

# Divertirsi con le celle fotovoltaiche

a cura di Mario Menichella



## INDICE

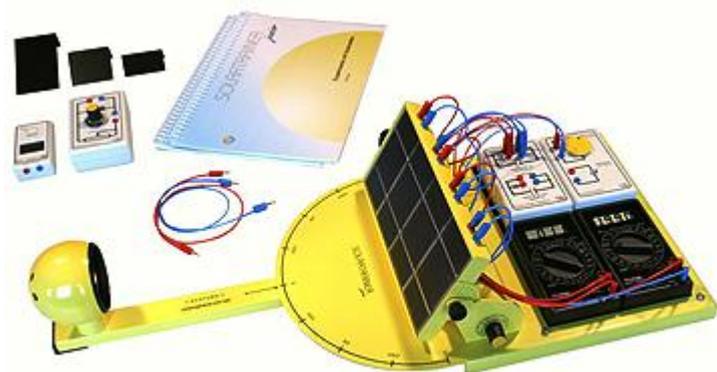
- [Introduzione](#)
- [Cosa occorre sapere sulle celle solari](#)
- [Informazioni utili per le vostre esperienze](#)
- [Celle solari in serie e in parallelo](#)
- [L'effetto della distanza e potenza della sorgente](#)
- [Gli effetti delle varie lunghezze d'onda della luce](#)
- [Gli effetti di ombre, inclinazione, polvere, etc.](#)
- [L'uso delle celle solari come sensori](#)
- [Un semplice fotometro e un fotocolorimetro](#)
- [Come costruire un densitometro da laboratorio](#)
- [Un originale misuratore di temperatura](#)
- [Un pannello a concentrazione in miniatura](#)
- [Un pannello fotovoltaico autocostruito](#)
- [Come lo si realizza in pratica](#)
- [Bibliografia](#)

---

## INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, il "boom" delle energie rinnovabili - e in particolare del fotovoltaico - ha reso particolarmente "di moda" i *pannelli fotovoltaici* e, nel campo dell'hobbistica, i loro "mattoni costituenti": cioè le celle fotovoltaiche, o *celle solari*. Così, nei negozi di elettronica o su Internet (digitando su *Google* espressioni del tipo "cella solare prezzo"), si possono facilmente acquistare per pochi euro delle celle fotovoltaiche di varie possibili dimensioni, con cui potrete giocare e divertirvi per giorni.

In realtà, oggi sul mercato esistono numerosi *kit* e giochi destinati ai ragazzi e che sono incentrati proprio intorno alle celle fotovoltaiche. Tuttavia noi ne sconsigliamo l'acquisto, perché - oltre a essere più costosi - non offrono granché di particolare, e di solito suggeriscono una quantità limitata di esperimenti non particolarmente attraenti. Invece, una volta che avrete acquistato una piccola cella solare (anche solo di 10 x 3 cm circa), praticamente avrete già l'elemento essenziale con cui realizzare una vasta gamma di esperienze che nel seguito illustreremo una per una. Saranno poi utili un piccolo motorino elettrico, qualche led e/o piccola lampadina da pochi volt, uno strumento di misura (tipicamente un tester digitale, che dovrebbe far già parte dell'"armamentario standard" di qualsiasi scienziato dilettante), e poco altro che vedremo caso per caso.



*Due esempi dei numerosi kit per ragazzi basati sulle celle solari, e concepiti in genere per scopi parzialmente didattici.*

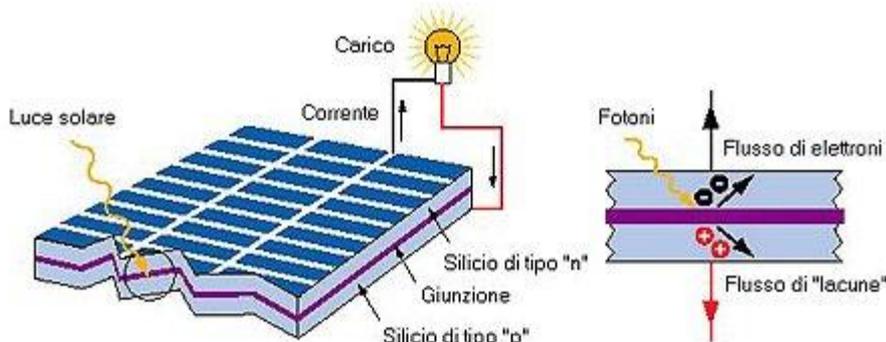
Le esperienze che proponiamo lasciano allo scienziato dilettante la ricerca per via sperimentale delle risposte, per non togliergli il gusto della "scoperta" e avvicinarlo al vero metodo scientifico. In generale, la scienza progredisce attraverso un iter classico: *domande* --> *ipotesi* --> *previsioni* --> *misure sperimentali* --> *conclusioni*. Anche gli articoli scientifici di ricerca presentano una struttura grosso modo simile. Pertanto, anche in un ambito all'apparenza ristretto come quello legato alle celle solari, esistono in realtà molte variabili e questioni che il dilettante può approfondire con l'investigazione scientifica, e spesso nuove domande gli verranno alla mente stimolando nuovi esperimenti.

Una volta che si abbia una *domanda* su un argomento scientifico ma *non* la risposta, il primo passo è quello di formulare un'ipotesi molto specifica, con le previsioni che ne conseguono, e progettare un esperimento per metterle alla prova. Dopodiché, occorre svolgere le osservazioni - cioè compiere l'esperienza pianificata - e raccogliere una certa mole di dati, per lo più quantitativi, annotando tutto ciò che può essere utile o poco chiaro. Il passo finale consiste nell'analizzare i dati (in genere compiendo analisi statistiche, determinando curve di interpolazione, rilevando discrepanze inattese, etc.) e trarre le conclusioni, a cominciare da se i dati supportano o meno la propria ipotesi iniziale. Altre conclusioni possono includere: una spiegazione di ciò, eventuali critiche all'esperimento, la non bontà dei dati, la necessità di approfondimenti, etc.

## COSA OCCORRE SAPERE SULLE CELLE SOLARI

Le celle fotovoltaiche sono state inventate nel 1954, quando per la prima volta è stata effettuata nella pratica la conversione della luce in energia elettrica usando una cella solare al silicio. Se all'inizio le celle solari erano in realtà poco più di un giocattolo, a partire dal 1958 sono state ampiamente utilizzate come fonte di energia elettrica sui satelliti, sulle sonde e sulle stazioni spaziali inviate dall'uomo nello spazio, e oggi le possiamo trovare in numerosi oggetti: dalle calcolatrici agli zainetti, dai grandi pannelli fotovoltaici alle tende da campeggio. Una cella solare produce una *corrente continua* (DC) - per cui quella prodotta da un pannello fotovoltaico viene trasformata in corrente alternata (AC) con l'ausilio di un *inverter* - che può essere utilizzata direttamente oppure accumulata in una pila ricaricabile o in una batteria tipo quelle per automobili.

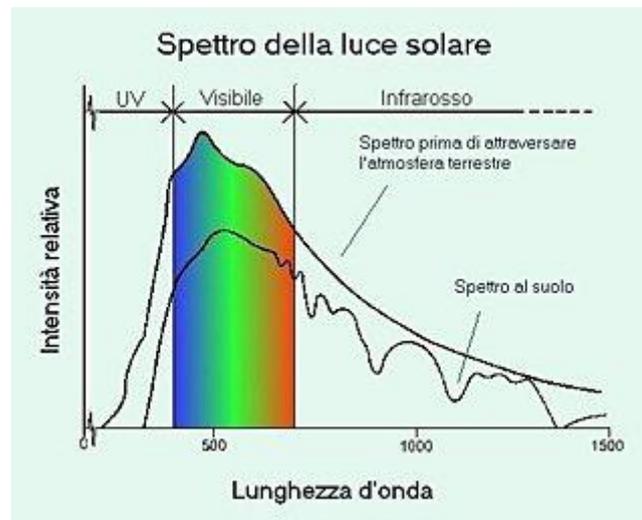
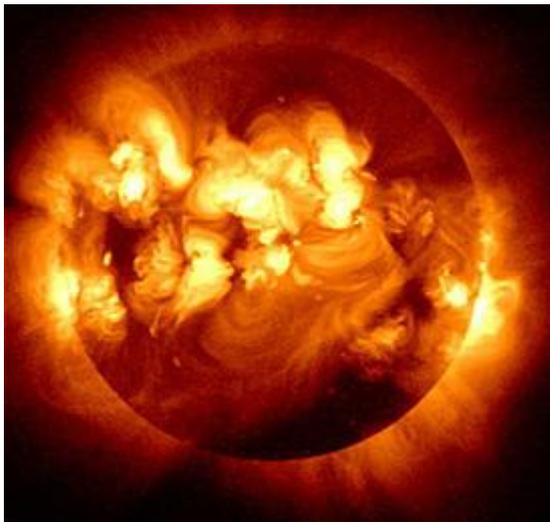
Le celle solari non si basano sull'*effetto fotoelettrico* osservato per la prima volta da Antoine C. Bequerel e da suo figlio Alexandre nel 1839, bensì sull'*effetto fotovoltaico*. Qual è la differenza fra i due effetti? Entrambi esprimono l'emissione di elettroni da parte di una superficie esposta a una radiazione elettromagnetica, come ad es. la luce visibile, a seguito del suo assorbimento da parte del materiale, ma mentre l'effetto fotoelettrico si ha fra due elettrodi fra cui esiste già una differenza di potenziale (così, quando un fotone di luce di sufficiente energia colpisce un elettrodo, un elettrone viene espulso dal guscio esterno di un atomo e può muoversi verso l'altro elettrodo generando una corrente), l'effetto fotovoltaico provoca la creazione di una differenza di potenziale fra due elettrodi che, invece, non ce l'hanno già.



