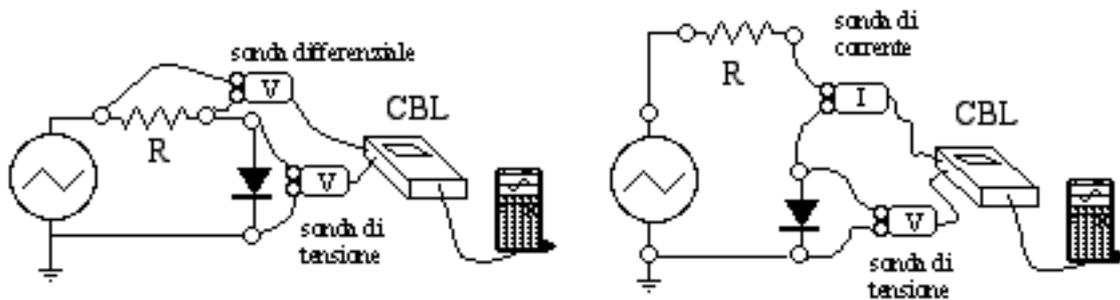


Fig. 4

Conviene connettere in serie alla fotocella una resistenza (per limitare la corrente), e alimentare il circuito con un segnale alternato, e utilizzare una delle due configurazioni mostrate in figura 4.

Se si usa il circuito schematizzato a sinistra nella figura 4, le correnti (che saranno riportate sull'asse Y, CH1) saranno in centesimi di Ampere (dato che si misura la tensione con sonda differenziale ai capi di una resistenza da 100 ohm), e le tensioni misurate ai capi della fotocella (che saranno riportate sull'asse X, CH2) saranno in Volt.

Misure ottenute in condizioni di buio con una cella fotovoltaica costituita da 4 fotodiodi in serie e posta in serie ad una resistenza $R=100\text{ Ohm}$ sono riportate in figura 5.

Il circuito è stato qui alimentato da una tensione variabile linearmente nel tempo (onda triangolare) tra circa +5V e -5V.

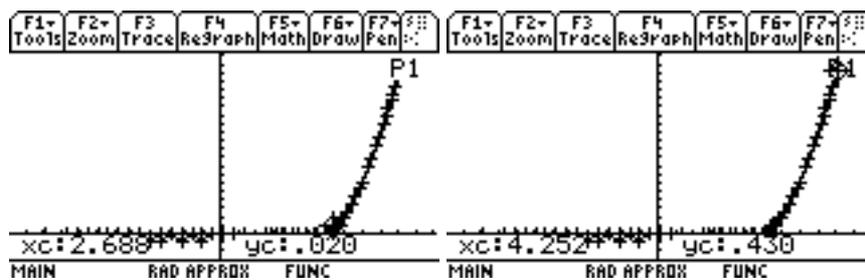


Fig. 5

A sinistra in figura 5 il marker è posizionato alla tensione di “ginocchio” $V_f=2.7\text{ V}$, a destra alla massima polarizzazione diretta $V_f=4.25\text{ V}$ corrispondente ad una corrente $I=4.3\text{ mA}$ (tensione differenziale di 0.43 V).

La caratteristica misurata con fotocella illuminata da una lampadina è riportata in figura 6, ove a sinistra il marker mostra la massima corrente inversa ($I=-3.9\text{ mA}$) e a destra la massima corrente diretta ($I=5.7\text{ mA}$).

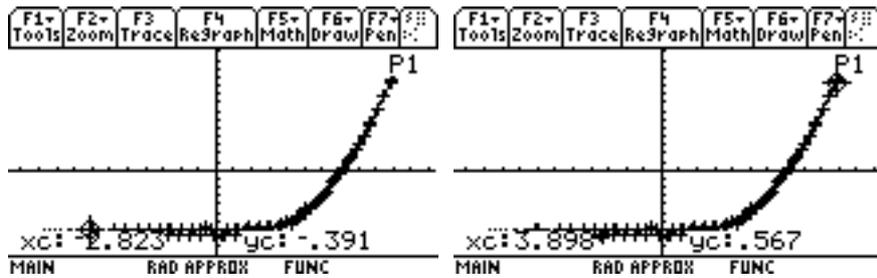


Fig. 6

Studio della potenza fotovoltaica erogata

Utilizzando un piccolo pannello fotovoltaico⁴ montato in serie ad un potenziometro, si può facilmente studiare il comportamento di una cella fotovoltaica come *convertitore di energia luminosa in energia elettrica*, e determinare le condizioni per utilizzarlo con *massimo rendimento*.

