



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile

DIISM – Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

---

DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DEI PARAMETRI DI  
CORREZIONE DELLE CURVE CORRENTE TENSIONE DI  
MODULI FOTOVOLTAICI MEDIANTE L'ESECUZIONE DI FLASH  
TEST CON SIMULATORE SOLARE

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF I-V CURVES  
CORRECTION PARAMETERS OF PHOTOVOLTAIC MODULES  
BY PERFORMING FLASH TESTS WITH A SOLAR SIMULATOR

---

**Relatore:**

Prof. Giovanni Di Nicola

**Correlatore:**

Ing. Gianluca Coccia

**Tesi di Laurea di:**

Madalin Remus Cocilnau

Anno accademico 2019/2020

# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	1
<b>1. PROBLEMATICHE AMBIENTALI</b> .....	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>
1.1. Problemi causati dalle energie non rinnovabili .....	4
1.2. Accordi internazionali ed europei .....	7
1.2.1. Accordo di Rio 1992 .....	7
1.2.2. Protocollo di Kyoto 1997 .....	7
1.2.3. Conferenza di Ciancun 2010 .....	8
1.2.4. Accordo di Parigi 2015.....	8
1.3. Lo sviluppo sostenibile .....	9
1.4. Fonti di energia sostenibile .....	10
1.4.1. Energia solare .....	12
1.4.2. Energia idroelettrica .....	13
1.4.3. Energia eolica .....	13
1.4.4. Energia della Biomasse .....	14
1.4.5. Energia marina.....	15
<b>2. L'ENERGIA FOTOVOLTAICA</b> .....	16
2.1. Storia del fotovoltaico in breve .....	16
2.2. Generalità sui moduli fotovoltaici.....	17
2.3. L'effetto fotovoltaico .....	17
2.4. Caratteristiche e funzionamento della cella fotovoltaica .....	26
2.5. Curva caratteristica I-V di una cella solare e relativi parametri.....	28
2.6. Tipologie di moduli fotovoltaici in silicio .....	30
2.7. La struttura di un modulo fotovoltaico.....	32
2.8. Norma CEI EN 60891 .....	33
<b>3. SIMULATORE SOLARE DI PROVA</b> .....	40
3.1. Funzionamento di un simulatore solare .....	40
3.2. Il simulatore solare Berger Lichttechnik PSS8 .....	41
3.3. Componenti del simulatore e il loro collegamento .....	43
<b>4. PROVE SPERIMENTALI EFFETTUATE</b> .....	49
4.1. Moduli fotovoltaici su cui si sono svolte le prove .....	49
4.2. Prove per controllare la funzionalità dei moduli fotovoltaici .....	51

4.3. Procedura per determinazione del parametro $a$ e $R's$ .....	55
4.4 Procedura per la determinazione del parametro $k'$ .....	57
<b>5. RISULTATI DEI TEST SPERIMENTALI</b> .....	<b>60</b>
5.1. Valori sperimentali $a$ e $R's$ ottenuti dalle prove.....	60
5.2 Valori sperimentali $k'$ ottenuti dalle prove.....	65
<b>6. CONCLUSIONI</b> .....	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>71</b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1- Rapporto 2018 emissioni gas effetto serra per tipo e fonte [1] .....	6
Figura 2-Accordo di Parigi 2015 cartina geografica dei paesi firmatari [2]. .....	9
Figura 3 - Rappresentazione percentuale di energia da fonti rinnovabile nel 2018 in EU e quota percentuale con l'obiettivo per il 2020 [3]......	11
Figura 4 - Esempio di impianto fotovoltaico installato per la produzione elettrica di una casa [5]......	12
Figura 5- Esempio di un impianto solare termico installato su un tetto di una casa [4]. .....	12
Figura 6 - Schema di una centrale idroelettrica [6]......	13
Figura 7 - Schema e componenti di un impianto eolico [7]......	14
Figura 8 - Rappresentazione del "flusso di elettroni" in un filo conduttore sottoposto a una differenza di potenziale (generatore di tensione) [7]. .....	18
Figura 9 - Spetto delle radiazioni elettromagnetiche [9]......	19
Figura 10 - - Rappresentazione grafica dell'orbite delocalizzato e della banda continua [9].	20
Figura 11- Raffigurazione grafica della distanza tra la banda di valenza e quella di conduzione: nei conduttori (metalli) le due bande sono attaccate, mentre nei semiconduttori e isolanti le bande sono caratterizzate da un "gap" [10]. .....	21
Figura 12- Estratto tavola periodica che illustra gli elementi del III e del V gruppo [12]. ....	23
Figura 13- drogaggio di tipo p [13]......	23
Figura 14- drogaggio di tipo n [13]......	23
Figura 15- Rappresentazione grafica di una giunzione p-n [14]. .....	24
Figura 16 - Rappresentazione effetto fotovoltaico su una cella [15]. .....	25
Figura 17- Generatore di corrente equivalente della cella fotovoltaica [16]......	26
Figura 18 - Curva caratteristica corrente-tensione di una cella fotovoltaica [17]. .....	28
Figura 19- Effetto della temperatura sulla caratteristica I-V di una cella fotovoltaica [18].	29
Figura 20- Effetto della riduzione della radiazione incidente sulla caratteristica I-V di una cella [18]. .....	30
Figura 21- Rappresentazione delle fasi della lavorazione del silicio [19] .....	31
Figura 22- Celle in silicio monocristallino, policristallino e amorfo [20]. .....	32
Figura 23 - Struttura di un modulo fotovoltaico [21]......	33
Figura 24 - Determinazione del fattore di correzione di irraggiamento (a) e resistenza serie interna (R'S): a) Caratteristiche I-V misurate ad irraggiamenti differenti e temperatura costante; b) Caratteristiche I-V corrette in $a = 0$ e $R'S = 0 \Omega$ ; c) Caratteristiche.....	38
Figura 25 - Determinazione del fattore di correzione della curva $k'$ : a) Caratteristiche I-V misurate a diverse temperature del dispositivo; b) Caratteristiche I-V corrette in temperatura con $k' = 0 \Omega/K/K$ ; c) Caratteristiche I-V corrette con $k' =$ ottimale.....	39
Figura 26 - curva restituita dal software PSL8.....	41
Figura 27 - Rappresentazione schematica del simulatore solare Berger Lichttechnik PSS8.	42
Figura 28 - Lampada allo Xenon del simulatore di prova.....	43
Figura 29 - Generatore di potenza del simulatore .....	44
Figura 30 - Carico del simulatore a cui deve essere collegati i connettori del modulo FV e i seguenti dispositivi: Sensore IR (infrarossi), Cella di riferimento, Pt100 (rilevatore di temperature) e Computer.....	45
Figura 31 - Rilevatore di temperatura: sonda Pt100 .....	45
Figura 32 - Cella di riferimento usata dal simulatore solare .....	46
Figura 33 - Torre verticale dove viene emesso il flash contro il modulo FV.....	47
Figura 34 - finestra generica del software da calibrare, in questo caso devono essere indicati i parametri del modulo: area celle, numero di celle in serie.....	48
Figura 35 - Scheda tecnica dei moduli fotovoltaici impiegati nelle prove sperimentali .....	50

Figura 36 - Estratto file csv restituito dal software dopo il flash, riportante le coordinate dei punti delle curve I-V non corrette (U_mes e I_mes) e corrette (U_L).....	51
Figura 37 - - File restituito dal software PSL8 dopo ogni impulso; viene riportata la curva alle condizioni operative di prova (OPC) e quella traslata alle condizioni STC.....	52
Figura 38 - Rappresentazione banco di prova con il modulo fotovoltaico e cella di riferimento ricoperti con la carta da lucido .....	56
Figura 39 - Stufa elettrica usata per alzare la temperatura nella torre.....	58
Figura 40 - Curve I-V ottenute dai dati sperimentali: a) caratteristiche I-V ad irraggiamenti differenti e temperatura costante; b) curve I-V corrette in $a = 0$ e $R's = 0 \Omega$ c) curve I - V in $a =$ ottimale e $R's = 0 \Omega$ ; d) curve I-V corrette in $a =$ ottimale e $R's =$ ottimale.....	60
Figura 41- Curve sperimentali I-V modulo ASAS31409.....	61
Figura 42 - Curve sperimentali I-V modulo ASAS31411.....	62
Figura 43 - Curve sperimentali I-V modulo ASAS31412.....	63
Figura 44 - - Curve sperimentali I-V modulo ASAS31413 .....	64
Figura 45- Curve I-V ottenute dai dati sperimentali: a) caratteristiche I-V misurate a diverse temperature dal dispositivo.; b) caratteristica I-V corrette in temperatura con $k' = 0$ ohm/K; c) caratteristiche I-V con $k' =$ ottimale. ....	66
Figura 46 – Curve I-V ottenute dai dati sperimentali del modulo AS31409. ....	66
Figura 47 - Curve I-V ottenute dai dati sperimentali del modulo AS31411 .....	67
Figura 48 - Curve I-V ottenute dai dati sperimentali del modulo AS31412 .....	68
Figura 49 - Curve I-V ottenute dai dati sperimentali del modulo AS31413 .....	68

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1- Tabella con i valori del gap di energia fra la banda di valenza e conduzione di alcuni materiali semiconduttori a temperatura ambiente (300 K).....	22
Tabella 2 - Modulo fotovoltaico AS31408 .....	52
Tabella 3 - Modulo fotovoltaico AS31409 .....	53
Tabella 4 - Modulo fotovoltaico AS31411 .....	53
Tabella 5 - Modulo fotovoltaico AS31412 .....	54
Tabella 6 - Modulo fotovoltaico AS31413 .....	54
Tabella 7 - Variazione irraggiamenti modulo fotovoltaico AS341408.....	56
Tabella 8 - Variazione irraggiamenti modulo fotovoltaico AS341409.....	56
Tabella 9 - Variazione irraggiamenti modulo fotovoltaico .....	57
Tabella 10 - Variazione irraggiamenti modulo fotovoltaico .....	57
Tabella 11 - Variazione irraggiamenti modulo fotovoltaico AS341409.....	57
Tabella 12 - Valori variazione temperatura modulo AS31408 .....	58
Tabella 13- Valori variazione temperatura modulo AS31409 .....	59
Tabella 14 - Valori variazione temperatura modulo AS31411 .....	59
Tabella 15 - Valori variazione temperatura modulo AS31409 .....	59
Tabella 16- Valori variazione temperatura modulo AS31409 .....	59
Tabella 17 – Scostamenti curve I-V a circuito aperto del modulo AS31408.....	61
Tabella 18 - Scostamenti delle potenze massime delle curve I-V trasposte del modulo AS31408.....	61
Tabella 19 - Valori coefficienti a e R's del modulo AS31408 .....	61
Tabella 20 - Scostamenti curve I-V a circuito aperto del modulo AS31409. ....	62
Tabella 21 - Scostamenti delle potenze massime delle curve I-V trasposte del modulo AS31409.....	62
Tabella 22 - Valori coefficienti a e R's del modulo AS31409. ....	62
Tabella 23 - Scostamenti delle potenze massime delle curve I-V trasposte del modulo AS31411- .....	63
Tabella 24 - Scostamenti curve I-V a circuito aperto del modulo AS31411. ....	63
Tabella 25 – Valori coefficienti a e R's del modulo AS31411.....	63
Tabella 26 - Scostamenti delle potenze massime delle curve I-V trasposte del modulo AS31412.....	64
Tabella 27 - Scostamenti curve I-V a circuito aperto del modulo AS31412. ....	64
Tabella 28 Valori coefficienti a e R's del modulo AS31412.....	64
Tabella 29 - Scostamenti delle potenze massime delle curve I-V trasposte del modulo AS31413.....	65
Tabella 30 - Scostamenti curve I-V a circuito aperto del modulo AS31413 .....	65
Tabella 31 - Valori coefficienti a e R's del modulo AS31413 .....	65
Tabella 32 - Scostamenti delle potenze massime di uscita delle curve I-V trasposte del modulo AS31408 e il corrispondente valore di k'-. ....	66
Tabella 33 - Scostamenti delle potenze massime di uscita delle curve I-V trasposte del modulo AS31409 e il corrispondente valore di k'-. ....	67
Tabella 34 - Scostamenti delle potenze massime di uscita delle curve I-V trasposte del modulo AS31411 e il corrispondente valore di k'-. ....	67
Tabella 35 - Scostamenti delle potenze massime di uscita delle curve I-V trasposte del modulo AS31412 e il corrispondente valore di k'-. ....	68
Tabella 36 - Scostamenti delle potenze massime di uscita delle curve I-V trasposte del modulo AS31412 e il corrispondente valore di k'-. ....	69
Tabella 37 - Riepilogo dei valori a, R's e k' ottenuti tramite le prove sperimentali .....	69