*La struttura e il funzionamento di una cella solare. I fotoni di luce incidenti generano un flusso di elettroni e di lacune.*

Ecco come funziona una cella fotovoltaica. I cristalli di silicio hanno 4 elettroni cosiddetti "di valenza" (cioè appartenenti al guscio esterno dell'atomo, e in grado di legarsi con altri atomi) legati con gli elettroni di valenza di altri atomi di silicio. Quando uno strato di silicio "drogato" con atomi (ad es. di boro) che hanno meno elettroni di valenza del silicio (strato detto quindi "giunzione *p*", o positiva) viene accoppiato con uno strato drogato con atomi (ad es. di fosforo) che hanno invece più elettroni di valenza (e chiamato giunzione *n*), si crea un campo elettrico, che spinge gli elettroni dagli atomi con elettroni in più verso gli atomi con elettroni in meno, per cui si crea una "corrente elettrica", che per definizione non è altro che un flusso di elettroni. Quando la luce colpisce una cella fotovoltaica, molti elettroni di valenza si staccano dal legame con altri atomi di silicio e passano a un livello energetico superiore - detto *banda di conduzione* - dove possono contribuire al flusso elettrico unidirezionale, cioè alla produzione di una corrente.

L'energia che la Terra riceve dal Sole si chiama irraggiamento solare, e può essere espressa in unità watt per metro quadrato ( $W/m^2$ ) o chilowattora per metro quadrato ( $kWh/m^2$ ) al giorno. Circa metà della radiazione solare che arriva sul nostro pianeta viene riflessa nello spazio. In un giorno sereno, a livello del mare, quando i raggi del Sole giungono in maniera perpendicolare alla superficie terrestre, l'irraggiamento è di  $1000 W/m^2$ . Poiché l'efficienza massima di una cella fotovoltaica al silicio commerciale è grosso modo dell'ordine del 15%, se la cella fosse grande  $1 m^2$ , produrrebbe - in tali condizioni -  $150 W$ . Tuttavia, essendo la Terra rotonda, il Sole colpisce la superficie con angoli diversi (compresi fra  $0^\circ$  e  $90^\circ$ ): ad angoli più bassi, i raggi solari attraversano una quantità maggiore di atmosfera e vengono diffusi da quest'ultima, per cui l'energia che giunge al suolo è minore.



*Il Sole è una sorgente di luce di cui è ben noto lo spettro, cioè la distribuzione dell'intensità nei vari colori visibili e alle altre lunghezze d'onda.*

## INFORMAZIONI UTILI PER LE VOSTRE ESPERIENZE

La maggior parte delle celle solari in commercio producono una *tensione* di circa  $0,6 V$  o relativi multipli, mentre la *corrente* che sono in grado di erogare dipende da vari fattori, ed in particolare: la dimensione della cella, la quantità di luce che la colpisce, il tipo di cella fotovoltaica. Esistono due tipi di celle fotovoltaiche molto comuni, quelle *monocristalline* e quelle *policristalline*: sono comunque molto simili, e potete usare uno qualsiasi dei due tipi. In molte applicazioni pratiche, come ad esempio l'alimentazione di radio o altri dispositivi elettronici (che di solito richiedono una tensione superiore), si possono ottenere voltaggi più elevati collegando più celle in serie fino ad ottenere la tensione desiderata. Se la corrente erogata non è sufficiente ad alimentare il dispositivo che ci interessa, possiamo usare delle celle più grandi - cioè dalla superficie più ampia - oppure collegare più celle in parallelo. I *pannelli fotovoltaici* non sono altro che celle solari collegate in serie fino a raggiungere, di solito, la tensione (a circuito aperto) di  $12-15 V$ .

Tranne un paio di casi in cui occorre misurare la tensione, nella maggior parte delle esperienze proposte in questa pagina occorre misurare la producibilità elettrica della cella solare, e lo si fa misurando la corrente che fluisce in un circuito chiuso comprendente la cella stessa e un carico, cioè una "resistenza" (oppure, equivalentemente, misurando la tensione ai capi del carico). Come carico si può usare il tester stesso, o una resistenza vera e propria (cioè intesa come componente elettronico), oppure un carico più tradizionale: un led, un led + resistenza, una piccola lampadina, un motorino, etc. La scelta di un carico adatto dipende dal nostro scopo e dalla corrente massima prodotta dalla cella, e dunque dalle sue dimensioni e dalla massima intensità luminosa della sorgente. In pratica, in molti casi possiamo determinare sperimentalmente se un carico è adatto. Può essere comunque utile sapere, per farsi già prima un'idea, che una cella fotovoltaica - esposta al Sole con inclinazione ideale - fornisce fino a circa 30-36 mA/cm<sup>2</sup>.



*Un moderno tester digitale che permette di compiere buone misure di tensione, corrente, resistenza, etc.*

Un carico è "adatto" se può funzionare senza problemi con la massima corrente che verrà prodotta dalla cella (quindi con l'intensità luminosa più forte che misureremo): se il carico non riesce a sopportarla (la corrente raccomandata per un led, ad es., è di 20 mA), esso brucia. Al tempo stesso il circuito cella-tester usato per le misure deve poter rivelare la corrente più debole che dovremo misurare, ma ciò negli esperimenti proposti non sarà un problema (in altri casi, un appassionato di elettronica potrebbe usare come carico una resistenza ai cui capi si crei una tensione di circa 20-25 mV e amplificare quest'ultima di 100 volte, fino a 1-2 V, con un circuito operativo). Naturalmente, la prima cosa che uno scienziato dilettante farà (ed è una delle esperienze proposte) è assicurarsi che la corrente nel circuito chiuso sia proporzionale all'intensità luminosa.

È possibile effettuare misure relative della producibilità elettrica anche senza un tester, se possiamo usare un motorino elettrico (ad es. la ventola di un PC) e un cronometro (oppure un orologio). Basterà infatti applicare sopra il motorino un disco di cartone di una decina di centimetri di diametro, sul quale disegneremo un punto nero ben visibile. Siccome la velocità di rotazione del motore è proporzionale all'intensità di corrente, valuteremo quantitativamente tale velocità misurando più volte, con l'aiuto del cronometro, il numero di giri compiuti dal puntino in 15 secondi e calcolando la media, cioè il valore che useremo nelle nostre tabelle al posto della corrente. Se poi abbiamo anche la possibilità di usare un tester, può essere interessante confrontare le curve (e gli errori di misura) che si ottengono usando entrambi i metodi di misura.

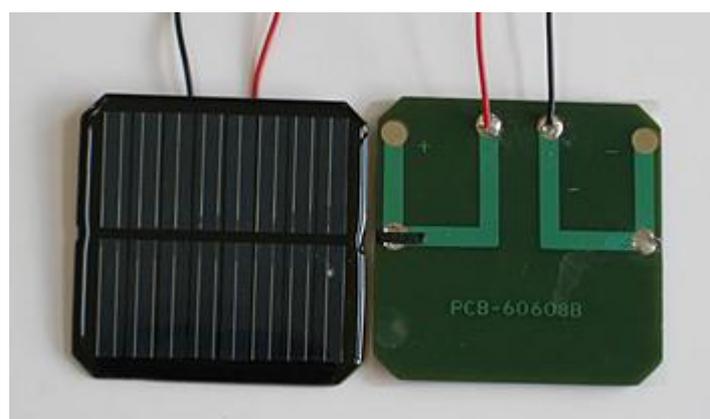


Se non avete un tester, potete prendere misure relative dell'energia prodotta da una cella solare contando il numero di giri di un motorino nel tempo.

## CELLE SOLARI IN SERIE E IN PARALLELO

Lo scopo di questo primo esperimento, utile e interessante soprattutto per chi ha scarse o nulle nozioni di elettronica, è di costruire dei semplici circuiti con le celle fotovoltaiche per familiarizzare con questi oggetti e con le grandezze elettriche ad esse collegate: in particolare, la *tensione* misurata ai capi della cella "a circuito aperto" (cioè in assenza di un carico) e la *corrente* misurata "a circuito chiuso", cioè con la cella collegata a un carico: ad es. il tester, un led, una lampadina, un motorino elettrico, etc.

Esattamente come le pile, le celle solari hanno una loro *tensione nominale* (misurata in volt, V) e una *corrente nominale* (misurata in ampere, A, o milliampere, mA). La *potenza elettrica* (misurata in watt, W), come sempre, è data dalla semplice legge: Potenza = Tensione X Corrente, ovvero  $W = V \times A$ . Perciò, se ho una cella fotovoltaica che ha una tensione nominale di 0,6 V e una corrente nominale di 160 mA, la potenza elettrica nominale sarà, molto semplicemente, di  $0,6 \times 0,160 = 0,1$  W. Si noti che la potenza fornibile da una data cella solare è variabile, poiché dipende da quanta luce la colpisce, quindi si assume come *potenza nominale* la cosiddetta *potenza di picco* (misurata in "watt di picco",  $W_p$ ), cioè la potenza massima in determinate "condizioni standard" (ad es., per i pannelli fotovoltaici, a temperatura di 25° C e con irraggiamento solare di 1.000 W/mq).

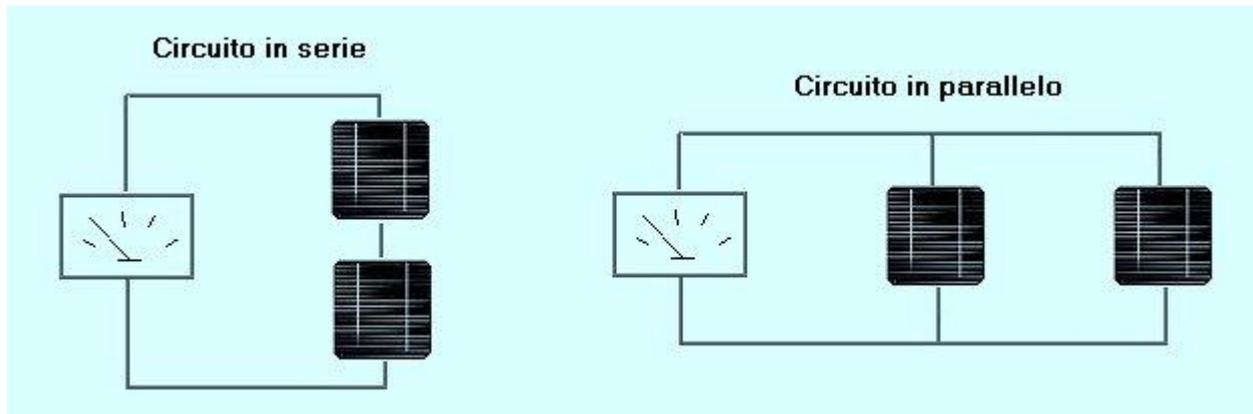


Due celle solari i cui poli positivo (filo rosso) e negativo (filo nero) sono collegabili in serie o in parallelo.