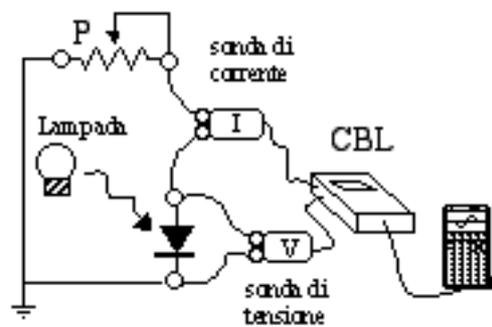


Fig. 7

Il circuito suggerito è mostrato in figura 7. Il canale 1 (CH1) misura la corrente erogata I ed il canale 2 (CH2) la tensione ai capi del pannello V_f .

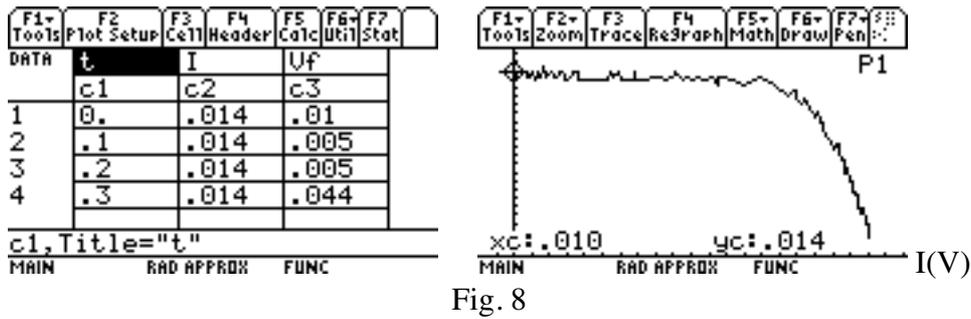
La potenza erogata è il prodotto $W = V_f \cdot I$,

E' ovvio che, se si trascura la resistenza interna del sensore di corrente, la medesima tensione si misurerebbe ai capi del potenziometro P .

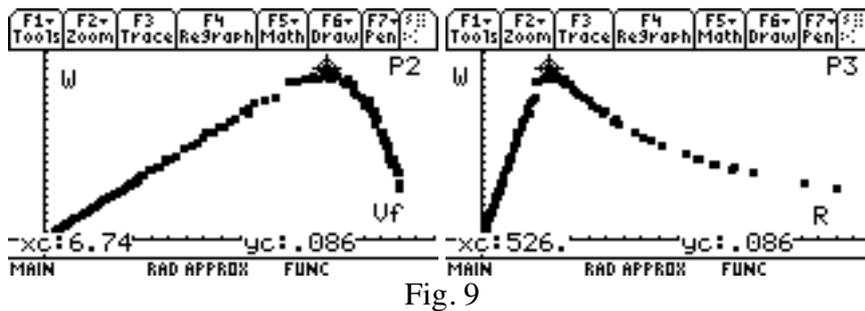
Di conseguenza il valore della resistenza (variabile) del potenziometro può essere calcolata come rapporto $R = V_f / I$. Ciò consente di ottenere anche un grafico della potenza erogata in funzione del carico R .

Un esempio dei risultati ottenuti sotto illuminazione da lampada da 60 W posta a circa 50 cm di distanza, con cella chiusa su potenziometro con $R_{max} = 5 \text{ kohm}$, al variare di R , è riportato in figura 8, ove la corrente è in ordinata (Y) e la tensione in ascissa (X); la massima corrente è 14 mA e la massima tensione poco più di 8 V.

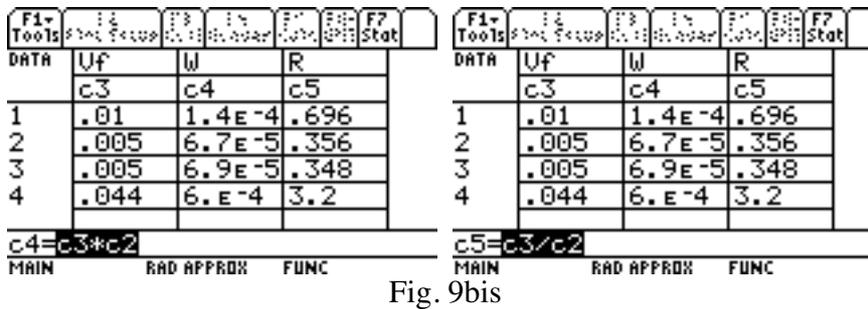
⁴ Qui si è usato un pannello *SP 60-6V* costituito da 18 celle con diodo 1N58 in serie ($V_{max} = 8.5V$)