## NOMENCLATURA

- $a$  - Fattore di correzione dell'irraggiamento per la tensione a circuito aperto
- $c$  - Velocità della luce nel vuoto (km/s)
- $e$  - Carica elementare dell'elettrone (C - coulomb)
- $E$  - Energia di un singolo fotone (J – joule)
- $E_g$  - Gap energetico tra l'orbitale di valenza e conduzione (eV – eletron-volt)
- FF - Coefficiente di riempimento
- $G'_1$  - Irraggiamento misurato al momento dell'acquisizione dei dati dei singoli punti della curva I-V
- $G_2$  - Irraggiamento all'irraggiamento normalizzato ( $W/m^2$ )
- $G_{SC}$  - Irraggiamento al momento della misura della corrente di cortocircuito ( $w/m^2$ )
- $h$  - Costante di Planck ( $J*sec$ )
- $I$  - Corrente (A – ampere)
- $I_0$  - corrente di saturazione del diodo (A)
- $I_1, V_1$ - Sono le coordinate dei punti delle caratteristiche misurate (A, V)
- $I_2, V_2$  - Sono le coordinate dei punti corrispondenti delle caratteristiche corrette (A, V)
- $G_1$  - Irraggiamento misurato con il dispositivo di riferimento ( $W/m^2$ )
- $I_D$  - Corrente che attraversa la cella quando funge da diodo (A)
- $I_{ph}$  - Corrente che produce la cella quando viene illuminata (A)
- $I_{sc}$  - Corrente di cortocircuito (A)
- $k$  - costante dei gas di Boltzman ( $J / K$ )
- $k$  - Fattore di correzione della curva I-V
- $k'$  - Coefficiente di temperatura della resistenza serie interna  $R'_s$ .
- $m$  - Massa della particella
- $P_{max}$  - Potenza massima erogata dal pannello fotovoltaico
- $P_s$  - Potenza della luce solare incidente ( $W/m^2$ )
- $R'_s$  - Resistenza serie interna del campione in prova ( $m\Omega$ )
- $R_s$  - Resistenza serie ( $\Omega$  – Ohm)
- $R_{sh}$  - Resistenza in parallelo (*resistenza di shunt* -  $\Omega$  )
- $T$  - temperatura assoluta della cella (K)

$T_1$  - Temperatura misurata del campione in prova ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_2$  - Temperatura normalizzata ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $\nu$  - Frequenza radiazione ( $1/\text{T}$ )  
 $V$  - Tensione (V – volt)  
 $V_{oc}$  - Tensione a circuito aperto (V)  
 $\alpha$  - Coefficiente di temperatura alla corrente di circuito aperto (mV/K)  
 $\beta$  - Coefficiente di temperatura alla corrente di cortocircuito (mA/K)  
 $\lambda$  - Lunghezza d'onda  
 $\mu$  – Coefficiente di efficienza di conversione del dispositivo (%)

### Acronimi

AIE - Agenzia Internazionale dell'Energia  
CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano  
COP – *Conference Of the Parties* (Conferenze delle parti)  
DIISM - Dipartimento di Ingegneria Industriale e scienze Matematiche  
INDC - *Intended Nationally Determined Contribution*  
STC - *Standard Test Condition* (condizioni di test standard)  
UNFCCC - Convenzione delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici

## INTRODUZIONE

La necessità di produrre sempre più energia da fonti rinnovabili è sotto gli occhi di tutti. Senza energia non esisterebbe né presente né futuro. L'uomo di oggi, ma soprattutto quello "del domani" è profondamente dipendente più che mai dall'elettricità. Basti pensare che ogni aspetto della società in cui viviamo ruota attorno alla presenza dell'elemento energia, come: la vita sociale, il lavoro, la sanità, lo sviluppo e l'economia. Senza energia non si potrebbero utilizzare gli smartphone e i computer, gli ospedali come li conosciamo noi cesserebbero di funzionare, le comunicazioni e i trasporti andrebbero a una velocità che oggi per noi sarebbe nulla. Ecco perché oggi, più che mai, è di fondamentale importanza che la ricerca scientifica e la sperimentazione si impegnino a trovare nuove forme di energie rinnovabili e sostenibili, ma soprattutto devono cercare di aumentare l'efficienza e le prestazioni di quelle già presenti come: fotovoltaico, eolico, idrico, termico ecc.

Nell'ottica dell'aumento dell'efficienza delle energie rinnovabili, in questo lavoro si sono voluti determinare i parametri di correzione delle curve corrente – tensione che caratterizzano i pannelli fotovoltaici. Le curve corrente – tensione, che ci definiscono i principali parametri di efficienza dei moduli fotovoltaici, in particolar modo la potenza massima erogata dal pannello, sono tracciate da ogni produttore alle condizioni di prova STC (*Standard Test Condition*) definite dalla norma EN 60904, ossia  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , temperatura delle celle  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , distribuzione spettrale AM (*air mass*) = 1,5. Volendo andare a tracciare le curve I-V in un campo fotovoltaico le condizioni standard non saranno rispettate e quindi per fare un confronto di prestazioni utilizzando le curve I-V rilevate, per poter verificare che le caratteristiche dichiarate dal produttore sulla scheda tecnica siano rispettate, queste dovranno essere "traslate" alle condizioni STC. A questo proposito è intervenuta la norma europea EN 60891 che ha definito tre procedure per poter eseguire le correzioni a differenti temperature e irraggiamenti alle condizioni standard. Tra le tre procedure indicate nella norma, quella maggiormente utilizzata, e anche oggetto del nostro studio, è la seconda. Questa procedura, che verrà spiegata in dettaglio alla fine del capitolo 2, è caratterizzata da due equazioni che, oltre che da parametri come temperatura e irraggiamento, sono definite da dei coefficienti

correttivi, che devono essere determinati tramite metodi sperimentali ben precisi indicati dalla norma stessa. Molte aziende in commercio, sulla base della seconda procedura di correzione, hanno sviluppato dei *software* in grado di effettuare la traslazione delle curve I-V prese sul campo alle STC, ma queste ultime non divulgano i valori dei parametri che utilizzano per effettuare le correzioni. Quindi lo scopo di questa sperimentazione è stato determinare i valori dei parametri di correzione tramite l'esecuzione di *flash test* con simulatore solare in grado di riprodurre fedelmente lo spettro elettromagnetico che va ad investire i moduli fotovoltaici quando si trovano sul campo.

Nel primo capitolo si è parlato delle principali problematiche ambientali causate dall'utilizzo dei combustibili fossili e delle politiche governative a livello europeo e internazionale che sono state attuate per andare sempre più verso un futuro "sostenibile". In particolar modo si è posta l'attenzione sulla CO<sub>2</sub> (biossido di carbonio o comunemente chiamato anidride carbonica), principale responsabile dell'innalzamento della temperatura globale e si è fatto un breve *excursus* sulle principali fonti di energia sostenibile.

Nel secondo capitolo, dato che l'oggetto di studio riguarda la tecnologia fotovoltaica, si è svolto un *focus* su questa ultima tecnologia. Si sono ripotato in breve la storia e le generalità dei moduli fotovoltaici per poi andare nello specifico, ossia si è spiegato l'effetto fotovoltaico e le principali nozioni fisico-chimiche che caratterizzano questo fenomeno. In seguito, si sono descritte le caratteristiche ed il funzionamento di una cella fotovoltaica, in modo particolare si è riportato il modello del generatore equivalente a cui la cella può essere assimilata spiegandone i principali coefficienti. Si è poi parlato in dettaglio delle curve I-V e sono stati spiegati i parametri che le caratterizzano. Infine, sono state riportate le principali tipologie di moduli in silicio cristallino ed è stata riportata la norma EN 60891, con particolare attenzione alla seconda procedura di correzione.

Nel terzo capitolo si è descritto in generale il funzionamento di un simulatore solare per andare in seguito a esporre in dettaglio il simulatore di prova Berger Lichttechnik PSS8, ovvero si è descritto ogni componente del simulatore spiegandone il relativo collegamento e funzionamento.

Nel quarto capitolo vengono riportate le prove sperimentali effettuate. Le prove sono state tre. La prima è stata controllare tramite il simulatore solare che la potenza massima erogata dai pannelli corrispondesse alla potenza dichiarata dal produttore sulla scheda tecnica e che la tolleranza di quest'ultima rientrasse nei range riportati sulla medesima scheda. Nella seconda e nella terza prova sono state tracciate le curve I-V variando l'irraggiamento a mantenendo una temperatura costante per determinare i parametri  $a$  e  $R'_s$ , viceversa si è fatta variare la temperatura mantenendo l'irraggiamento costante per determinare  $k'$ .

Infine, nei capitoli cinque e sei vengono riportati i risultati e conclusioni delle prove sperimentali e le osservazioni su come migliorare le attrezzature e gli ambienti di lavoro per avere dei risultati ancora più attendibili.

# CAPITOLO 1

## 1. PROBLEMATICHE AMBIENTALI

Il problema ambientale è uno degli argomenti più discussi e controversi nel mondo. L'inquinamento è provocato soprattutto dall'uso massiccio di fonti energetiche non rinnovabili. Le problematiche causate dall'utilizzo di fonti non rinnovabili e inquinanti sono numerose: cambiamenti climatici, scioglimenti dei ghiacciai, eventi meteorologici estremi, intensificazione di fenomeni meteorologici estremi come cicloni e tempeste di sabbia, avanzamento dei deserti, riscaldamento del mare e scomparsa della biodiversità.

### 1.1. Problemi causati dalle energie non rinnovabili

Le energie non rinnovabili sono fonti di energia che si generano molto lentamente, a differenza di quelle rinnovabili, perciò una volta terminate non saranno nuovamente disponibili in tempi brevi. L'impatto ambientale associato al loro sfruttamento risulta in genere maggiore rispetto allo sfruttamento di fonti di energia rinnovabili, che vengono invece reintegrate naturalmente in un periodo di tempo relativamente breve [1]. Le fonti energetiche che possiamo definire non rinnovabili sono:

- Il carbone: combustibile fossile più presente al mondo. Si tratta di una roccia composta da materiale organico formato da carbonio, idrogeno, ossigeno, azoto e zolfo. La combustione del carbone è la principale responsabile delle piogge acide. Negli ultimi anni questo fenomeno si è riuscito a contenere, soprattutto per l'enorme costo del trasporto del combustibile.
- L'uranio: il materiale che tramite fusione e fissione nucleare permette la produzione di energia atomica. Il minerale estratto naturalmente ha bisogno di essere trattato tramite un processo di arricchimento. Gli anni '80 sono stati quelli che hanno visto la maggior produzione di energia atomica ma anche quelli con i maggiori disastri provocati dalle scorie radioattive. Un esempio calzante è l'episodio accaduto a Chernobyl nell'aprile dell'86.

- Il petrolio: questo idrocarburo è il principale combustibile liquido estratto nel mondo. I tempi naturali per la formazione di questo materiale sono di centinaia di migliaia di anni. Il petrolio greggio non può essere subito utilizzato, ma necessita di un processo di raffinazione. I rischi ecologici legati alla combustione del petrolio sono dovuti soprattutto dall'emissione di gas come: anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ), monossido di azoto ( $\text{NO}$ ), biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ), anidrite solforosa ( $\text{SO}_2$ ) e l'anidrite solforica ( $\text{SO}_3$ ) responsabili soprattutto del surriscaldamento terrestre.
- Il gas naturale: si trova negli stessi giacimenti in cui si trova il petrolio e rispetto alle altre risorse è quella meno dannosa per l'ambiente [2].