Possiamo quindi provare a misurare con un tester la tensione a circuito aperto e la corrente a circuito chiuso di una singola cella solare, dopodiché, annotati i risultati ottenuti, realizzare un circuito con due celle solari messe *in serie* fra loro come mostrato in figura qui sotto (e lasciando invariata la sorgente di luce e il carico) per vedere le differenze che si ottengono in tali misure. Poi possiamo mettere le due

celle *in parallelo* anziché in serie (v. la figura per la disposizione dei componenti nel circuito) - sempre lasciando invariata la sorgente di luce e il carico - e notare, anche in questo caso, cosa cambia numericamente rispetto al caso "cella singola".

Scopriremo così che le celle solari si comportano esattamente come le pile messe in serie o in parallelo: se due celle di tensione nominale  $V_1$  e  $V_2$  e corrente nominale  $A_1$  e  $A_2$  vengono montate in serie, la tensione si somma (cioè  $V_{\text{totale}} = V_1 + V_2$ ) mentre la corrente rimane costante; se vengono montate in parallelo, la corrente si somma (cioè  $A_{\text{totale}} = A_1 + A_2$ ) mentre la tensione rimane costante. Quindi, nel calcolare la potenza elettrica di due celle in serie, nella formula  $W = V \times A$  dovremo usare  $V_{\text{totale}}$  al posto di  $V$ , mentre per calcolare la potenza di due celle in parallelo dovremo usare  $A_{\text{totale}}$  al posto di  $A$ . In generale, date due celle solari, la potenza fornita differirà a seconda che siano usate in serie o in parallelo.



Lo schema di un circuito con celle solari in serie e di uno con celle in parallelo. Il tester misura la corrente che circola nel circuito chiuso.

*Domande per lo scienziato dilettante:* la tensione e la corrente di una cella singola sono esattamente uguali per ogni cella - sia pure della stessa marca e modello - o vi sono differenze che rientrano in certe tolleranze industriali? Nei circuiti in serie, le tensioni si sommano e la corrente rimane costante esattamente come previsto dalla legge teorica o nella realtà si discostano leggermente? Ed è più grande la potenza elettrica di due celle in serie o in parallelo? A voi la risposta attraverso la verifica sperimentale!

## L'EFFETTO DELLA DISTANZA E POTENZA DELLA SORGENTE

Una seconda serie di esperimenti che si possono compiere con una cella fotovoltaica è di tipo più fisico-matematico: si tratta, cioè, di studiare - ricavando sperimentalmente la legge sottostante - come la *quantità di luce* influenza la produzione di elettricità di una cella. E la quantità di luce può essere variata essenzialmente in due modi: variando la distanza tra la sorgente (di potenza costante) e la cella fotovoltaica oppure, al contrario, tenendo fissa quest'ultima distanza e variando la potenza della sorgente.



*I due elementi fondamentali dei nostri esperimenti di questa pagina: una sorgente di luce e una piccola cella fotovoltaica.*

Per compiere questa esperienza, potete porre la cella fotovoltaica sul tavolo insieme a una lampada: in pratica, collocare lampada sopra e cella sotto o, meglio ancora, sistemare la lampada in modo che illumini in orizzontale e porre la cella alla stessa altezza sul tavolo, con distanza quindi facilmente regolabile. Dopodiché, una volta fissata la distanza iniziale fra la lampada e la cella, occorre misurare tale distanza e misurare la corrispondente corrente prodotta dalla cella solare a circuito chiuso. A questo punto si può progressivamente ridurre la distanza originale, ad esempio prima di  $1/4$ , poi di  $1/2$  e infine di  $3/4$  (ma è possibile usare un "passo" più piccolo, ad es. di  $1/10$ ) e ripetere ogni volta le misure di distanza e corrente prodotta, che possono essere riassunte in una tabella di un foglio elettronico come *Excel* tipo quella mostrata qui sotto.

*Tabella 1. Effetto della distanza sulla produzione elettrica.*

<i>Distanza</i>	<i>Corrente</i>
1	
$1/2$	
$3/4$	

Riportando le misure ottenute su un grafico *distanza-corrente* (cioè con in ascissa la distanza  $d$  fra cella e sorgente ed in ordinata la corrente prodotta dalla cella), potete determinare sperimentalmente la legge che descrive il fenomeno "effetto della distanza sulla producibilità elettrica di una cella solare". Scoprirete, così, se si tratta di una legge lineare ( $1/d$ ), di potenza ( $1/d^2$ ), cubica ( $1/d^3$ ), o di altro tipo. Oppure, se avete già un'idea del possibile tipo di curva, potete verificare che sia quella da voi prevista. Se vi piace la matematica, potete inoltre divertirvi a trovare l'equazione della curva che approssima meglio i vostri dati sperimentali, ad es. usando il cosiddetto "metodo dei minimi quadrati" (*Excel* può aiutarvi in questo). A quel punto, sarete in grado di dare una stima accurata del valore della corrente per nuove distanze diverse da quelle note.



Vari tipi di lampade a incandescenza. Oggi sono sempre più sostituite da lampade a risparmio energetico.

L'altro modo per studiare l'effetto della potenza della sorgente è quello di usare sorgenti di potenza diversa *nota*, in pratica almeno 4 lampadine di potenza differente: ad es. 25W, 40W, 60W, 100W, 200W. In realtà, la quantità di luce che arriva da una sorgente luminosa su una porzione di sfera incentrata sulla sorgente si misura in *lumen*, tuttavia, poiché c'è una relazione tra questa e la potenza assorbita dalla lampadina, possiamo tranquillamente usare quest'ultima come parametro. Pertanto, annoteremo in una tabella la potenza della lampadina utilizzata e la misura della corrispondente corrente prodotta dalla cella. Dopodiché, di nuovo, cercheremo la curva - cioè la legge matematica - sottostante.

Tabella 2. Effetto della potenza della sorgente sulla produzione elettrica.

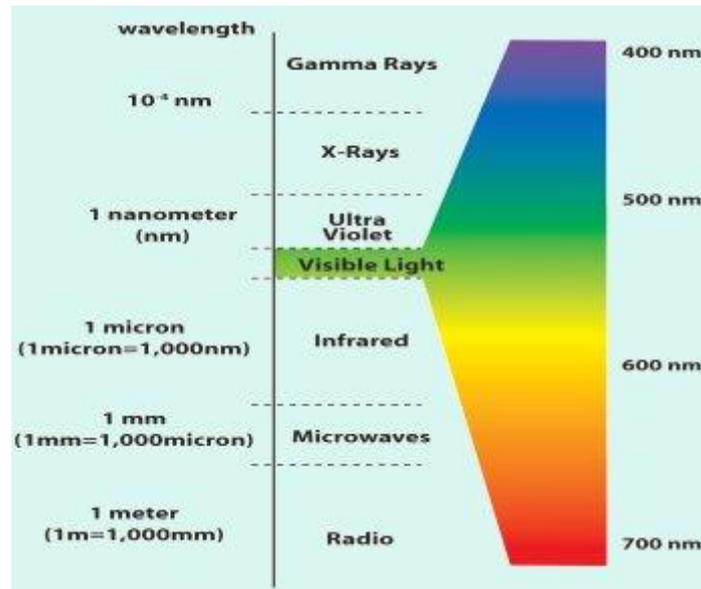
Potenza sorgente	Corrente
25 W	
40 W	
60 W	
100 W	
200 W	

*Domande per lo scienziato dilettante:* La legge distanza-corrente da voi determinata sperimentalmente vale anche quando la sorgente è molto debole o molto forte, cioè quando la lampadina è assai lontana o vicina alla cella? Provate a misurare la corrente della cella usando varie lampadine di uguale potenza in watt ma di produttori diversi: trovate gli stessi valori di corrente? Cambia (e se sì, come) la legge distanza-corrente usando lampadine che dirigono la luce con riflettori o lenti? A voi la risposta sperimentale!

## GLI EFFETTI DELLE VARIE LUNGHEZZE D'ONDA DELLA LUCE △

Un esperimento prettamente di tipo fisico è invece lo studio dell'effetto della lunghezza d'onda della luce incidente sulla producibilità elettrica di una cella solare. Infatti, esso si ispira direttamente alla legge sull'*effetto fotoelettrico* formulata da Albert Einstein all'inizio del secolo scorso e che gli fruttò il Nobel. Dunque, eseguire l'esperienza che proponiamo è un po' come vestire i panni del fisico e provare a verificare sperimentalmente, a casa propria, se vale anche per l'*effetto fotovoltaico* - che, come visto all'inizio dell'articolo, è diverso da quello fotoelettrico - quanto sostenuto in modo dettagliato da Einstein nel formulare una delle teorie che hanno fatto la storia di questa disciplina.

In uno dei 4 famosi articoli pubblicati da Einstein nel 1905 sulla prestigiosa rivista *Annalen der Physik* (comprendenti quelli sulla Relatività, altrettanto meritevoli del Nobel), basandosi sulla teoria di Max Planck sulla cosiddetta *radiazione del corpo nero*, quello che sarebbe diventato il più grande scienziato dell'era moderna propose che l'energia della radiazione elettromagnetica non è distribuita su un fronte d'onda continuo, bensì in piccoli "pacchetti" (chiamati in seguito *fotoni*). L'energia di un fotone ( $E$ ) è, secondo Einstein, associata con la sua frequenza ( $\nu$ ) attraverso una costante di proporzionalità (chiamata  $h$ , la quale ha a che fare con la meccanica quantistica), per cui:  $E = \text{costante} \times \nu$ . Donde il famoso "dualismo onda-corpuscolo", poiché una radiazione elettromagnetica di frequenza  $\nu$  può essere vista anche come un flusso di fotoni di energia  $E = h \times \nu$ .