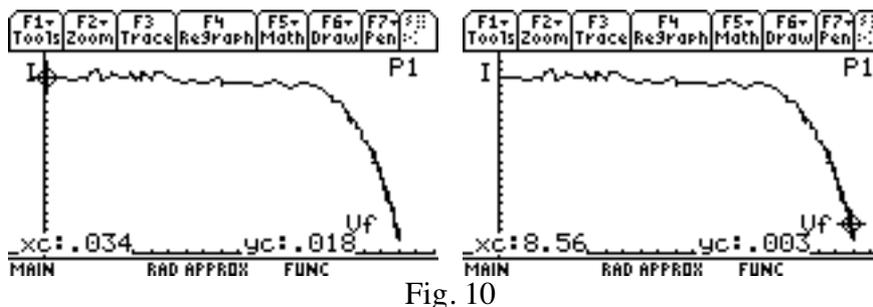
In figura 9 sono riportati i grafici della potenza erogata in funzione di V_f (a sinistra) e in funzione di R (a destra)



Il grafico $W(V_f)$ rivela un massimo di $W=86\text{mW}$ corrispondente alla tensione $V_f=6.74\text{V}$. Il grafico della potenza in funzione del carico $W(R)$ mostra che la massima potenza è erogata su un carico di $526\ \text{ohm}$.



Risultati analoghi si ottengono aumentando l'illuminazione. Ad esempio riducendo la distanza tra lampada e pannello a soli $10\ \text{cm}$ si ottiene il grafico di figura 10., che mostra come l'accresciuto irraggiamento aumenta la massima corrente a $18\ \text{mA}$, mentre la massima tensione resta circa $8.5\ \text{V}$.



Qui il grafico $W(V_f)$ rivela un massimo di $W=111$ mW corrispondente alla tensione $V_f=6.59$ V.

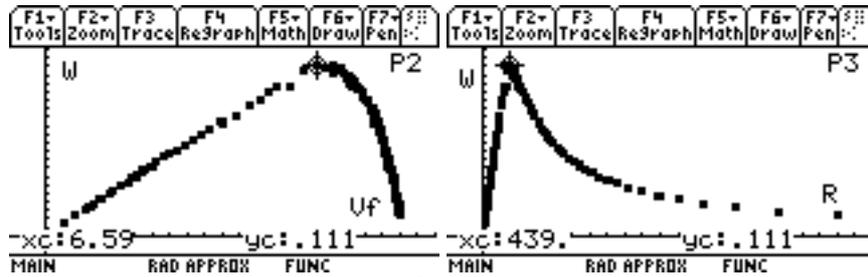


Fig. 11

Il grafico della potenza in funzione del carico $W(R)$ mostra che la massima potenza è erogata su un carico di circa 420Ω (figura 11),

Se invece si riduce l'irraggiamento aumentando la distanza tra lampada e pannello a più di 1 metro, la corrente massima scende sotto i 5 mA, e il grafico $W(V_f)$ rivela un massimo di $W=28$ mW corrispondente alla tensione $V_f=5.79$ V e quello $W(R)$ mostra che il massimo si ottiene sotto un carico di 1190 ohm (figura 12).

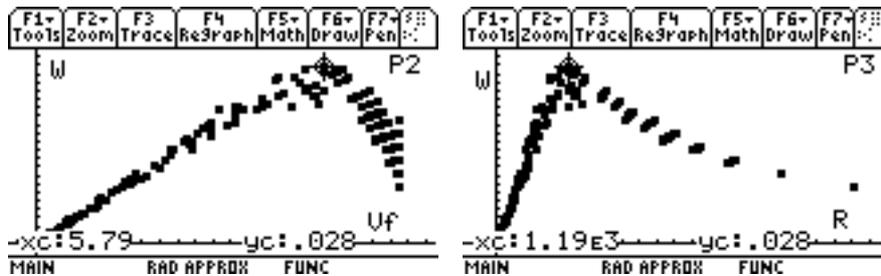


Fig. 12

Pannello MAD celle tutte in parallelo ($V_{max}=0.5V$)

Misure sotto illuminazione decrescente (lampada da 60 W), con cella chiusa su potenziometro da 200 ohm, al variare di R . In figura 13: quadratini= irraggiamento forte (distanza pochi cm); quadrati bianchi= irraggiamento minore (distanza circa 40 cm); croci= irraggiamento debole (distanza circa 80 cm)

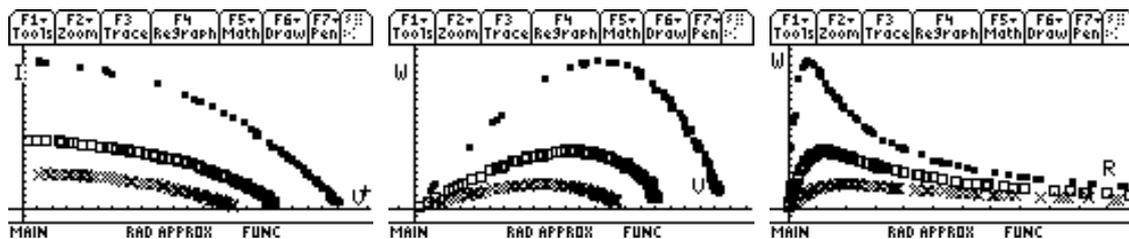


Fig. 13