Questi combustibili fossili sono i principali responsabili delle emissioni inquinanti nell'ambiente dato che provocano il repentino aumento dei dannosissimi gas effetto serra con conseguente aumento della temperatura terrestre, la cui costanza è fondamentale per l'equilibrio dell'intero ecosistema. Il clima e la temperatura media della superficie terrestre dipendono dal bilanciamento fra l'energia solare incidente e quella riemessa e riflessa dal nostro pianeta. Molti gas presenti nell'atmosfera si comportano come filtri selettivi nei confronti della radiazione solare, avviene così che essa, per la parte alle frequenze più elevate nell'infrarosso e nel campo del visibile, attraversa questo filtro e raggiunge la superficie terrestre. In parte questa radiazione viene riflessa ed in parte viene assorbita e riemessa sotto forma di calore. Si ha quindi una emissione dalla superficie terrestre di una radiazione nell'infrarosso termico che, muovendosi verso lo spazio, incontra l'atmosfera costituita per gran parte da azoto ( $\text{N}_2$ , 79%) e ossigeno ( $\text{O}_2$ , 21%). Accanto a questi gas troviamo in quantità minori principalmente vapore acqueo ( $\text{H}_2\text{O}$ )<sub>g</sub> e diossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ). È proprio quest'ultimo gas, ovvero il diossido di carbonio, che negli ultimi anni ha creato danni all'intero ecosistema come appunto l'innalzamento della temperatura terrestre e lo scioglimento dei ghiacciai. L'anidride carbonica (o  $\text{CO}_2$ , o biossido di carbonio) è un gas solubile, incolore e inodore. Si tratta del prodotto che deriva dalla combustione delle sostanze organiche, quindi anche di carbone e idrocarburi. La sua formazione avviene tramite l'unione del carbonio (C) con due atomi di ossigeno ( $\text{O}_2$ ) presenti nell'aria. In pratica, la  $\text{CO}_2$  è una sostanza che è reperibile in natura, si trova infatti

nell'atmosfera, nel sistema solare e anche negli oceani, e la sua presenza e conseguente accumulo sono sempre stati bilanciati dall'assorbimento da parte di piante e oceani. Da quanto però la produzione industriale ha iniziato a progredire a ritmi esagerati, le emissioni di CO<sub>2</sub> hanno iniziato a crescere sempre di più e la natura non è più riuscita a smaltire questi quantitativi con il suo normale ciclo: gli alberi non riescono a convertirla in ossigeno a una velocità sufficiente e i mari stanno subendo processi di acidificazione [3]. Questa situazione ha provocato un accumulo di questo gas che, trattenendo le radiazioni e il calore emesso dalla terra, sta provocando danni irreversibili all'ambiente. Come ci riportano i dati ISPRA la maggior parte delle emissioni (circa 80% delle emissioni di CO<sub>2</sub>) provengono dalla produzione energetica, anche se si registra un leggero calo negli ultimi anni grazie all'impiego di energie rinnovabili, soprattutto dell'energia fotovoltaica e dell'eolica. La riduzione delle emissioni CO<sub>2</sub> è pertanto la principale strategia di mitigazione dei cambiamenti climatici. Oltre all'utilizzo delle fonti rinnovabili la riduzione di emissioni può essere raggiunta anche attraverso l'incremento dell'efficienza e l'utilizzo di combustibili a basso contenuto di carbonio [4].

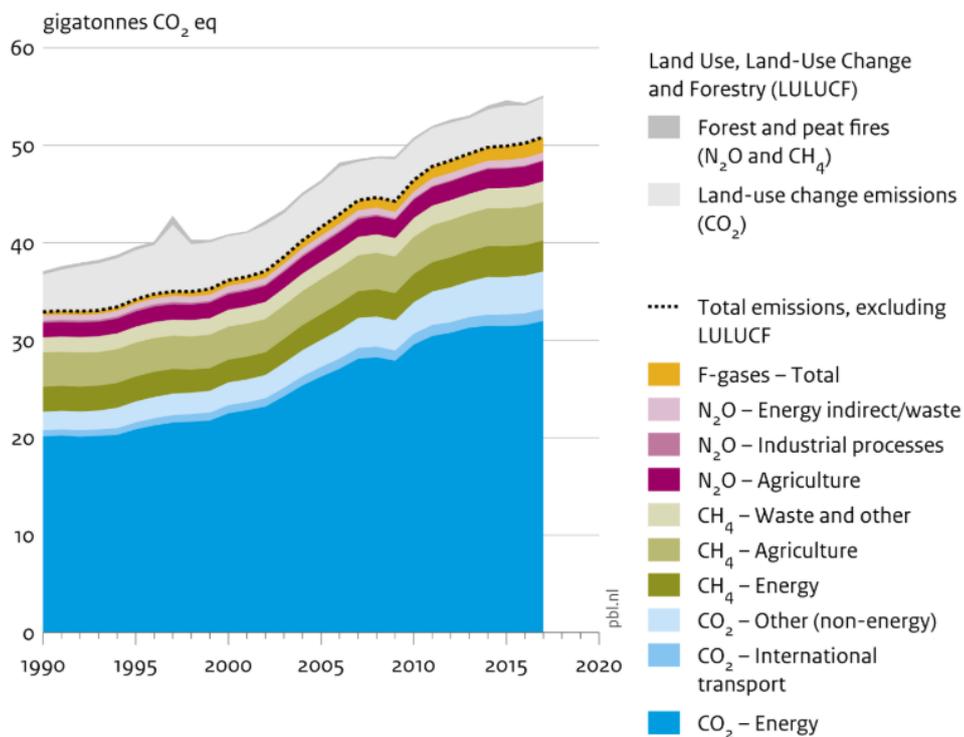


Figura 1- Rapporto 2018 emissioni gas effetto serra per tipo e fonte [1]

## **1.2. Accordi internazionali ed europei**

La riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> non è un processo che avverrà in pochi anni, tuttavia si tratta di un'azione necessaria che va condotta da una forte volontà dei Governi di cercare di recuperare almeno in parte la salute del Pianeta. Risulta fondamentale pensare a delle soluzioni che abbiano effetti efficaci a lungo termine. Su questo tema, già a partire dagli anni 90' molti paesi hanno iniziato a intervenire con negoziati e accordi internazionali periodici che hanno avuto come obiettivo la definizione dei limiti alle emissioni di gas serra da parte dei Paesi firmatari. Ecco un elenco sintetico dei più significativi accordi internazionali sul clima:

### **1.2.1. Accordo di Rio 1992**

Il Summit della Terra, tenutosi a Rio de Janeiro dal 3 al 14 giugno 1992, è stato la prima conferenza mondiale dei capi di Stato sull'ambiente. È stato un evento senza precedenti anche in termini di impatto mediatico e di scelte politiche e di sviluppo conseguenti. Vi parteciparono 172 governi e 108 capi di Stato o di Governo, 2.400 rappresentanti di organizzazioni non governative e oltre 17.000 persone aderirono al NGO Forum (organo ONU). I temi che furono trattati sono i seguenti:

- Limitazione della produzione di tossine, come il piombo nel gasolio o i rifiuti velenosi;
- le risorse di energia alternativa per rimpiazzare l'abuso di combustibile fossile ritenuto responsabile del cambiamento climatico globale;
- un quadro sui sistemi di pubblico trasporto con il fine di ridurre le emissioni dei veicoli, la congestione stradale nelle grandi città e i problemi di salute causati dallo smog [5].

### **1.2.2. Protocollo di Kyoto 1997**

È il primo documento internazionale che ha imposto l'obbligo di riduzione delle emissioni ai Paesi più sviluppati imponendo una riduzione del 5% (sulla base delle emissioni rilevate nel 1990) nel primo periodo di adempimento compreso tra il 2008 e il 2012. L'Unione Europea (UE) ha alzato il tiro ponendosi come obiettivo una ulteriore riduzione del -8%. Il secondo periodo di adempimento del protocollo di Kyoto è iniziato nel 2013 e si concluderà nel 2020, durante il quale i paesi firmatari si

sono impegnati a ridurre le emissioni almeno del -18% rispetto ai livelli del 1990. Anche in questo caso l'UE si è impegnata a diminuire ulteriormente le emissioni, con una percentuale del -20% rispetto ai livelli del 1990 [6].

### **1.2.3. Conferenza di Ciancun 2010**

La COP (*Conference of the parties*) messicana porta all'approvazione di un pacchetto di misure per aiutare le nazioni in via di sviluppo in materia di cambiamenti climatici. Le Parti lanciano il Fondo Verde per il Clima; i Governi firmatari stabiliscono che bisognerà tagliare le emissioni di gas serra dal 20% al 40% nel 2020. Vengono istituiti tre organismi: il *Technology Executive Committee* con il compito di stabilire le strategie per il trasferimento delle tecnologie, il *Climate Technology Centre* con il compito di organizzare le attività e il *Climate Technology Centre and Network* con lo scopo di attuare gli interventi [7].

### **1.2.4. Accordo di Parigi 2015**

Con 40.000 partecipanti è stato il Summit più mediatico ed ha prodotto il primo testo universale per ridurre la temperatura di 2 gradi, cioè sotto i livelli della prima rivoluzione industriale (1861-1880) dal 2015 al 2100 (ovvero 2.900 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub>, ovvero un taglio dell'ordine tra il 40 e il 70% delle emissioni entro il 2050). Gli obiettivi sono rivisti nell'ambito degli impegni nazionali (INDC) ogni 5 anni, in modo da renderli sempre più ambiziosi. L'accordo di Parigi è entrato in vigore nel 2016, in seguito all'adempimento delle condizioni per la ratifica da parte di almeno 55 paesi che rappresentano almeno il 55% delle emissioni globali di gas serra. Tutti i paesi dell'UE hanno ratificato l'accordo. L'accordo firmato a Parigi ha avuto il pregio di essere il primo di carattere vincolante e di portata globale per il contrasto ai cambiamenti climatici [8].

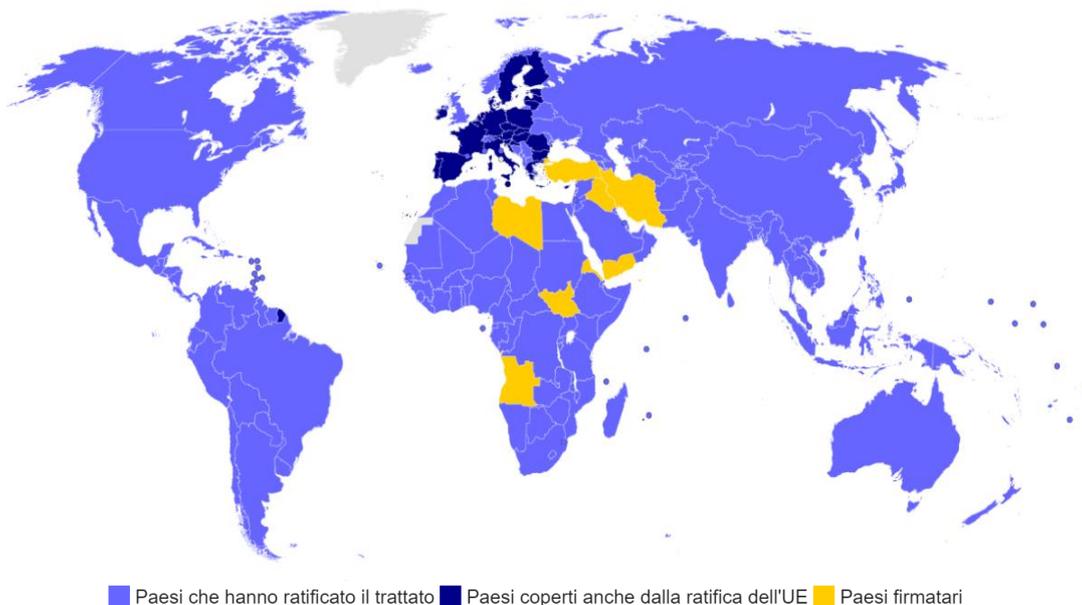


Figura 2-Accordo di Parigi 2015 cartina geografica dei paesi firmatari [2].

Alla luce degli argomenti trattati è più chiaro comprendere come le emergenze ambientali, inquinamento, la desertificazione, riscaldamento globale ecc. abbiano portato all'attenzione generale una sensibilità ambientale mai conosciuta nella storia dell'uomo e una evoluzione sociologica del fenomeno i cui sviluppi soltanto la storia futura potrà valutare. Oggi l'ambiente è infatti uno dei grandi temi del progresso e della speranza di una migliore qualità della vita, di un futuro migliore per cui esso conta sempre di più nella coscienza sia collettiva che individuale.

### 1.3. Lo sviluppo sostenibile

*“Lo sviluppo sostenibile è quello sviluppo che consente alla generazione presente di soddisfare i propri bisogni senza compromettere la capacità delle future generazioni di soddisfare i propri bisogni.” (Rapporto Brundtland, 1987)*

Il concetto di sviluppo sostenibile prende quindi in considerazione la crescita delle attività economiche nel rispetto dell'ambiente. Negli ultimi anni l'Europa e le singole nazioni hanno redatto decreti e intrapreso azioni mirate all'incentivazione dell'utilizzo di energie sostenibili. Come riportato già nel paragrafo 1.2 da diversi anni è stata istituita la COP (*Conference of the parties*). La COP è l'organismo decisionale dell'UNFCCC, ovvero la Convenzione Quadro dell'ONU sui cambiamenti climatici

vengono preparati degli accordi da ratificare poi nelle assemblee mondiali annuali. Oggi i paesi firmatari sono 197.