*Lo spettro elettromagnetico, con la finestra del visibile. Ricordiamo che la lunghezza d'onda è inversamente proporzionale alla frequenza.*

Secondo la teoria di Einstein dell'effetto fotoelettrico, il "fotone" può strappare un elettrone a un metallo (che in tal caso chiameremo *fotoelettrone*) se la sua energia - cioè la frequenza della radiazione elettromagnetica associata - è abbastanza grande da superare la "funzione di lavoro" del metallo ( $\phi$ ). Se l'energia, ovvero la frequenza della radiazione, è troppo bassa, non si creano fotoelettroni. Se comunque l'energia è superiore alla soglia citata, l'energia in eccesso si trasforma in energia cinetica del fotoelettrone. Dunque, la teoria indica che: (1) una luce di bassa frequenza, inferiore cioè a una soglia ben precisa, è incapace di strappare elettroni a un metallo, e perciò non produce fotoelettroni; (2) raddoppiare l'intensità della luce raddoppia il numero di fotoni, e quindi di fotoelettroni creati, ma non cambia l'energia cinetica raggiunta da questi ultimi.

Risulta perciò interessante, per lo scienziato dilettante, provare a studiare sperimentalmente cosa succede con una cella solare, che non è basata sull'effetto fotoelettrico (il quale di solito è realizzato con elettrodi metallici posti in un tubo a vuoto) ma sull'*effetto fotovoltaico*: si applica, dunque, ad una cella al silicio - il quale fra l'altro *non* è un metallo - la teoria di Einstein sull'effetto fotoelettrico? Cioè, anche per una cella fotovoltaica la luce di certe frequenze produce elettricità mentre quella di altre frequenze no? Infatti, una cella fotovoltaica non è una "cellula fotoelettrica" (cioè un tubo a vuoto contenente due elettrodi di metallo di cui uno, il catodo, emette elettroni quando è esposto alla luce), ma è un dispositivo almeno all'apparenza diverso, basato su una giunzione *p-n* di materiali semiconduttori "drogati", su una banda di conduzione, etc.



La nostra cella solare e (a destra) i fogli di plastica trasparente, acquistabili presso qualsiasi cartoleria, utilizzabili come filtro.

Per analizzare la cosa, allestito un apparato sorgente-cella solare, copriamo la cella con fogli trasparenti colorati di diversi colori, ovviamente mettendone uno alla volta: ad es., blu, verde, giallo, rosso, etc. Tali fogli costituiscono una sorta di semplici filtri che lasciano passare la luce del colore ad essi corrispondente, ed il colore diverso è associato a frequenze diverse della radiazione elettromagnetica corrispondente. Come sorgente è opportuno usare la *luce solare*, poiché essa include in modo ben noto tutti i colori dello *spettro visibile*. Al solito, misuriamo la corrente della cella solare a circuito chiuso e riportiamo i valori ottenuti per ogni colore del filtro usato, nonché senza filtri, in una tabella come quella mostrata qui sotto. Dopodiché, in base ad essi traiamo le conclusioni. Esistono dei colori che non lasciano produrre (o quasi) corrente alla cella? E se sì, quali?

Tabella 3. Effetto della lunghezza d'onda della luce sulla produzione elettrica.

Colore del filtro	Lunghezza d'onda (nm)	Corrente
Luce bianca (nessun filtro)	390-780	
Violetto	390-455	
Blu	455-495	
Verde	495-575	
Giallo	575-600	
Arancione	600-625	
Rosso	625-780	

*Domande per lo scienziato dilettante:* Cosa cambia nei risultati se, al posto del Sole si usa una lampadina a incandescenza o una lampada fluorescente compatta? E se si usa una lampada alogena? Cambia qualcosa se analizziamo l'effetto della lunghezza d'onda usando invece, come sorgente di luce colorata (quindi, senza filtri), dei led colorati ad alta luminosità? Ritornando all'esperimento originale... la tensione a circuito aperto della cella solare a circuito aperto è influenzata (e, se sì, quanto) dal colore della luce incidente sulla cella?

## GLI EFFETTI DI OMBRE, INCLINAZIONE, POLVERE, ETC. △

Un'intera classe di esperimenti interessanti effettuabili con le celle solari nasce dal considerare la cella una sorta di pannello fotovoltaico in miniatura (in realtà, il pannello è composto solitamente da alcune decine di celle collegate in serie). È così possibile divertirsi a studiare, con solo 1-2 piccole celle

solari, quanto alcuni fattori incidono sulla producibilità elettrica di una cella (e quindi di un pannello fotovoltaico): ombreggiamento parziale, inclinazione rispetto alla radiazione incidente, polvere depositata, etc.

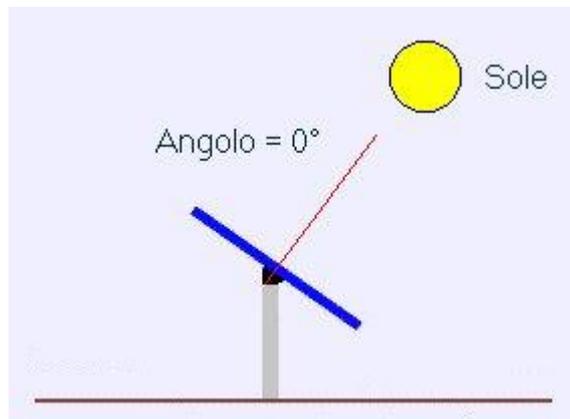


*Quanto si riduce l'elettricità prodotta dal fotovoltaico a causa di ombreggiamenti, condizioni atmosferiche, inquinamento?*

Per studiare l'effetto dell'ombreggiamento, si può cominciare con una singola cella e misurare come varia la corrente a circuito chiuso coprendo progressivamente la cella con un cartoncino tipo biglietto da visita. Ad es., possiamo coprire prima 1/4 della superficie, poi 1/2, 3/4 e infine l'intera cella. Dopodiché, possiamo connettere due celle in serie e vedere cosa succede se copriamo completamente una sola cella o entrambe le celle, misurando al solito la corrente che circola nel circuito chiuso. Poi, possiamo ripetere tale esperienza con due celle collegate in parallelo. Potremo in questo modo compilare una tabella *Excel* come quella qui sotto e trarre delle istruttive conclusioni.

*Tabella 4. Effetto dell'ombreggiamento sulla produzione elettrica.*

<i>Tipo di circuito</i>	<i>Quantità di copertura</i>	<i>Corrente</i>
Cella singola	Nessuna ombra	
Cella singola	1/4 coperto	
Cella singola	1/2 coperto	
Cella singola	3/4 coperto	
Cella singola	Tutta coperta	
2 celle in serie	Nessun ombra	
2 celle in serie	1 cella coperta	
2 celle in serie	2 celle coperte	
2 celle in parallelo	Nessun ombra	
2 celle in parallelo	1 cella coperta	
2 celle in parallelo	2 celle coperte	



*Come cambia la producibilità elettrica in funzione dell'inclinazione rispetto alla sorgente?*

Non è difficile immaginare che la corrente prodotta dalla cella solare sarà massima quando la cella è perpendicolare alla radiazione incidente (per tale ragione, negli impianti fotovoltaici installati sul terreno i pannelli solari vengono montati inclinati di circa 30° rispetto al suolo), mentre aumentando l'angolo formato dalla cella con la sorgente di luce la corrente diminuirà, perché in questo modo diminuisce la radiazione elettromagnetica che la colpisce. Potete divertirvi a misurare la corrente a circuito chiuso aumentando l'angolo di inclinazione della cella, con un passo di 15° alla volta, rispetto alla perpendicolare della sorgente (ad es. il Sole o una lampada da tavolo), compilando la tabella qui sotto. Con i dati ottenuti, potrete disegnare con *Excel* un grafico angolo-corrente, nonché aggiungere alla tabella una terza colonna con il calcolo del calo percentuale.

*Tabella 5. Effetto dell'inclinazione rispetto alla luce sulla produzione elettrica.*

<i>Angolo rispetto alla perpendicolare con la sorgente</i>	<i>Corrente</i>
0° (cioè puntata verso la sorgente)	
15°	
30°	
45°	
60°	
75°	
90°	

Infine, possiamo divertirci a studiare gli effetti su una cella prodotti dalla polvere, o magari anche da altri fattori (neve, inquinamento, etc.), o anche semplicemente del mettervi sopra un vetro (o una lastra di plexiglass) trasparente, che è il tipo di substrato che ricopre le celle in un pannello fotovoltaico. Mentre la polvere è facile da prodursi in maniera naturale o accelerata (ad es., soffiando in aria un po' di farina e aspettando che si depositi), possiamo sostituire la neve con del ghiaccio tritato e l'inquinamento industriale del cielo o la nebbia con del fumo di sigaretta più o meno concentrato. Come sempre, misureremo la variazione della corrente prodotta dalla cella solare a circuito chiuso al crescere graduale del fattore perturbante. Ormai dovrete essere in grado di creare da voi la necessaria tabella *Excel* in cui raccogliere i risultati delle misure.

*Domande per lo scienziato dilettante:* Provate a studiare con la semplice cella fotovoltaica i vari effetti che di solito influiscono sulla producibilità di un impianto fotovoltaico. Se lasciate la cella al suolo sotto il Sole dalle 6 di mattina fino alle 22 di sera, che curva ottenete per la corrente prodotta e da voi misurata ogni ora? E' diversa da quella ottenuta in laboratorio con una lampada? Analizzate il problema della lunghezza dei cavi elettrici fra la cella e il carico: quanto influisce sull'efficienza dell'intero sistema?

## L'USO DELLE CELLE SOLARI COME SENSORI △

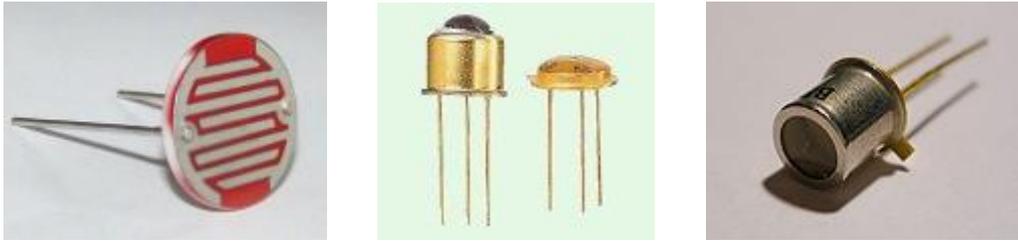
Nella rubrica "The Amateur Scientist" della famosa rivista *Scientific American*, tenuta per molti anni - a partire dal 1955 - dall'ingegnere elettronico C.L. Stong e poi sfociata in un suo libro di successo (*Lo scienziato dilettante*, Sansoni, 1961), venivano proposti numerosi sofisticati progetti che prevedevano l'utilizzo di celle solari come sensori di luce: ad esempio, un sismografo a torsione (un progetto oggi superato anche a livello amatoriale dai sismografi elettronici con altri tipi di sensori) e un apparato che permettesse a un telescopio l'inseguimento automatico della stella inquadrata (anche questo è superato da dispositivi più moderni). Ho raccontato ciò per sottolineare il grosso ruolo che le celle solari hanno avuto, e possono ancora avere, nel laboratorio dello scienziato dilettante, sia pure in altri tipi di apparati rispetto a quelli di cui abbiamo appena fatto cenno.

Le celle solari, ad esempio, possono essere usate per far suonare un campanello in un sistema di allarme, per aprire una porta, per far partire un motore, etc. Il sistema può venire progettato in modo da rispondere alla luce (magari attivando un relé che chiuderà il circuito, realizzando l'azione voluta: accensione di una luce, di un motore o quant'altro) oppure, al contrario, da essere sensibile alla sua rimozione (un po' come con le vecchie *fotocellule*, tubi a vuoto sensibili alla luce, tanto da essere stati usati - sotto forma di sofisticati *fotomotipicatori* - nei telescopi per la fotometria di corpi celesti, ma che ora non si usano quasi più). Un grande vantaggio delle celle solari rispetto ad altri tipi di sensori di luce è che con esse risulta piuttosto facile realizzare circuiti e progetti, che sono sostanzialmente di tipo elettrico, senza necessità di complesse nozioni di elettronica.



*Un vecchio fototubo. Simile a una valvola, questa cella fotoelettrica fa ormai parte della storia dell'elettronica.*

Naturalmente, le celle solari sono solo uno dei vari tipi di sensori di luce (cioè di radiazione elettromagnetica nella regione del *visibile*) presenti sul mercato, chiamati "fotorivelatori", e che comprendono anche: *fotodiodi*, diodi speciali (oppure *led*, più sensibili al colore che emettono) i quali possono operare in modalità fotovoltaica o fotoconduttiva; *fotoresistenze*, componenti basati su semiconduttori che diminuiscono la propria resistenza all'aumentare della quantità di luce, per cui sono un po' la versione moderna a stato solido dei vecchi fototubi a vuoto - cioè delle "celle fotoelettriche" - e sono impiegati in allarmi, illuminazione stradale, etc.; *fototransistor*, transistor sensibili alla luce (in genere, a quella infrarossa) più del fotodiodo, grazie all'effetto di guadagno del transistor; *sensori CCD*, usati nelle fotocamere e in astronomia, e adatti per catturare deboli immagini.



Tre comuni tipi di fotorivelatori: le fotoresistenze (a sinistra), i fotodiodi (al centro), i fototransistor (a destra).

Le celle solari *al silicio*, essendo basate sulla fisica dei semiconduttori *p-n*, sono sostanzialmente dei *fotodiodi* a giunzione *p-n*, solo con una vasta superficie sensibile alla luce (analogamente, fotodiodi e led si possono considerare delle celle solari in miniatura). Pertanto, oltre che per la produzione di energia, le celle solari possono essere usate in applicazioni simili a quelle per cui vengono impiegati i fotodiodi (con una risposta più lineare rispetto alle fotoresistenze): allarmi perimetrali, sensori antifumo, trasmissione di segnali, regolazione di luce, illuminazione stradale, etc. In genere, i vari tipi di fotorivelatori si differenziano per la porzione di spettro elettromagnetico che sono in grado di rivelare e per l'intensità luminosa minima che riescono a misurare, oltre che per il rapporto segnale/rumore e il tempo di risposta.

## UN SEMPLICE FOTOMETRO E UN FOTOCOLORIMETRO △

Un *fotometro* è un dispositivo che misura l'intensità della luce. Può essere quindi utile per vari esperimenti di uno scienziato dilettante ma anche per l'illuminotecnica, la fotografia, etc. In base alla propria abilità ci sono diversi tipi di fotometro che uno può autocostruirsi. Uno dei modi più semplici per realizzare un fotometro è quello di usare una cella solare e di misurare, al solito, la corrente che percorre il circuito chiuso. Naturalmente, se si vogliono misure assolute e non relative, occorre calibrare il fotometro con delle sorgenti di potenza nota. Certo, possiamo costruire un fotometro improvvisato oppure un apparato più curato, ma in ogni caso il divertimento è garantito.

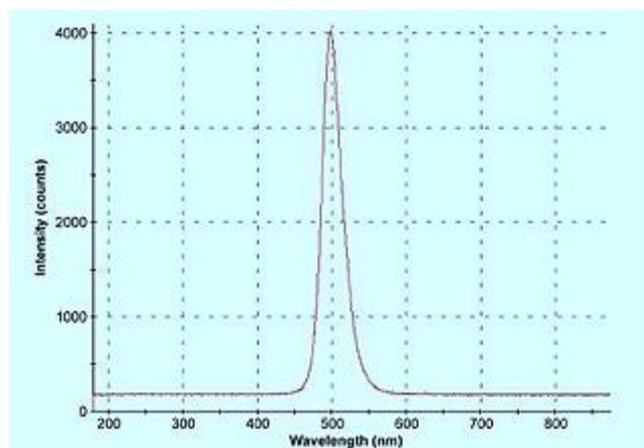
La sezione "Effetto della distanza e potenza della sorgente" può servire come spunto per la calibrazione del fotometro e l'uso per semplici esperimenti. Infatti, possiamo misurare la corrente elettrica che si produce illuminando la cella con varie lampadine di potenza (in watt) nota, ed interpolare/estrapolare i dati così ottenuti per misurare la quantità di luce da lampadine di potenza sconosciuta. Possiamo, ad esempio, tarare l'apparato usando tutte lampadine *a incandescenza* di diversa potenza e poi misurare la quantità di luce prodotta da lampadine *fluorescenti compatte*, da lampadine *alogeno*, etc.: è quella che ci aspetteremmo in base alla loro potenza nominale in watt? Misurate sempre la "luce bianca", cioè sull'intero spettro di frequenze della luce senza usare filtri, che esalterebbero le differenze di spettro esistenti fra tipi diversi di lampadine/sorgenti.



*Le comuni lampadine fluorescenti compatte hanno realmente la luminosità che dichiarano?*

Un *fotocolorimetro* è, invece, uno strumento che consente di determinare - o quanto meno confrontare - l'intensità della luce in specifiche componenti di colore, misurate una alla volta. Anche l'occhio umano è una sorta di colorimetro, ma se si vogliono confrontare le intensità dei vari colori di una sorgente di luce in modo quantitativo (ad es. se si vuole misurare l'intensità dei vari colori nello spettro di una lampada a incandescenza e, per confronto, nella luce riflessa da un foglio bianco illuminato con la stessa lampada) occorre usare un fotorivelatore e dei filtri, come nell'esperienza "Effetti della lunghezza d'onda della luce". Il fotocolorimetro può essere impiegato anche per misurare l'assorbimento di particolari lunghezze d'onda della luce da parte di una soluzione: ciò permette di determinare la concentrazione di un soluto noto in una data soluzione.

Per calibrare lo strumento, illuminate con la luce solare (in quanto sorgente di cui è noto lo spettro, cioè l'intensità nei vari colori) una cella solare su cui è posto un foglio trasparente colorato (ad es. rosso, giallo, verde, blu, etc.), dopodiché misurate la corrente della cella per quel determinato colore. Ripetete l'operazione con filtri di vari colori. Ora avete calibrato i rapporti fra le varie bande di colore per la luce bianca solare, che vi serviranno come riferimento per analizzare, terminata la calibrazione, un'eventuale luce "incognita". Potreste fare la calibrazione in modo all'apparenza migliore usando led colorati ad alta luminosità (in particolare, con i tre colori fondamentali del sistema RGB: rosso, verde, blu), ma in tal caso alcuni colori verrebbero misurati in modo non corretto poiché i led producono solo singoli colori (*vedi la figura qui sotto*), non bande di colore.



*Alcuni led colorati e (a destra) lo spettro di emissione di un led. Si noti come i led emettano in una ristretta banda di colore dello spettro.*

*Domande per lo scienziato dilettante: Se, oltre alla quantità di luce delle lampadine di taratura, misurate quella di una candela, potete esprimere la luminosità delle stesse in unità "candele"? L'uscita del vostro fotometro è lineare, cioè se raddoppia la quantità di luce della sorgente raddoppia anche la corrente misurata? Se qualcuno vi illumina il fotometro con tre diodi (rosso, verde, blu) ma senza mostrarvi in che sequenza, misurando ogni volta la corrente con vari filtri sapete dire, alla fine, quale sequenza ha usato?*

## COME COSTRUIRE UN DENSITOMETRO DA LABORATORIO △

Un *densitometro a trasmissione* è un dispositivo che misura la densità ottica di un materiale semitrasparente. Fondamentalmente, è composto da una sorgente di luce diretta verso un sensore di luce, quale ad es. una cellula fotoelettrica o un fotodiode, con il campione da analizzare posto fra sorgente e sensore, e misura la densità del campione attraverso la differenza nelle letture. Noi possiamo tranquillamente utilizzare come sensore di luce una cella solare, in modo simile a quanto fatto per il fotometro.