Un altro passo verso lo sviluppo sostenibile è stato attuato anche dall'Europa tramite il piano decennale "Europa 2020" in cui L'Unione europea si è posta cinque obiettivi in materia di occupazione, innovazione, clima, energia, istruzione e integrazione sociale, da raggiungere entro il 2020. Ogni Stato membro ha adottato per ciascuno di questi settori i propri obiettivi nazionali. Di nostro interesse è quello teso a ridurre i cambiamenti climatici e incentivare la sostenibilità energetica: entro il 2020 i paesi aderenti dovranno ridurre le emissioni di gas serra del 20% rispetto al 1990, 20% del fabbisogno di energia dovrà essere ricavato da fonti rinnovabili, e l'efficienza energetica dovrà aumentare del 20% (obiettivo ricordato come 20-20-20). Anche l'Italia, come le altre nazioni, si sta muovendo in questa direzione. Nella normativa italiana è stato introdotto il concetto di sviluppo sostenibile nel decreto legislativo n.152 del 3 aprile 2006, laddove si legge che "ogni attività umana giuridicamente rilevante deve conformarsi al principio dello sviluppo sostenibile[...]. Anche l'attività della pubblica amministrazione deve essere finalizzata a consentire la migliore attuazione possibile del principio dello sviluppo sostenibile". Nel 2019 il 35,9% della domanda elettrica in Italia è stata soddisfatta da fonti di energia rinnovabile, in particolare da eolico e fotovoltaico. Sono dunque questi i settori su cui si deve concentrare la ricerca scientifica per ottenere strumenti sempre più efficienti e ad alto rendimento energetico per raggiungere l'obiettivo futuro di trasformazione in un "paese rinnovabile e sostenibile".

#### **1.4. Fonti di energia sostenibile**

Cosa si intende per energia sostenibile? In generale, quando si parla di energia sostenibile ci si riferisce a quel tipo di produzione ed uso dell'energia che implica uno sviluppo sostenibile, che a sua volta si pone l'obiettivo di non danneggiare l'ambiente, grazie anche all'efficienza dell'uso energetico. Tali fonti sono:

- l'irraggiamento solare: permette di produrre energia chimica, termica ed elettrica;
- il vento: è una fonte per la produzione meccanica ed elettrica;

- le biomasse: vengono utilizzate per l'energia termica ed elettrica;
- le maree e le correnti marine;
- bacini d'acqua: utilizzabili tramite il dislivello di acque come fonte idroelettrica.

L'utilizzo di queste risorse permette di ridurre la produzione di energia tramite centrali nucleari e combustibili fossili. Ogni paese in base alla sua collocazione geografica può attingere a diverse fonti in modo da realizzare un piano di sostentamento 100% green. I paesi del Nord Europa, come ad esempio Olanda e Paesi Bassi, sfruttano maggiormente l'energia eolica, le zone del mediterraneo invece trovano maggior facilità nello sfruttamento delle maree e delle correnti marine, come ad esempio accade in Italia.

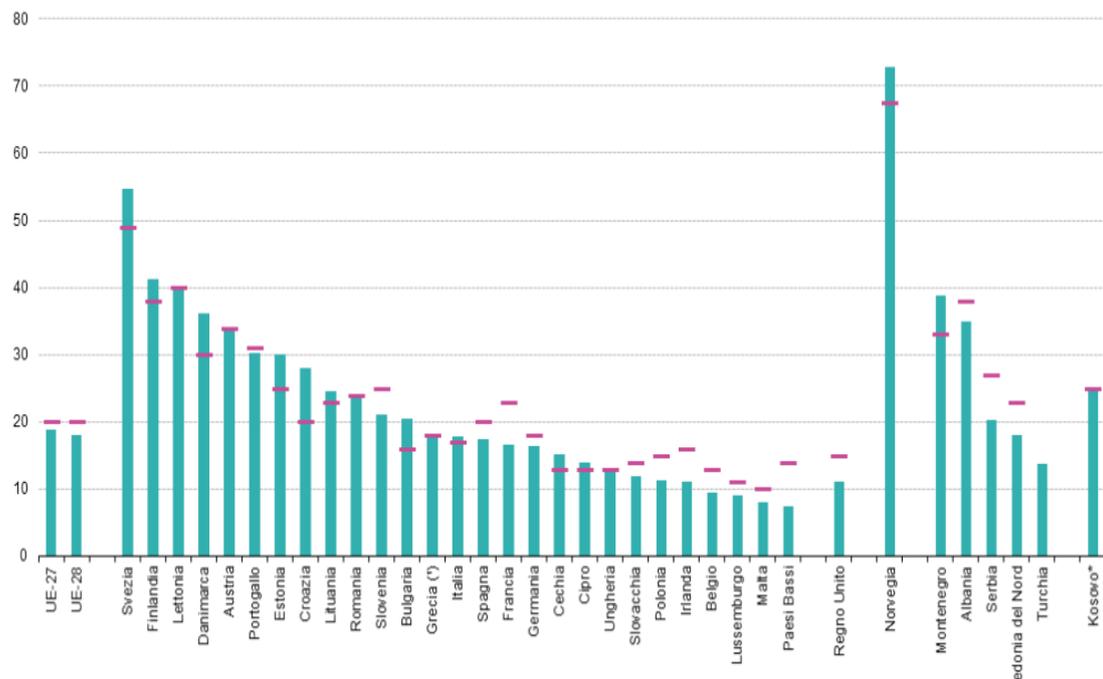


Figura 3 - Rappresentazione percentuale di energia da fonti rinnovabile nel 2018 in EU e quota percentuale con l'obiettivo per il 2020 [3].

Di seguito si descrive brevemente le caratteristiche principali delle fonti di energia sostenibile elencate sopra:

#### 1.4.1. Energia solare

L'energia proveniente dal sole è enorme, infatti quest'ultimo irraggia il nostro pianeta per una potenza di circa 180 mila miliardi di kilowatt; una parte dei raggi solari viene riflessa dall'atmosfera terrestre verso lo spazio esterno, mentre una parte viene assorbita sotto forma di calore. In qualsiasi momento il Sole irraggia sull'orbita terrestre una energia pari a  $1367 \text{ watt / m}^2$  ( $1,3 \text{ kW / m}^2$ ) e questa può essere trasformata, tramite l'ausilio di due tecnologie differenti, in energia termica (collettori termici) o convertita direttamente in energia elettrica (pannelli fotovoltaici). I pannelli solari (o modulo) fotovoltaico, sfrutta le proprietà di alcuni materiali semiconduttori (opportunamente trattati), per lo più silicio (Si), di generare energia elettrica se esposti alla radiazione solare. I pannelli solare termico (o collettore solare), invece sfruttano l'azione termica del Sole per scaldare un fluido termovettore (di solito una miscela di acqua e glicole) in circolazione all'interno di una "serpentina" presente nell'impianto. Il calore accumulato dal fluido viene poi ceduto mediante uno scambiatore di calore all'acqua contenuta in un serbatoio di accumulo, al fine di provvedere al riscaldamento dell'acqua per i servizi o al riscaldamento degli ambienti [8].



Figura 5- Esempio di un impianto solare termico installato su un tetto di una casa [4].



Figura 4 - Esempio di impianto fotovoltaico installato per la produzione elettrica di una casa [5].

### 1.4.2. Energia idroelettrica

L'energia idroelettrica viene definita anche energia idraulica oppure idrica ed è quel tipo di energia che si origina sfruttando il movimento di masse di acqua in caduta. Quando questa cade produce energia cinetica, che si trasforma in energia potenziale gravitazionale, la quale per mezzo di una turbina e di un alternatore, viene poi trasformata in elettricità. La parola deriva da *idro*, che significa acqua, e da elettrico, che fa riferimento all'energia. Questa è una forma di energia alternativa ed ecologica che viene ricavata dai fiumi, dai laghi, per mezzo di dighe e di condotte forzate. Vi sono diversi tipi di centrale idroelettrica: impianti a deflusso regolato, impianti ad acqua di fluente e centrali ad energia mareomotrice [3].

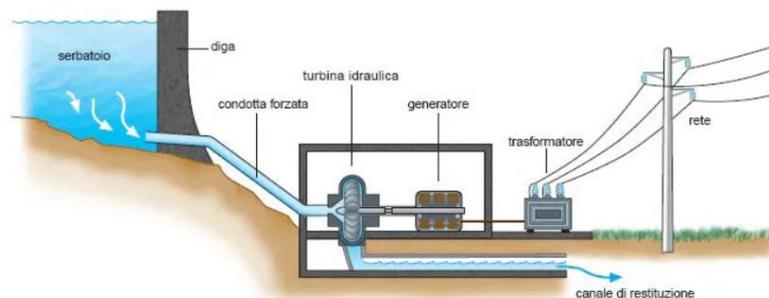


Figura 6 - Schema di una centrale idroelettrica [6].

### 1.4.3. Energia eolica

Dopo l'energia idroelettrica è sicuramente la fonte d'energia rinnovabile che ha conquistato la più ampia fetta di mercato. L'energia eolica sfrutta come fluido di lavoro il vento: mediante l'utilizzo delle turbine è possibile trasformare la velocità assiale del vento in velocità di rotazione delle pale della turbina, sfruttando quindi la rotazione dell'albero per la produzione di energia all'alternatore. Maggiori sono l'altezza da terra e la grandezza delle pale, maggiore è la velocità del vento e la quantità di vento (portata d'aria) che si può sfruttare. Inoltre, in funzione della posizione geografica si ha un vento più o meno costante che permette una produzione di energia maggiormente continua, evitando le raffiche che possono danneggiare le turbine o le "interferenze" dovute a colline, montagne, foreste o città nelle vicinanze che limitano la produzione. Spesso per questo vengono sfruttate le coste o la cima delle colline (eolico *on-shore*). Ultimamente si stanno sviluppando sempre di più le centrali in mare aperto (*off-shore*),

che hanno il vantaggio di poter sfruttare un vento più costante e più forte rispetto alla terraferma, con meno problemi per quanto riguarda l'inquinamento visivo che spesso viene considerato eccessivo [3].

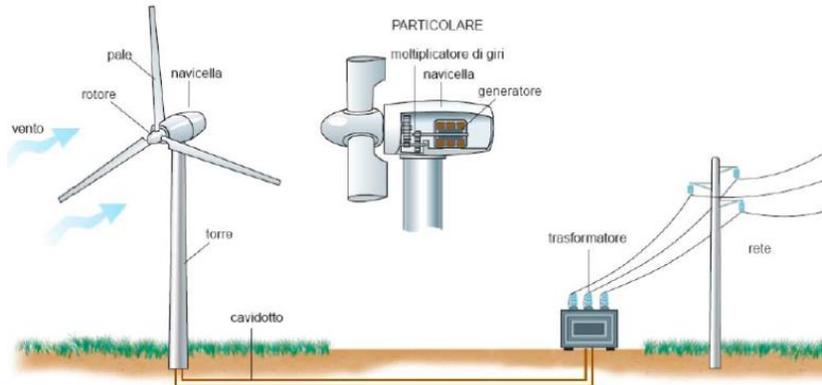


Figura 7 - Schema e componenti di un impianto eolico [7].

#### 1.4.4. Energia della Biomasse

L'energia da biomassa è l'energia che deriva dalla materia organica e quindi da piante e animali. La biomassa in forma di piante, alberi, erba, foglie, letame e rifiuti animali può essere una grande fonte principalmente per la produzione di combustibili alternativi che possono essere utilizzati per sostituire i combustibili fossili. La condizione necessaria per l'utilizzo delle biomasse come combustibile è che abbiano un potere calorifico apprezzabile per produrre energia termica da sfruttare nelle caldaie. In molti casi è necessaria una preliminare essiccazione del materiale per diminuirne il tasso d'umidità. Attualmente esistono due metodi di utilizzazione del combustibile a biomassa per alimentare i bruciatori:

- combustione su griglie;
- combustione in letti fluidi.

I due metodi differiscono nel processo di combustione: il primo (più economico) prevede un unico stadio di combustione; il secondo (più oneroso ma meno inquinante) prevede diverse zone di combustione al fine di limitare l'emissione di CO. In alternativa alla combustione diretta è possibile sfruttare le biomasse per la produzione di gas metano di sintesi a seguito del processo di digestione anaerobica [3].

### **1.4.5. Energia marina**

L'energia delle maree, attraverso tecnologie di tipo fluidodinamico, può essere convertita in energia elettrica sfruttando la forza meccanica dei movimenti dell'acqua.

Esistono differenti tipologie di energia marina:

- maree;
- gradiente termico;
- moto ondoso;
- correnti marine;
- gradiente salino [9].