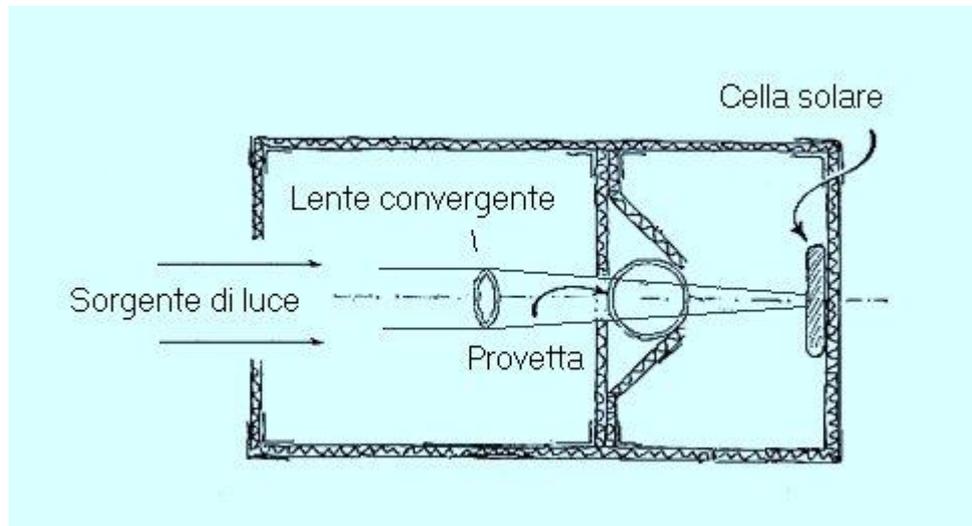
Un densitometro può essere utile, per lo scienziato dilettante, in numerosi esperimenti di biologia, ma il principale è, senza dubbio, quello dello studio quantitativo delle colture batteriche. Si dà il caso, infatti, che lo sviluppo di colonie batteriche (con il moltiplicarsi dei batteri, mentre alcuni muoiono) all'interno di un brodo di coltura tenda ad aumentare la torbidità di quest'ultimo, e quindi a ridurre la sua trasparenza. Poniamo quindi, ad es., di voler studiare come la crescita di colonie di batteri all'interno di una provetta contenente un brodo di coltura sia inibita dall'uso di un particolare antibiotico o di diversi tipi. In realtà, useremo due provette: in una aggiungeremo l'antibiotico e nell'altra no, per misurare le differenze. Per entrambe effettueremo a intervalli di tempo precisi una misura della torbidità - e quindi del grado di sviluppo delle colonie - con il densitometro.



*Un esempio di coltura batterica. Si nota la presenza di numerose colonie di batteri diversi.*

In effetti, la stima delle popolazioni batteriche può essere effettuata principalmente in due modi che permettono di misurarne la concentrazione. Il primo è il conteggio statistico dei batteri coltivati nel brodo di coltura posto in una capsula di Petri, che dà informazioni sui soli batteri vivi e che si effettua

attraverso una procedura di diluizione e di conteggio abbastanza complessa e laboriosa. Il secondo metodo è la misura della densità ottica di sospensioni batteriche con l'aiuto di un densitometro a trasmissione. Il densitometro fornisce informazioni sia sui batteri vivi che su quelli morti, per cui in teoria è più utile per monitorare in dettaglio le prime fasi di sviluppo della colonia, ma uno strumento amatoriale non è sensibile a popolazioni di batteri inferiori a 10 milioni di cellule/ml. Può essere quindi interessante confrontare fra loro i grafici delle misure ottenute con i due metodi.



*Schema di un densitometro autocostruito. In alternativa, si può non usare la lente e inserire un foglio di carta fra provetta e cella.*

L'apparato che forma il densitometro a trasmissione autocostruito consiste di una lampada e di una lente che serve a focalizzare il suo raggio di luce nella direzione della provetta. Dalla parte opposta della provetta viene poi sistemata la cella solare che riceve, in sostanza, quella porzione della luce inviata alla provetta dalla lampada e che riesce ad attraversare la provetta stessa, vincendo l'opacità che può esservi prodotta. Un microamperometro (in pratica, un tester) va collegato in serie alla cella solare e al carico allo scopo di fornire una misura esatta della corrente prodotta dalla luce. È possibile quindi tracciare una sorta di diagramma della variazione della torbidità in funzione del trascorrere del tempo e, al termine dei rilevamenti, si avrà una curva indicante - nel nostro esempio di esperimento - l'attività batteriostatica dell'antibiotico.

*Tabella 6. Effetto della distanza sulla produzione elettrica.*

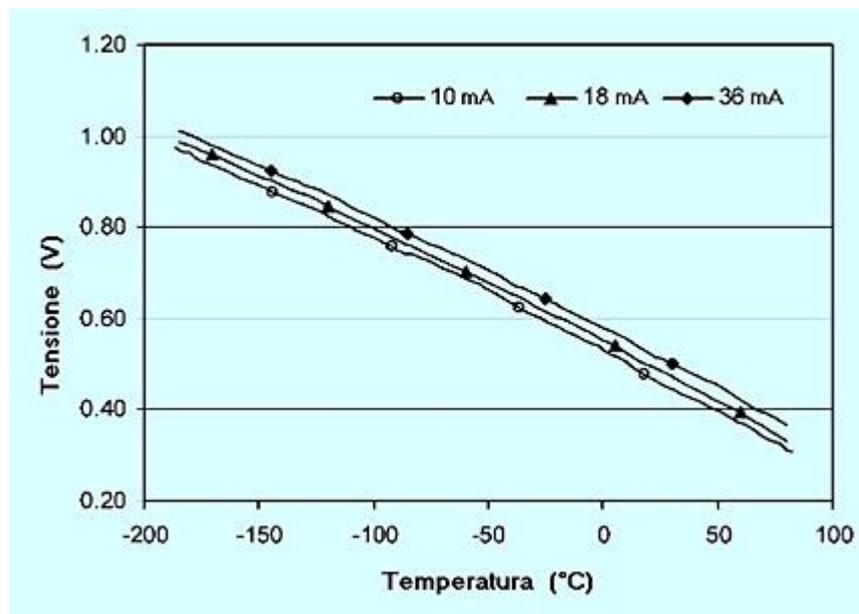
<i>Distanza</i>	<i>Corrente</i>
Senza colonie batteriche	
Dopo X ore dalla coltivazione	
Dopo 2X ore	
Dopo 3X ore	
Dopo 4X ore	

*Domande per lo scienziato dilettante:* Provate a usare più provette e ad aggiungere a ognuna una diversa concentrazione di antibiotico per vedere le differenze negli effetti. Cosa succede se si usano antibiotici di tipo diverso? Se coltivate solo una specie di batteri, essa può subire delle mutazioni sino a diventare resistente all'azione dell'antibiotico, che magari in partenza aveva su di essa conseguenze letali: siete in grado di "osservare" questo fenomeno con l'apparato e la procedura appena descritti?

## UN ORIGINALE MISURATORE DI TEMPERATURA △

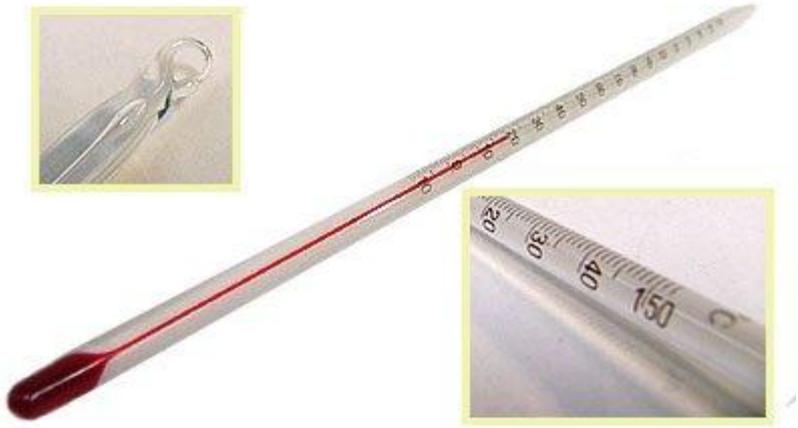
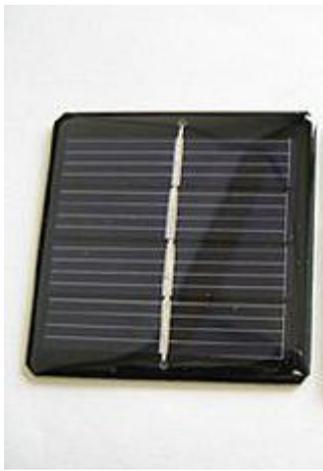
Le celle solari (e dunque anche i pannelli fotovoltaici) sono abbastanza sensibili alla temperatura, che ne influenza l'efficienza di conversione della luce in elettricità. Pertanto, sebbene esistano molti altri sistemi utilizzabili da un dilettante per la misura della temperatura, possiamo sfruttare questo effetto per usare una cella solare come accurato sensore di temperatura su un ampio intervallo di temperature e, previa una nostra taratura sperimentale dell'apparato, come *termometro elettronico* (ad es. per monitorare in tempo reale un esperimento, acquisendo i dati con il tester o direttamente con un PC dotato di scheda ADC, cioè di un convertitore analogico-digitale).

Per dare un'idea quantitativa del fenomeno, si consideri che la tensione a circuito aperto di una cella al silicio varia di circa  $2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ , il che fra l'altro può portare a un rilevante cambiamento delle caratteristiche operative della cella a cominciare dalla sua efficienza (se l'aumento di temperatura della cella è elevato, la potenza elettrica fornita si riduce notevolmente), il che permette, in linea di principio, di usare una cella di un pannello fotovoltaico come sensore di temperatura del pannello. Se la temperatura della cella diminuisce, la corrente a circuito chiuso rimane sostanzialmente costante, ma la tensione a circuito aperto ( $V_{OC}$ ) aumenta. La riduzione dell'irraggiamento della cella da, ad es.,  $1000 \text{ W/m}^2$  a  $100 \text{ W/m}^2$  produce una variazione inferiore di  $V_{OC}$  (sia pure inferiore al 5%), ma possiamo trascurare tale effetto se l'illuminazione della cella è costante.



*Un esempio di risposta Tensione-Temperatura di una cella solare (misurata sulla stessa cella per tre valori diversi di corrente).*

Per misurare l'effetto della temperatura sull'efficienza di una cella solare, dobbiamo fare un tipo di collegamento e di misura diversi da quelli impiegati nei precedenti esperimenti. Infatti, questa volta occorre misurare la tensione ai capi della cella a circuito aperto. Pertanto, useremo il tester come voltmetro e collegheremo il cavo rosso del voltmetro al polo positivo (cioè al cavo rosso) della cella, e il cavo nero al polo negativo. Dopodiché occorre porre un termometro accanto alla cella, in modo che sia riscaldato dalla sorgente allo stesso modo di quest'ultima. Possiamo usare un comune termometro, ad es. al mercurio, meglio se da laboratorio per la sua graduazione più fine. Il coefficiente termico per i pannelli fotovoltaici mono- o policristallini è dello  $0,5\% / ^\circ\text{C}$ , cioè l'efficienza del pannello cala del 5% ogni  $10^\circ\text{C}$  di temperatura più alta o bassa di quella standard di  $25^\circ\text{C}$ .