## CAPITOLO 2

### 2. L'ENERGIA FOTOVOLTAICA

Alla fine del capitolo precedente sono state illustrate brevemente le energie rinnovabili più diffuse, ma in questa tesi si approfondirà l'energia solare fotovoltaica che in questi anni, dopo l'energia eolica, è stata quella che maggiormente si è diffusa, infatti in Italia occupa il 20,3 % dell'energia derivante da fonti rinnovabili. Inoltre, secondo uno studio condotto dall'AIE (Agenzia Internazionale dell'Energia) entro il 2040 il 40% della domanda di energia sarà soddisfatta dalle energie rinnovabili, in particolare da quella eolica e solare, il cui peso va di pari passo all'innovazione tecnologica e all'efficienza produttiva [10]. Questi sono i motivi per cui la ricerca scientifica deve essere in grado di aumentare l'efficienza dei pannelli fotovoltaici. In questo capitolo si cercherà di andare nel dettaglio dei meccanismi fisico-chimici, le caratteristiche del funzionamento e le varie tipologie di moduli fotovoltaici per arrivare infine a parlare della norma europea 60891 che definisce le procedure di correzione di questi ultimi in funzione della temperatura e dell'irraggiamento delle curve I-V.

#### 2.1. Storia del fotovoltaico in breve

L'evoluzione della scienza e della tecnologia, che caratterizza l'intero 1700, apre la strada alla scoperta dell'effetto fotovoltaico, messo a punto dopo una serie di esperimenti nel 1839 da parte del fisico francese Alexandre Edmond Becquerel. Successivamente, nel 1873, si è presa consapevolezza che la luce solare riflessa su alcuni metalli può produrre elettricità quando fu studiato l'effetto della luce solare sul selenio e nel 1879 in America venne realizzato il primo prototipo di pannello solare, costruito con uno strato di selenio e una sottile foglio d'oro. Un'altra tappa fondamentale si ebbe quando nel 1921 Albert Einstein vinse il premio Nobel per la Fisica, grazie a delle ricerche sull'effetto fotoelettrico, fenomeno alla base della generazione di elettricità attraverso le celle fotovoltaiche. L'applicazione di questa teoria dovette aspettare la scoperta del giusto materiale per la realizzazione. Il risultato migliore lo ebbero Gerald Pearson, Daryl Chapin e Calvin Fuller dei *Bell Laboratories*, quando nel 1955 realizzarono una cella fotovoltaica in silicio capace di

alimentare una piccola ricetrasmittente. Da allora moltissime grandi corporazioni si concentrano sul fotovoltaico. In aggiunta la crisi petrolifera degli anni '70 ha ulteriormente promosso le vendite di pannelli fotovoltaici. Da quel momento in poi l'energia solare verrà considerata una vera alternativa alla generazione di elettricità. Oggi, i pannelli fotovoltaici stanno diventando sempre più comuni anche nelle case private, grazie all'uso di materiali sempre più performanti, che possono raggiungere un rendimento elevato [11].

## **2.2. Generalità sui moduli fotovoltaici**

I moduli fotovoltaici sono dispositivi in grado di convertire la luce solare direttamente in energia elettrica senza un motore termico o alcun equipaggiamento rotante; le apparecchiature fotovoltaiche non hanno parti mobili e, di conseguenza, richiedono una manutenzione minima offrendo una lunga durata nel tempo. Inoltre, questa tecnologia ha il pregio di non produrre alcuna emissione di gas serra ed il suo funzionamento è praticamente silenzioso. Gli impianti fotovoltaici possono essere costruiti in qualsiasi dimensione sia in termini fisici che di potenza, ovvero possono andare dai pochi chilowatt per una famiglia (mediamente 3-4 kW per una superficie di 25 m<sup>2</sup>) ad arrivare a impianti record come quello costruito nel deserto di Dubai con una potenza di 5 Gigawatt per un'estensione di circa 214 km<sup>2</sup>, in grado di alimentare in media 1,3 milioni di case. Le celle fotovoltaiche sono costituite da materiali semiconduttori come il silicio (Si) e composti di solfuro di cadmio (CdS), solfuro di rame (Cu<sub>2</sub>S) e arseniuro di gallio (GaAs); queste celle vengono messe insieme in modo da formare un modulo in grado di produrre una tensione e corrente specifica quando vengono colpite dai raggi solari. I moduli fotovoltaici possono essere collegati in parallelo o in serie per produrre grandi quantità di corrente [12].

## **2.3. L'effetto fotovoltaico**

Per comprendere a pieno l'effetto fotovoltaico introduciamo inizialmente alcuni concetti fisico-chimici di fondamentale importanza, ossia:

- conducibilità elettrica;
- tipologie di materiali in natura: conduttori, isolanti e semiconduttori;
- tipi di drogaggio: di tipo "p" e di tipo "n".

La corrente elettrica è definita come: “*flusso ordinato di elettroni che attraversano il materiale nell’unità di tempo*”

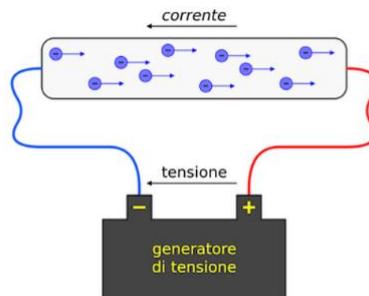
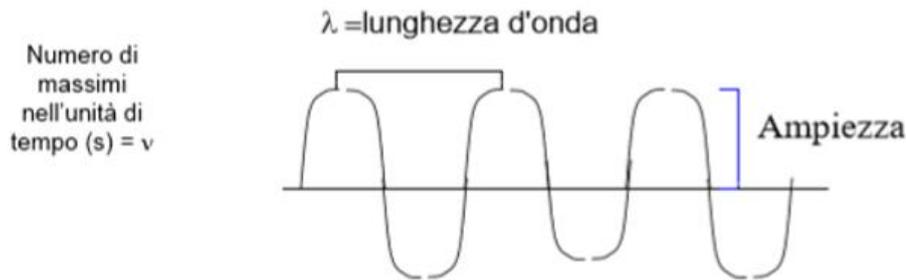
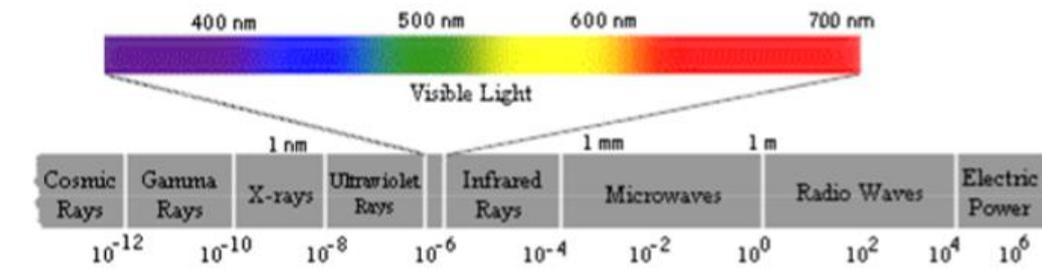


Figura 8 - Rappresentazione del "flusso di elettroni" in un filo conduttore sottoposto a una differenza di potenziale (generatore di tensione) [7].

Come è noto dalla chimica tutti i materiali in natura sono dati dall’aggregazione di più molecole che si legano tra di loro tramite legami deboli per determinare le proprietà fisico-chimiche dei materiali. A loro volta le molecole sono composte dall’aggregazione di più atomi. L’atomo è costituito da un nucleo centrale contenente i neutroni ( $n^0$  - cariche neutre) e protoni ( $p^+$  - cariche positive) e da elettroni che girano su *orbitali* caratterizzati da *quanti* di energia ben precisa, ovvero, come mostrato dall’equazione di Schrödinger, che associa agli orbitali degli elettroni un’equazione simile a quella usata per descrivere l’onda stazionaria di un fotone, si vede che la soluzione di quest’ultima è possibile solamente per certi valori (*quanti*) di energia ben definiti. In seguito, questa teoria fu perfezionata dal fisico francese de Broglie che considerò l’elettrone contemporaneamente come particella e onda elettromagnetica. De Broglie unendo la *teoria dei quanti di Planck* e la teoria della relatività ristretta di Einstein, arrivò a dimostrare che l’energia degli orbitali è quantizzata e quindi che l’elettrone potesse “saltare” da un orbitale all’altro solamente per certe lunghezze d’onda ( $\lambda$ ).



$$\nu = \text{frequenza della radiazione} = c / \lambda \quad c = \text{velocità della luce nel vuoto}$$

Figura 9 - Spetro delle radiazioni elettromagnetiche [9]

Illustriamo i passaggi essenziali dell'equazione di De Broglie:

$$E = h\nu \quad (1)$$

$$E = mc^2 \quad (2)$$

dove:

- $E$  = è l'energia di un singolo quanto di energia (fotone);
- $h$  = costante di Planck pari a  $6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$ ; questa costante indica la più piccola quantità di energia che può essere emessa o assorbita da un'onda elettromagnetica;
- $\nu$  = la frequenza della radiazione;
- $m$  = massa della particella;
- $c$  = velocità della luce nel vuoto  $3,0 \times 10^8 \text{ km/s}$ .

Eguagliando l'equazione (1) e (2):

$$h\nu = mc^2 \quad (3)$$

E considerando:

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

Sostituendo e semplificando nella (3) si ottiene la relazione di De Broglie con cui si dimostra che una particella (elettrone) viene associata una determinata lunghezza d'onda:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (5)$$

In conclusione, possiamo scrivere che l'energia necessaria per far saltare un elettrone da un orbitale a un altro è pari a:

$$E = \frac{hC}{\lambda} \quad (6)$$

Dove  $C$  è un termine costante che contiene le masse e le cariche del nucleo e dell'elettrone.

In base a queste considerazioni venne formulata la *teoria delle bande continue* che illustra come avviene la conducibilità elettrica nei materiali. Quest'ultima considera la sovrapposizione di  $N$  orbitali atomici aventi quanti di energia molto ravvicinati e quindi la formazione di un *orbitale delocalizzato* (chiamata anche banda continua) esteso su tutto il reticolo cristallino. L'orbitale delocalizzato è in grado di far "viaggiare" gli elettroni in qualunque direzione del materiale una volta che vi viene applicato un campo elettrico esterno, nel nostro caso specifico caso da una radiazione solare adeguata.

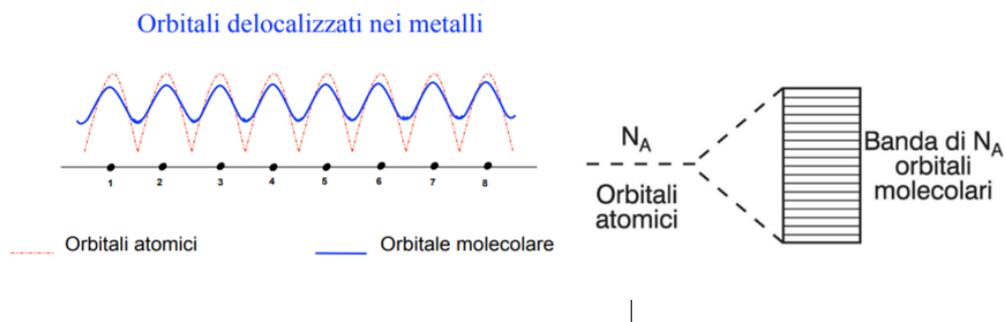


Figura 10 - - Rappresentazione grafica dell'orbite delocalizzato e della banda continua [9]

Gli orbitali messi in condivisione sono caratterizzati da un livello energetico ben preciso: quello più esterno, occupato completamente dagli elettroni, costituisce la *banda di valenza* (banda che ha raggiunto il numero massimo di elettroni), mentre l'orbitale successivo, ossia il livello energetico ammesso, che solitamente è vuoto o parzialmente pieno, costituisce la *banda di conduzione*. L'intervallo tra queste due bande forma la "*banda proibita*". L'ampiezza di tale banda è denominata *energy gap* (energia di separazione), che viene indicata con  $E_g$  e matematicamente rappresenta la differenza che intercorre tra l'energia della banda di conduzione e l'energia della banda di valenza. Nei materiali conduttori abbiamo un sistema di bande vuote o semivuote che permettono la conducibilità dato che la banda di conduzione e di valenza sono adiacenti. Quindi applicando anche una quantità minima di energia al materiale gli elettroni sono in grado di saltare sulla banda di conduzione cosicché si ottiene un flusso di elettroni e quindi di corrente. Negli isolanti il sistema che abbiamo visto per i materiali conduttori non è possibile, ci troviamo con un materiale caratterizzato dal fatto che sia le bande interne che esterne non danno conducibilità elettrica in quanto o sono completamente piene o sono completamente vuote; quindi in un isolante affinché si verifichi la conducibilità elettrica si dovrebbe far saltare gli elettroni dalla banda completamente piena alla banda completamente vuota, ma la differenza di energia è troppo grande quindi se diamo questo quantitativo di energia al materiale "si sfascia". In natura abbiamo anche i *semiconduttori*: in questo caso si ha che la differenza di energia (*gap energy*) per saltare da un orbitale pieno a uno vuoto è molto meno rispetto a un materiale isolante; quindi quando diamo sufficiente energia al nostro materiale si verifica che gli elettroni riescono a saltare sull'orbitale vuoto creando delle lacune nella di valenza con conseguente flusso di elettroni [12] [13].