*La nostra cella solare e (a destra) un preciso termometro ad alcool da laboratorio, con tacche da 1° C ciascuna.*

La procedura di raccolta delle misure è piuttosto semplice. Misuriamo il voltaggio della cella alla temperatura ambiente della stanza o alla temperatura esterna e registriamo i valori di tensione e temperatura su una tabella come quella qui sotto. Dopodiché, lasciamo la cella per un certo tempo sotto il Sole o una lampada, in modo che si riscaldi. Annotiamo i nuovi valori. Per raggiungere una temperatura più alta, riscaldiamo contemporaneamente cella e termometro con un phon per 15 secondi. Dopo aver registrato le nuove misure, ripetiamo la procedura riscaldando per 30 secondi, e dopo le ennesime misure ancora per un minuto (ovviamente bisogna essere veloci nel leggere il più possibile in maniera simultanea i valori di temperatura e tensione). Infine, riportiamo tutti i dati su un grafico *temperatura-tensione* per ricavare la curva sperimentale cercata.

*Tabella 7. Effetto della temperatura della cella sulla produzione elettrica.*

<i>Condizioni di misura</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Tensione</i>
A temperatura ambiente e all'ombra		
Piena luce calda del Sole		
Dopo un riscaldamento di 15 secondi		
Dopo un riscaldamento di 30 secondi		
Dopo un riscaldamento di 1 minuto		

*Domande per lo scienziato dilettante:* Per valutare in maniera empirica gli errori sperimentali, ripetete altre due volte l'identica sequenza di tutte le misurazioni: i nuovi valori ottenuti quanto si discostano dai precedenti? Come e di quanto variano i risultati se non ci preoccupiamo di tenere costante l'illuminazione della cella? Nell'arco della giornata misurate la temperatura esterna con l'apparato tarato nel modo da noi descritto e ricavate un grafico della temperatura nel tempo: quanto risulta sensibile il termometro elettronico?

## UN PANNELLO A CONCENTRAZIONE IN MINIATURA △

Se il vostro scopo è quello di divertirvi più che di produrre elettricità, potete provare a realizzare un *pannello fotovoltaico a concentrazione* in miniatura, o meglio il "mattoncino base" di un pannello a concentrazione in scala 1:1, e che in un singolo pannello reale è presente in decine di unità. Nei pannelli a concentrazione si usa un dispositivo ottico (tipicamente una lente oppure uno specchio quasi

parabolico) per concentrare la luce su una piccola cella solare al silicio, in modo da risparmiare sul silicio cristallino, che è molto costoso. In realtà, nei veri pannelli a concentrazione - o comunque per concentrazioni della luce solare superiori a 10 X - si usano celle solari *multigiunzione*, che resistono (e producono più corrente) alle alte temperature, ma noi possiamo tranquillamente usare una normale cella al silicio mono- o policristallino: al massimo la bruceremo!

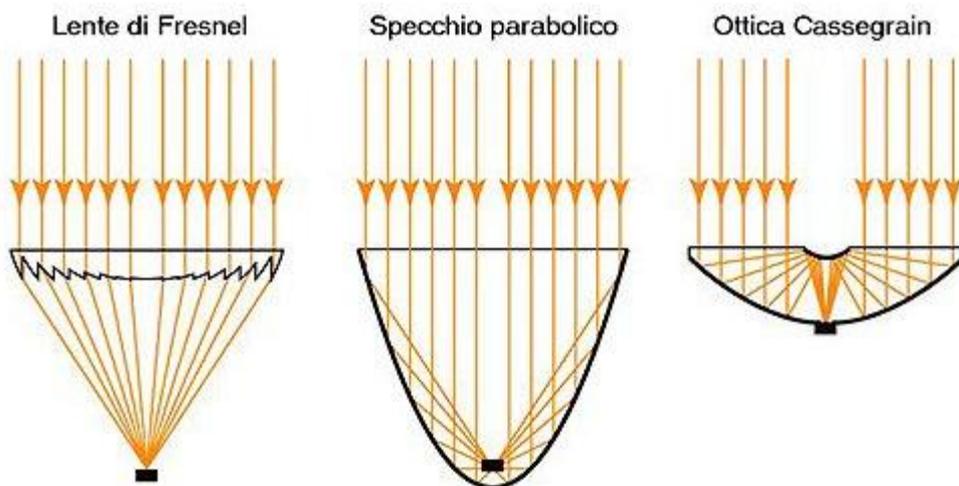


*Un pannello a concentrazione con ottica a specchi e la sua unità fondamentale.*

Un'esperienza realizzabile potrà essere quella di misurare l'aumento di corrente prodotta a circuito chiuso da una cella solare concentrando sopra la luce solare con una lente di ingrandimento. Naturalmente, scelta la distanza a cui vogliamo collocare la lente fra la cella e la sorgente (Sole o lampada da tavolo), dobbiamo coprire la cella con un cartoncino in cui praticheremo un foro di dimensioni pari a quelle del cerchio di luce concentrata che la lente produrrà chiaramente sulla cella: in questo modo, potremo misurare realmente quanto è l'aumento di producibilità elettrica di una determinata superficie fotovoltaica se vi concentriamo la luce di un ben preciso fattore "X". Un secondo livello di analisi potrà consistere nello studiare come aumenta la producibilità elettrica della cella (in pratica, la solita corrente) al variare del fattore di concentrazione della luce.

Il *fattore di concentrazione* della luce solare dipende dal rapporto fra la superficie di lente o di specchio utilizzata per concentrare i raggi solari e la superficie fotovoltaica realmente usata per produrre elettricità. Per stimare in maniera grossolana il fattore di concentrazione, quindi, misuriamo l'area della lente o dello specchio: se ad es. lo specchio ha un diametro di 10 cm, la sua area sarà "(raggio)<sup>2</sup> X pigreco", cioè  $5^2 \times 3,14 = 78 \text{ cm}^2$  circa. Se la superficie di cella solare su cui la luce viene concentrata è di  $1 \text{ cm}^2$ , il fattore di concentrazione è dato dalla formula  $\text{AREA}_{\text{superficie di raccolta della luce}} / \text{AREA}_{\text{superficie fotovoltaica utilizzata}} = 78 / 1 = 78$ , cioè il fattore di concentrazione è di circa "80 X", come si dice in gergo. Naturalmente, poiché la superficie della cella ostruisce parte della parabola, dovremo sottrarre tale area nel calcolo dell'area dello specchio.

Se vogliamo realizzare una struttura permanente, può risultare più semplice concentrare la luce con uno specchio parabolico anziché con una lente. Di solito, nei pannelli reali si usa un'ottica di tipo *Cassegrain*, per cui uno specchio posto nel fuoco della parabola devia i raggi verso una cella posta dietro la parabola stessa. Noi, però, possiamo mettere la cella nel fuoco (troveremo la distanza ideale variandola e misurando la corrente prodotta), rivolta verso la parabola. Lo specchio parabolico può essere realizzato con della carta stagnola (con il suo lato più riflettente, usandone più strati o con l'aiusilio di un substrato di supporto), modellandola fino a darle una forma parabolica.



*Il percorso della luce quando usiamo una lente (normale o di Fresnel) o uno specchio parabolico (normale o con ottica Cassegrain).*

Naturalmente, va sottolineato che nel realizzare questa esperienza occorre usare, a un certo punto, una particolare attenzione. Infatti, nel fuoco della lente o dello specchio parabolico utilizzati la luce solare è concentrata a sufficienza da poter provocare ustioni, se pensiamo che già con una lente di ingrandimento di pochi centimetri di diametro è possibile dar fuoco facilmente a un foglio di carta. Dunque, bisogna tenere *alla larga* dita o altre parti del corpo dalla luce concentrata. Per lo stesso motivo, sconsigliamo di utilizzare o realizzare ottiche a concentrazione superiori a un diametro di 10 cm, a meno che realizzate l'esperienza con la supervisione di un adulto.

## UN PANNELLO FOTOVOLTAICO AUTOCOSTRUITO △

Gli appassionati del fai-da-te possono divertirsi a realizzare, nel tempo libero, un pannello fotovoltaico partendo dai suoi costituenti primi, facilmente reperibili sul mercato. Il risultato sarà un pannello certamente più economico di quelli in commercio. In linea di principio è possibile autocostruirsi vari pannelli, realizzando un impianto da 1 o 2 kW<sub>p</sub>, tuttavia lo svantaggio di quest'approccio è che non si può beneficiare degli incentivi statali e del collegamento in rete per lo "scambio sul posto" o la vendita dell'energia. Quindi, può essere una buona idea per gli impianti *stand-alone* di abitazioni isolate o per avere una piccola fonte di energia di emergenza o per usi particolari. L'autocostruzione di un pannello fotovoltaico richiede, sostanzialmente, i seguenti passi: (1) Procurarsi il materiale necessario (vedi, in proposito, l'elenco nella tabella qui sotto e una stima del loro costo relativo); (2) Realizzazione della struttura per alloggiare le celle; (3) Montaggio delle celle al suo interno; (4) Collegamento elettrico delle celle.