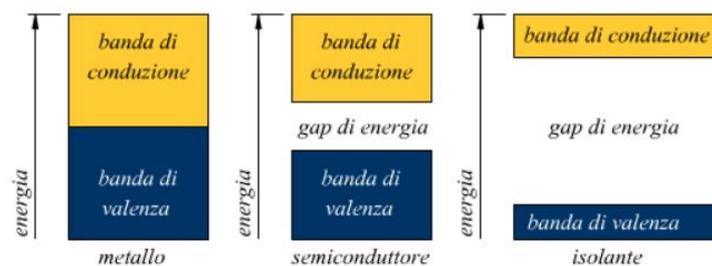


Figura 11- Rappresentazione grafica della distanza tra la banda di valenza e quella di conduzione: nei conduttori (metalli) le due bande sono attaccate, mentre nei semiconduttori e isolanti le bande sono caratterizzate da un "gap" [10].

Semiconduttore	Banda proibita $E_G$ (eV)
Carbonio	5.47
Silicio	1.12
Germanio	0.66
Stagno	0.082
Nitruro di Gallio	3.49
Arseniuro di Gallio	1.42
Fosfuro di Indio	1.35
Nitruro di Boro	7.50
Carburo di Silicio	3.26
Seleniuro di Cadmio	1.70

Tabella 1- Tabella con i valori del gap di energia fra la banda di valenza e conduzione di alcuni materiali semiconduttori a temperatura ambiente

La tecnologia fotovoltaica usa le caratteristiche dei semiconduttori. Principalmente viene usato il silicio che è l'elemento più abbondante in natura dopo l'ossigeno. Viene estratto allo stato "grezzo" di conseguenza si devono applicare processi di purificazione per poterlo impiegare nelle celle fotovoltaiche. La capacità di un semiconduttore di condurre corrente elettrica può essere aumentata, aggiungendo al cristallo di silicio piccole quantità di specifiche impurezze, un procedimento che prende il nome di drogaggio (*doping*) del semiconduttore. Il drogaggio si effettua principalmente con elementi del III o V gruppo della tavola periodica, in particolare tramite la sostituzione di *gallio* e *arsenico* in alcuni punti del cristallo (si dice anche che il silicio viene "contaminato"). Nel caso di drogaggio con l'arsenico la differenza di energia tra la banda di valenza e quella di conduzione del silicio rimangono intatte, ma la presenza del gallio, che mette in condivisione i propri orbitali, localizzati e vuoti, fa sì che gli elettroni della banda di valenza del silicio saltino sull'orbitale vuoto del gallio poiché la differenza di energia tra gli orbitali di valenza del silicio e quello vuoto del gallio è molto piccola (circa 0,1 eV), come rappresentato in *figura 13*. Gli orbitali vuoti del gallio vengono chiamati anche livelli accettori. Questo tipo di drogaggio viene chiamato di tipo *p* (positivo). Nel caso di drogaggio con l'arsenico abbiamo una situazione diversa rispetto al gallio, cioè anziché avere degli orbitali completamente vuoti, ha gli orbitali più esterni completamente pieni, ma molto vicini alla banda di conduzione del silicio. Andando a sollecitare il pannello, ad esempio con una radiazione solare, si ha che gli elettroni che si trovano sull'orbitale pieno dell'arsenico (livello donatore) saltino sulla banda di conduzione del silicio e quindi anche in questo

caso si ottiene un flusso ordinato di elettroni. Questo tipo di drogaggio, invece, viene chiamato di tipo  $n$  (negativo).

		IIIA		IVA		VA		VIA	
	5	6	7	8					
	B Boro	C Carbonio	N Azoto	O Ossigeno					
	13	14	15	16					
	Al Alluminio	Si Silicio	P Fosforo	S Zolfo					
30	31	32	33	34					
Zn Zinco	Ga Gallio	Ge Germanio	As Arsenico	Se Selenio					
48	49	50	51	52					
Cd Cadmio	In Indio	Sn Stagno	Sb Antimonio	Te Tellurio					
80	81	82	83	84					
Hg Mercurio	Tl Tallio	Pb Piombo	Bi Bismuto	Po Polonio					

Conduttori
Semiconduttori
Isolanti

Figura 12- Estratto tavola periodica che illustra gli elementi del III e del V gruppo [12].

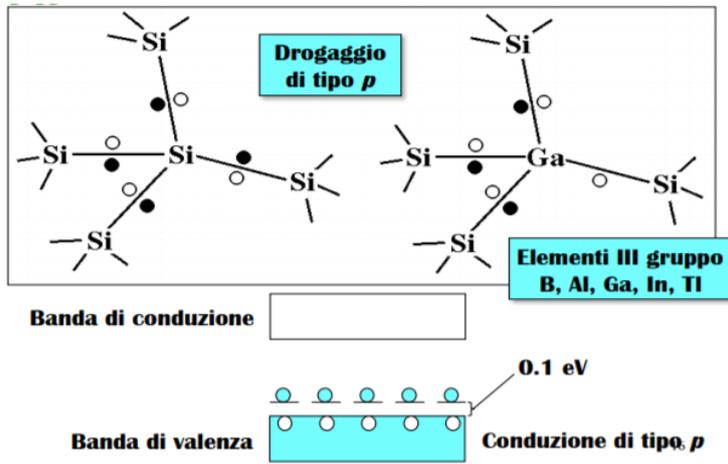


Figura 13- drogaggio di tipo  $p$  [13].

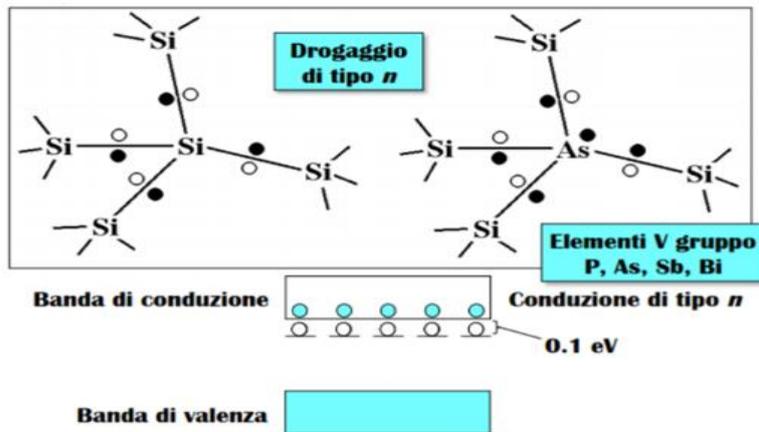


Figura 14- drogaggio di tipo  $n$  [13].

### Giunzioni p-n

Se in un cristallo di semiconduttore da un lato vengono introdotte impurità di tipo *p* e dall'altra impurità di tipo *n*, si forma una *giunzione p-n*. Mettendo a contatto i due materiali così ottenuti, si verifica un flusso di diffusione di elettroni dalla zona *n* alla zona *p* e di lacune in direzione opposta. Gli elettroni e le lacune si spostano fino al raggiungimento dell'equilibrio elettrostatico, che determina un eccesso di carica positiva nella zona *n*, un eccesso di elettroni nella zona *p* e una regione intermedia detta regione di svuotamento. Il risultato è un campo elettrico interno al dispositivo che si estende a cavallo della regione di svuotamento, generalmente spessa pochi micrometri. Quando la giunzione p-n è investita dalla parte del silicio di tipo *n* da un flusso luminoso questo cede energia agli atomi di Silicio portando alcuni elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione, liberando quindi, sia sul lato *n* che su quello *p*, delle coppie elettrone-lacuna, libere a questo punto di muoversi all'interno del semiconduttore. Il campo elettrico separa gli elettroni in eccesso, generati dall'assorbimento della luce dalle rispettive lacune, spingendoli in direzioni opposte: gli elettroni verso la zona *n* e le lacune verso la zona *p*. Una volta attraversato il campo, gli elettroni liberi non tornano più indietro, perché il campo, agendo come un diodo, impedisce loro di invertire la marcia.

Se si connette la giunzione p-n con un conduttore nel circuito esterno si otterrà un flusso di elettroni che parte dallo strato *n*, a potenziale maggiore, verso lo strato *p*, a potenziale minore. Fino a quando la cella resta esposta alla luce, l'elettricità fluisce con regolarità sotto forma di corrente continua.

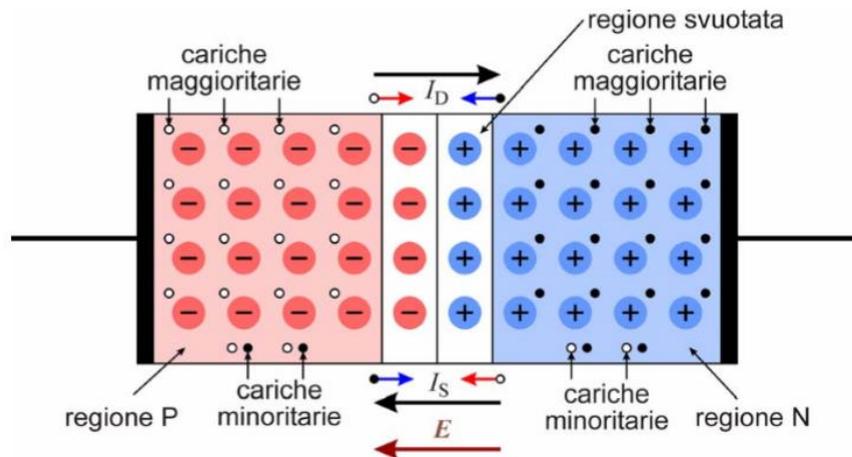


Figura 15- Rappresentazione grafica di una giunzione p-n [14].

Fatte tutte le precisazioni nei paragrafi precedenti possiamo definire *l'effetto fotovoltaico* come un fenomeno fisico che consiste nella conversione diretta della radiazione solare in energia elettrica. Nelle celle fotovoltaiche, quando un fotone con un determinato livello di energia viene assorbito all'interno di un materiale semiconduttore, si crea una coppia di cariche elettriche di opposto segno: un elettrone (negativo) e una lacuna (positiva). Queste cariche di segno opposto possono quindi condurre elettricità. Per produrre una corrente elettrica però, serve una differenza di potenziale. Questa differenza viene generata grazie alla presenza di piccole impurità, i "droganti", nel materiale di cui sono composte le celle. Queste modificano le proprietà elettriche del materiale semiconduttore (nel nostro caso silicio). Si creano quindi due strati: uno, a carica negativa, viene chiamato strato "n", mentre l'altro, a carica positiva, "p". In questa zona di separazione si ha la formazione di un forte campo elettrico. Le cariche positive e negative generate dalle radiazioni solari (fotoni) costituenti la luce solare vengono separate dal campo elettrico. Queste cariche producono una circolazione di corrente quando il dispositivo viene connesso ad un carico. Come si è visto nei paragrafi sopra non tutti i fotoni della luce solare sono uguali. Quelli utili per la produzione di energia elettrica tramite le celle fotovoltaiche sono quelli che possiedono una determinata quantità di energia (un determinato  $\lambda$ -lunghezza d'onda). Valore che dipende dal tipo di semiconduttore utilizzato nella cella fotovoltaica [12][14].

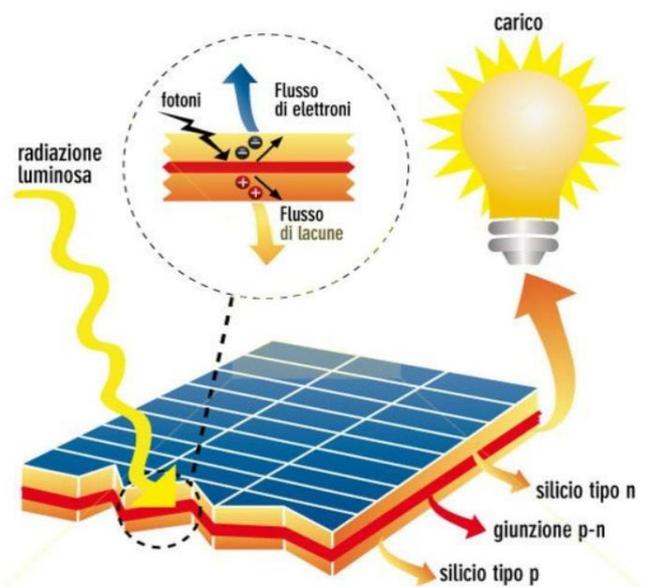


Figura 16 - Rappresentazione effetto fotovoltaico su una cella [15].

## 2.4. Caratteristiche e funzionamento della cella fotovoltaica

La cella fotovoltaica è l'unità elementare che consente la conversione della radiazione solare in corrente elettrica. Tale dispositivo, come si è visto, è costituito da un sottile strato di silicio opportunamente trattato chimicamente e meccanicamente. Generalmente la cella ha uno spessore variabile tra 0,25 e 0,35 mm ed una forma quadrata di superficie pari a 125 cm<sup>2</sup> e produce con un irraggiamento di 1 kW/m<sup>2</sup> ad una temperatura di 25 °C una corrente compresa tra i 3 e i 4 ampere e una tensione di 0,5 V. La cella fotovoltaica è sostanzialmente un diodo di grande superficie. La cella è provvista di opportune griglie conduttrici per convogliare gli elettroni nel circuito esterno. I materiali impiegati nelle celle devono essere molto puri affinché i portatori di carica non siano eccessivamente ostacolati nel loro cammino. La presenza di cariche significherebbe urti e quindi energia dispersa in calore a tal punto che l'elettrone potrebbe non essere in grado di completare il suo percorso nel semiconduttore. L'efficienza massima raggiunta in prove di laboratorio per le celle al silicio è di circa il 18% contro un valore teorico di efficienza di 24%. Una cella fotovoltaica a cui è applicato un carico esterno può avere due comportamenti: se si trova al buio è paragonabile a un diodo, se esposta alla luce si comporta come un generatore di corrente. Un buon modello elettrico equivalente per rappresentare la cella (e quindi anche il modulo fotovoltaico) è il modello del *generatore di corrente equivalente* riportato nella *figura 18*:

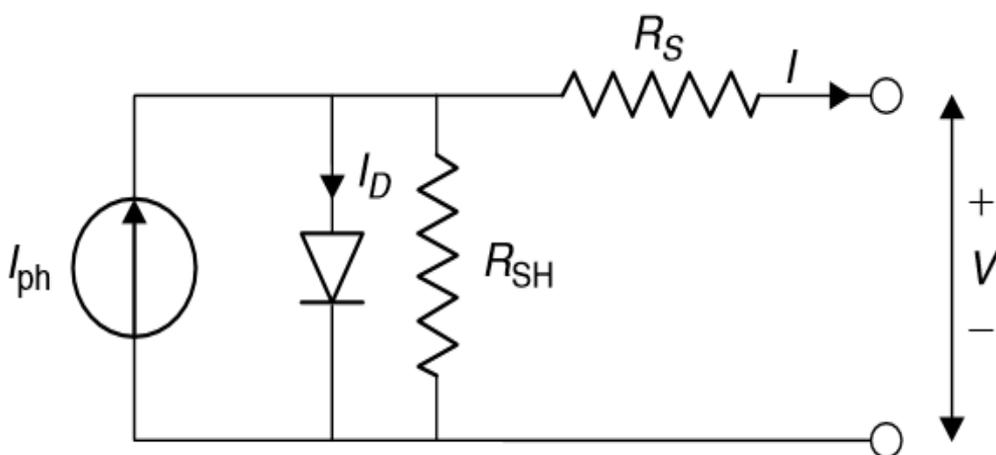


Figura 17- Generatore di corrente equivalente della cella fotovoltaica [16].

Dove:

- V [V – volt]: è la tensione nella cella; è un parametro molto influenzato dalla temperatura;
- I [A – ampere] è la corrente che attraversa la cella ed è direttamente proporzionale all'irraggiamento solare;
- $I_{ph}$  (o  $I_L$ ) [A- ampere] è la corrente fotovoltaica (*photocurrent*), ossia è la corrente che produce la cella quando viene illuminata;
- $I_D$  [A- ampere] è la corrente che attraversa la cella quando funge da diodo.

Oltre ai parametri elencati sopra, come mostrato nella *fig. 18* si hanno altri due parametri che rendono la cella fotovoltaica un generatore di corrente non ideale. In particolare, abbiamo:

- $R_s$  (resistenza serie): questa resistenza tiene conto di tutti quei fattori di perdita che la corrente incontra nel suo passaggio, per esempio la resistenza di contatto silicio-conduttore, la resistenza dei contatti superiori e inferiori della cella ecc.;
- $R_{sh}$  (*resistenza di shunt*): questa resistenza tiene conto di tutte le perdite interne della cella dovute a difetti di fabbricazione, errori di progettazione, non purezza dei materiali ecc.

La corrente netta prodotta dal modulo fotovoltaico, tenendo conto dei parametri riportati sopra, è data dalla differenza  $I_{ph}$  e  $I_D$ , più precisamente dalla formula:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (7)$$

Dove:

-k = costante dei gas di Boltzman =  $1.381 \times 10^{-23}$  [ J / K ];

-T = temperatura assoluta della cella [K];

-e = carica elementare dell'elettrone =  $1.6 \cdot 10^{-19}$  [C];

-V = tensione imposta attraverso la cella [V];

-  $I_0$  = corrente di saturazione del diodo, che dipende fortemente dalla temperatura [A] [15][12].

## 2.5. Curva caratteristica I-V di una cella solare e relativi parametri

Le celle fotovoltaiche sono caratterizzate da una curva I-V (corrente-tensione) dalla quale è possibile determinare le caratteristiche di quest'ultime. Le curve I-V sono riferite alle condizioni di prova STC (*Standard Test Conditions*), ovvero irraggiamento solare di  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura delle celle di  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e distribuzione spettrale AM (*air mass*) = 1,5.

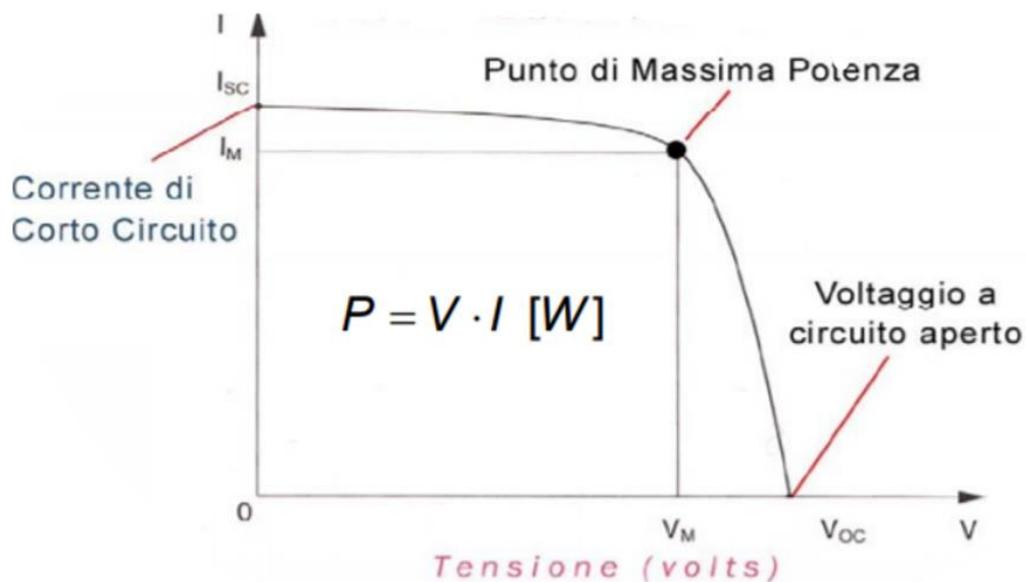


Figura 18 - Curva caratteristica corrente-tensione di una cella fotovoltaica [17].

Dal grafico che riporta la curva caratteristica I-V si definiscono i seguenti parametri:

- $V_{oc}$ : è la massima tensione che si registra quando il circuito è aperto (*open circuit*), ossia non vi è nessun collegamento di corto circuito tra i contatti metallici fronte-retro e quindi il nostro modulo registrerà la massima tensione. Si osserva in questo caso che  $I = 0$ ;
- $I_{sc}$ : è la massima corrente che si registra a corto circuito (*short circuit*). In questo si ha che  $V=0$ .

In condizioni di circuito aperto e di corto circuito la potenza estraibile sarà nulla, poiché nella relazione  $P = V \times I$  o la tensione o la corrente sono uguali a zero e la

potenza generata sarà quindi nulla. Si avrà invece potenza massima ( $P_{max}$ ) nel ginocchio della curva ossia per il prodotto  $I_{mp} \times V_{mp}$ , dove:

- $V_{mp}$ : è la tensione che si stabilisce ai capi del modulo fotovoltaico che permette l'erogazione della massima potenza alle condizioni STC;
- $I_{mp}$ : è la corrente che il pannello eroga quando si trova nelle condizioni STC e ai capi ha la tensione massima di potenza.

A questo punto si possono determinare altri due parametri che caratterizzano la cella fotovoltaica:

- *Fill Factor* (FF), fattore di riempimento, dato dal seguente rapporto:

$$FF = \frac{I_{sc} V_{oc}}{I_m V_m} \quad (8)$$

- Fattore di efficienza del modulo fotovoltaico, dato dal seguente rapporto:

$$\mu = \frac{I_m * V_m}{P_s} \quad (9)$$

Dove  $P_s$  è la potenza della luce solare incidente [15][16].

### *Effetto dell'irraggiamento e della temperatura sull'efficienza dei moduli*

Vediamo in breve come la temperatura e l'intensità della radiazione incidente influenzano la caratteristica elettrica e quindi l'efficienza di conversione di una cella solare. La fig.20 riporta l'andamento qualitativo della caratteristica elettrica della cella al variare della temperatura. Si osserva che un aumento di T provoca un aumento di  $I_{sc}$ , una sensibile diminuzione di  $V_{oc}$  ed una riduzione del FF, che porta ad un calo dell'efficienza di conversione

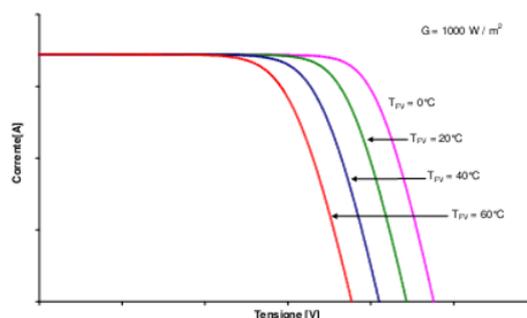


Figura 19– Effetto della temperatura sulla caratteristica I-V di una cella fotovoltaica [18].

Per quanto riguarda l'irraggiamento invece una sua riduzione comporta un drastico calo della corrente di corto circuito e quindi un netto calo della potenza erogata dal pannello fotovoltaico [17].

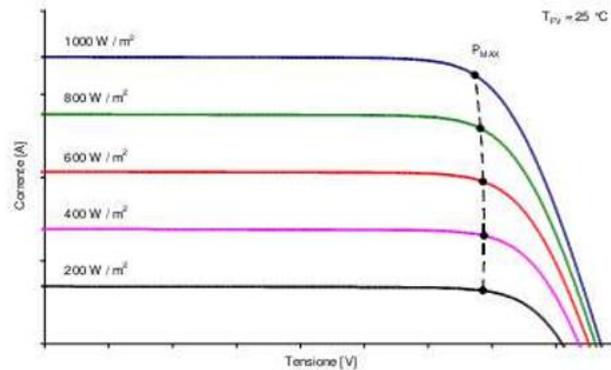


Figura 20– Effetto della riduzione della radiazione incidente sulla caratteristica I-V di una cella [18].