*Tabella 8. Il materiale necessario per l'autocostruzione di un pannello fotovoltaico.*

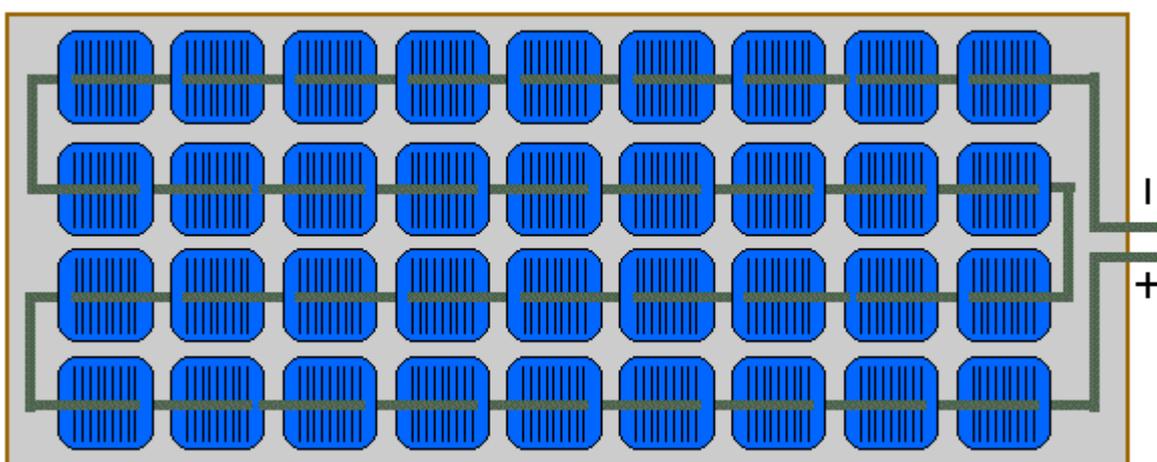
Componente	Quantità	Prezzo 2011
Celle policristalline 1,75 W da 3 x 6 pollici	40 pz	95,0 €
Lastra di plexiglass	1	25,0 €
Lastra di compensato + cornice	1	15,0 €
Colla al silicone	1	2,0 €
Flussante	100 ml	10,0 €
Strisce di ribbon	1 mt	1,5 €
Cavetteria	3 mt	1,5 €

Viti in ottone	10	1,0 €
Connettore bipolare	1	1,0 €
Vernice e pennello	1	3,0 €
<b>Stima spesa totale</b>		<b>155,0 € + IVA</b>



Da sinistra a destra: le strisce di ribbon, le celle solari, il flussante.

Prima di poter autocostruire un pannello fotovoltaico, occorre capire come è fatto. Essenzialmente, un pannello è un modulo sigillato formato da tre strati: un supporto opaco, uno strato di celle fotovoltaiche e un vetro protettivo. Lo strato di celle solari è composto da singole celle connesse fra loro quasi sempre in serie per aumentare il voltaggio complessivo, che viene scelto in modo da essere sui 15V, compatibile con una batteria a 12 V: una singola cella al silicio ha un voltaggio inferiore a 0,6 V (a 25°C e con irraggiamento solare standard), per cui la maggior parte dei pannelli fotovoltaici sono composti da 36 celle in serie. Ciò corrisponde a una tensione a circuito aperto di 21 V in condizioni standard e ad una tensione massima in condizioni operative - cioè a circuito chiuso con dei carichi - di circa 17 V. La quantità di corrente prodotta da un pannello dipende, invece, dalle dimensioni delle celle e dalla loro efficienza: con un'inclinazione ideale del pannello, in condizioni standard è di 30-36 mA/cm<sup>2</sup>.



Un tipico pannello fotovoltaico composto da 36 celle solari collegate in serie fra loro.

## COME LO SI REALIZZA IN PRATICA △

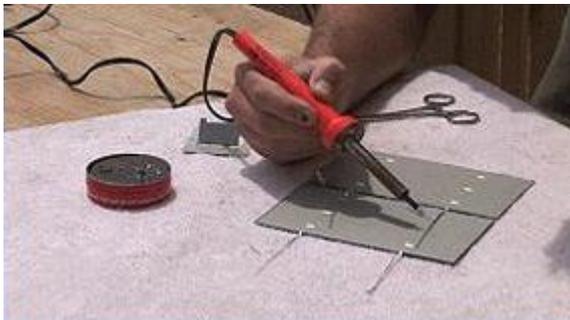
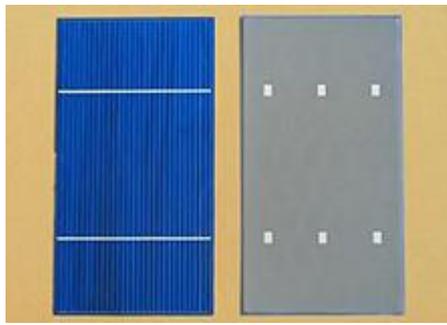
Iniziate verificando la lunghezza dei 4 pezzi di legno che devono fungere da bordi - in pratica, da cornice - per lo spazio che alloggerà le celle, ed eventualmente tagliateli opportunamente o limateli

quel tanto che basta se sono troppo lunghi. Dopodiché, incollateli e successivamente avvitateli al pannello di compensato. Create così un alloggiamento poco profondo, altrimenti si potrebbero formare ombreggiamenti sulle celle da parte della cornice quando il Sole è angolato rispetto al pannello. Create dei piccoli buchi ai bordi dell'alloggiamento (sul retro del pannello, naturalmente, altrimenti vi entrerà la pioggia): essi permetteranno alla pressione dell'aria presente dentro il pannello di mantenersi identica a quella esterna e di far andar via l'eventuale umidità che tendesse a formarsi. Verniciate la parte esterna del pannello con una vernice del tipo usato per le barche, in grado di proteggere il legno dagli agenti atmosferici, dopodiché lasciate asciugare e passate una seconda mano di vernice.



*La fase di realizzazione e verniciatura della struttura in legno con cornice che alloggerà le celle solari.*

Disegnate con la matita una griglia sulla struttura stessa del pannello, in modo da avere un'idea di dove collocare ciascuna delle 36 celle e da assicurarvi che vi sia un po' di spazio fra una cella e l'altra. Occorre poi collegare elettricamente in serie fra loro le celle fotovoltaiche, cioè collegare il polo positivo dell'una con il polo negativo dell'altra. In pratica, per unire le varie celle occorre usare delle strisce conduttrici di ribbon larghe 3 mm (si vendono in rotoli da 1 mt) e saldarle alle celle stesse. Per una corretta saldatura tra le celle e le strisce di ribbon, occorre stendere un leggero strato di "flussante" (venduto in flaconi da 100 ml) sopra le strisce, attendere che asciughi e procedere alla saldatura. Inserite le celle nei punti prima trovati e attaccatele al pannello con della colla al silicone. Maneggiare e saldare le celle può risultare più difficile del previsto, perché sono fragilissime, perciò se vi fate sopra pressione si possono facilmente rompere (dunque, occorre averne qualcuna di riserva).



*La fase del collegamento elettrico delle varie celle fra loro, operazione effettuata con l'ausilio di un saldatore.*

Eccoci arrivati alla parte conclusiva del nostro lavoro. Innanzitutto, è necessario fare un buco sul retro del pannello per permettere ai due cavi elettrici provenienti dalla prima e dall'ultima cella fotovoltaica del pannello solare di uscire da esso. Si consiglia di usare, come due fili, un cavetto rosso per il polo positivo e uno nero per quello negativo. A questo punto si procede con l'effettuare un nodo ai fili all'interno e all'esterno del buco in questione, in modo che possano resistere a qualsiasi stress meccanico. Inoltre, li si ancora alla struttura del pannello e si tappa il buco con un po' di colla al silicone. Il passo successivo è collegare i due fili in uscita dal pannello a un connettore bipolare maschio adatto al collegamento con il regolatore di carica. Infine, occorre verificare con un tester che il pannello produca energia (in pratica, si misurerà la tensione a circuito aperto) e, se tutto risulta a posto, si ricopre il pannello con il plexiglass, incollandolo alla struttura lungo i bordi con la colla al silicone sigillante.



*Il risultato finale: un pannello fotovoltaico in grado di alimentare una lampadina o altri carichi di uso comune, oppure di caricare una batteria.*

## BIBLIOGRAFIA

### **Approfondimenti:**

Nell'articolo abbiamo affrontato il tema del fotovoltaico soprattutto dal punto di vista scientifico, proponendo i principali esperimenti che si possono svolgere su questo versante. Ma sono interessanti anche gli aspetti tecnologici del fotovoltaico, da cui dipende la sua futura diffusione di massa o meno. Oggi, nei laboratori di università e aziende dei Paesi più avanzati si sta lavorando a numerose tecnologie completamente innovative che faranno presto irrompere il fotovoltaico nella nostra vita quotidiana: celle fotovoltaiche *organiche* (cioè basate sul carbonio anziché sul silicio) in grado di funzionare molto bene anche con le deboli luci artificiali, pannelli fotovoltaici *a concentrazione* (ne abbiamo fatto un rapido cenno), vetri fotovoltaici *a concentrazione luminescente*, pannelli fotovoltaici *cilindrici*, solo per citarne alcune. Potrete trovare un'ampia e dettagliata panoramica di queste tecnologie emergenti - e magari trarre spunto per dei nuovi esperimenti - nel sito italiano [Consulente Energia](http://www.consulenteenergia.it), dedicato soprattutto al fotovoltaico e al risparmio energetico.

### **Libri:**

Ed Sobey, *Solar Cell and Renewable Energy Experiments*, Enslow Publishers, 2011.  
Christine Taylor-Butler, *Junior Scientists: Experiment with Solar Energy*, Cherry Lake Publisher, 2010.  
Christine Taylor-Butler, *Solar Energy: Super Cool Science Experiments*, 2009.  
Gavin Harper, *Solar Energy Projects for the Evil Genius*, McGraw Hill, 2007.  
Anne Hillerman, Mina Yamashita, *Done in the Sun: Solar Projects for the Children*, Sunstone Press, 1983.

### **Ricerche in Internet:**

celle solari, kit solare, giochi solari, effetto fotovoltaico, fotorivelatori, fotometri, fotocolorimetro, densitometro a trasmissione, spettro lampade solar cells, solar kits, solar toys, photovoltaic effect, photodetectors, photometers, photocolorimeter, transmission densitometer, lamps spectrum

---

**Mario Menichella**, fisico, divulgatore scientifico e ideatore del laboratorio itinerante interdisciplinare *SbalordiScienza*, è disponibile a compiere - su richiesta - spettacoli per il grande pubblico, come pure lezioni e/o dimostrazioni presso scuole, musei ed altri organismi interessati. Per avere maggiori informazioni, visitate il suo sito: <http://www.sbalordiscienza.it>.