## 2.6. Tipologie di moduli fotovoltaici in silicio

Il silicio è il materiale più utilizzato per la produzione di celle fotovoltaiche (oltre il 90% dei moduli in commercio sono in silicio). Subito dopo l'ossigeno, è l'elemento più abbondante sulla terra ma in realtà questo materiale non esiste in forma pura ma solo sotto forma di Ossido di Silicio ( $\text{SiO}_2$ ) o di composti contenenti Si come la sabbia, il quarzo e l'argilla. Il silicio viene prima estratto dalle miniere e poi viene reso puro attraverso diversi processi chimici. Esistono, tuttavia, vari gradi di purezza: per l'industria fotovoltaica il grado di purezza stabilito deve essere 99,9% (Silicio di grado solare). Nell'industria fotovoltaica viene utilizzato nella sua forma cristallina (mono e poli) ed in quella amorfa. Nella forma cristallina gli atomi di Si sono ordinati in maniera regolare, mentre nella forma amorfa (come il vetro) sono distribuiti in maniera casuale. Il "lingotto" di silicio monocristallino normalmente ha un diametro di 20 cm, è alto circa un metro e pesa da 70 a 75 Kg. Ai lingotti di silicio una volta raffreddati vengono sagomati e tagliati a fette "wafer" che costituiscono la base per le celle finite. Nella fig. 22 si riporta schematicamente il processo produttivo del silicio:

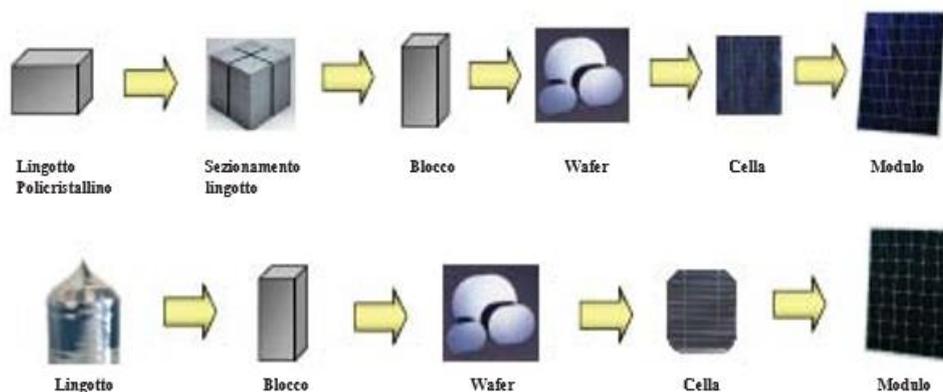


Figura 21- Rappresentazione delle fasi della lavorazione del silicio [20]

#### *Le celle in silicio monocristallino:*

Le celle dei moduli al silicio monocristallino sono costituite da un singolo cristallo di silicio. Allo stato puro gli atomi di silicio sono perfettamente allineati garantendo di conseguenza la massima conducibilità. La maggiore purezza del materiale garantisce un rendimento superiore (pari anche al 18%). Le celle FV si presentano di colore uniforme blu scurissimo e, solitamente, hanno forma ottagonale con uno spessore di circa 0,2 - 0,3 mm.

#### *Le celle in silicio Policristallino:*

Le celle fotovoltaiche in silicio policristallino hanno un'efficienza che va dal 12 al 14%, quindi un po' più basso rispetto le celle in silicio monocristallino. In proporzione anche il costo risulta però più basso. Il wafer di silicio policristallino non è strutturalmente omogeneo ma è organizzato in grani localmente ordinati. Maggiore è la grandezza del grano, minore è la possibilità di trovare le impurezze di bordo grano che causano perdite di ricombinazione elettrone-lacuna. Lo spessore di taglio dei dischi deve essere maggiore rispetto al monocristallino, in quanto si ha una minor resistenza meccanica (350÷450  $\mu\text{m}$  rispetto ai 200 del monocristallino).

#### *Le Celle in silicio amorfo:*

gli atomi di silicio vengono depositi chimicamente sulla superficie di sostegno, in forma strutturalmente disorganizzata. Questa tecnologia impiega quantità molto esigue di silicio (spessori dell'ordine del micron). I moduli in silicio amorfo mostrano

generalmente un'efficienza meno costante confrontandoli con le altre tecnologie rispetto ai valori nominali, pur avendo garanzie in linea con il mercato. La causa maggiore di perdita è causata dal piccolo spessore, che genera mancato assorbimento (quindi un'ulteriore riduzione delle lunghezze d'onda disponibili per superare l'energy gap) e per ricombinazione locale (che causa una riduzione delle prestazioni di oltre il 30% nel primo anno di vita, fino a “stabilizzazione” del materiale) [18].



Figura 22– Celle in silicio monocristallino, policristallino e amorfo [20].

## 2.7. La struttura di un modulo fotovoltaico

La struttura classica del modulo fotovoltaico prevede la connessione elettrica in serie delle celle che implementano l'effetto fotovoltaico precedentemente descritto. Questo tipo di connessione genera, a seconda del numero di wafer collegati, la tensione desiderata. Il numero di celle collegate in serie in un pannello viene progettato in modo da ottenere una differenza di potenziale elettrico del modulo pari a 12, 18 o 24 V, così da offrire la possibilità di collegare degli accumulatori di energia all'impianto di pari tensione nominale. Lo schema generale di un modulo fotovoltaico è il seguente:

- uno strato superiore di vetro temprato che ha il compito di assicurare trasmittanza termica, resilienza e resistenza meccanica;
- uno o più strati di EVA (etilene vinil acetato) per garantire l'isolamento;
- celle fotovoltaiche sulle quali viene depositata una griglia di conduzione;
- uno strato inferiore solitamente in materiale plastico come il Tedlar;
- una cornice in alluminio per racchiudere l'insieme. Le celle sono sigillate in un foglio EVA (acetato viniletilenico) e assemblate fra uno strato superiore di vetro e uno strato

inferiore di materiale plastico (ad esempio Tedlar). L'insieme viene spesso racchiuso in una cornice di alluminio [19].

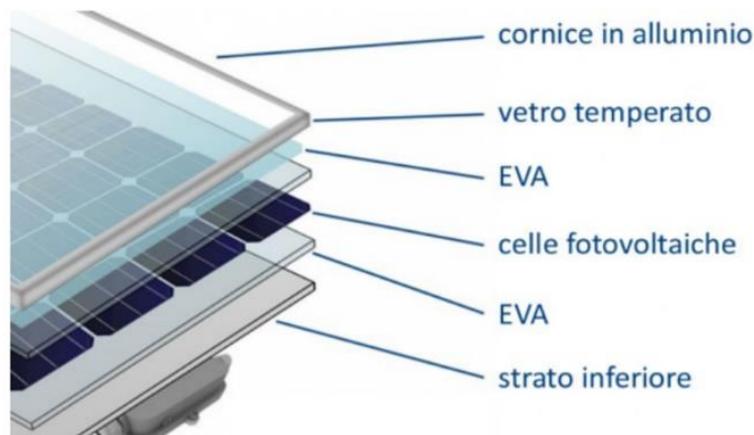


Figura 23 - Struttura di un modulo fotovoltaico [21].

## 2.8. Norma CEI EN 60891

La Norma CEI EN 60891 definisce tre procedure da seguire per le correzioni di temperatura e irraggiamento alle caratteristiche I-V misurate dai dispositivi fotovoltaici ad altre condizioni di temperatura e irraggiamento (come le STC-condizioni normalizzate di prova). Definisce anche le procedure utilizzate per determinare fattori importanti per la correzione di suddette curve. La prima è identica alla procedura indicata nella prima Edizione della presente Norma, ma l'equazione è stata riscritta per una più semplice comprensione. La seconda procedura è un metodo di correzione algebrica alternativa che fornisce risultati migliori per correzioni di irraggiamento elevate (>20 %). Entrambe le procedure richiedono che i parametri di correzione del dispositivo FV siano noti. Se non sono noti devono necessariamente essere determinati prima di effettuare la correzione. La terza procedura è un metodo di interpolazione che non richiede parametri di correzione in ingresso: si può applicare quando siano state misurate per il dispositivo di prova almeno tre curve corrente-tensione. Queste tre curve corrente-tensione coprono l'intervallo di valori di temperatura e irraggiamento per cui il metodo di correzione è applicabile.

### *Procedura di correzione 1*

La prima procedura prevede che le curve corrente-tensione misurate a condizioni ambientali devono essere corrette alle condizioni STC applicando le seguenti equazioni:

$$I_2 = I_1 + I_{sc} * \left( \frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha * (T_2 - T_1) \quad (10)$$

$$V_2 = V_1 + R_s * (I_2 - I_1) - k * I_2 * (T_2 - T_1) + \beta * (T_2 - T_1) \quad (11)$$

Dove:

$I_1, V_1$ : sono le coordinate dei punti delle caratteristiche misurate;

$I_2, V_2$ : sono le coordinate dei punti corrispondenti delle caratteristiche corrette;

$G_1$ : è l'irraggiamento misurato con il dispositivo di riferimento;

$G_2$ : è l'irraggiamento all'irraggiamento normalizzato (STC);

$T_1$ : è la temperatura misurata del campione in prova;

$T_2$ : è la temperatura normalizzata;

$I_{sc}$ : è la corrente di cortocircuito misurata del campione in prova a  $G_1$  e  $T_2$ ;

$\alpha$  e  $\beta$ : sono i coefficienti di temperatura della corrente e della tensione del campione in prova in condizioni normalizzate di irraggiamento;

$R_s$  è la resistenza serie interna del campione in prova;

$k$  è un fattore di correzione della curva.

L'equazione (10) è applicabile solo alle curve I-V misurate ad irraggiamenti che sono costanti durante l'acquisizione dell'intera curva I-V. Per simulatori solari a impulsi con irraggiamento decrescente o qualsiasi altro tipo di fluttuazione dell'irraggiamento durante la misura I-V, l'Equazione (10) non è applicabile in questa forma. In questo caso, ciascuna curva I-V misurata deve essere corretta ad una curva I-V equivalente,

ad un irraggiamento costante che richieda un fattore supplementare di scala in rapporto a ISC. Per ragioni pratiche questo fattore di scala è rapportato all'irraggiamento corrispondente all'ISC misurato. Per un irraggiamento non costante, l'Equazione (x) diverrà l'equazione di trasposizione che segue:

$$I_2 = I_1 + \frac{G'_1}{G_{SC}} * I_{SC} * \left( \frac{G_2}{G'_1} - 1 \right) + \alpha * (T_2 - T_1) \quad (12)$$

Dove:

$G_{SC}$ : è il valore di irraggiamento al momento della misura di  $I_{SC}$ ;

$G'_1$ : è l'irraggiamento misurato al momento dell'acquisizione dei dati dei singoli punti della curva I-V

### *Procedura di correzione 2*

Questa procedura si basa sul modello semplificato dei dispositivi FV a singolo diodo. Le equazioni di trasposizione semi-empiriche contengono 5 parametri di correzione I-V che possono essere determinati dalla misura delle curve I-V eseguita in diverse condizioni di irraggiamento e temperatura. Oltre ai coefficienti di temperatura per la corrente di cortocircuito ( $\alpha$ ) e per la tensione a circuito aperto ( $\beta$ ) è comunemente usato un coefficiente di temperatura supplementare ( $k'$ ) che tiene conto delle variazioni della resistenza serie interna (e del fattore di riempimento) con la temperatura.

La procedura di correzione è definita dalle seguenti equazioni per la corrente e la tensione:

$$I_2 = I_1 * (1 + \alpha_{rel} * (T_2 - T_1)) * \frac{G_2}{G_1} \quad (13)$$

$$V_2 = V_1 + V_{OC1} * \left( \beta_{rel} * (T_2 - T_1) + a * \ln\left(\frac{G_2}{G_1}\right) \right) - R'_S * (I_2 - I_1) - k' * I_2 * (T_2 - T_1) \quad (14)$$

Dove

$I_1, V_1$ : sono le coordinate dei punti della caratteristica I-V misurata;

$I_2, V_2$ : sono le coordinate dei punti corrispondenti della curva I-V corretta;

$G_1$ : è l'irraggiamento misurato dal dispositivo di riferimento;

$G_2$ : è l'irraggiamento obiettivo per la caratteristica I-V corretta;

$T_1$ : è la temperatura misurata del campione in prova;

$T_2$ : è la temperatura obiettivo del campione in prova;

$V_{OC1}$ : è la tensione a circuito aperto nelle condizioni di prova;

$\alpha_{rel}$  e  $\beta_{rel}$ : sono i coefficienti relativi di temperatura della corrente e della tensione del campione in prova misurato a 1 000 W/m<sup>2</sup>. Essi sono relativi alla corrente di cortocircuito e alla tensione a circuito aperto a STC;

$a$ : è il fattore di correzione dell'irraggiamento per la tensione a circuito aperto, legato alla tensione termica del diodo D della giunzione *p-n* e al numero di celle  $n_S$  collegate in serie nel modulo;

$R'_S$  è la resistenza serie interna del campione in prova;

$k'$  è interpretato come il coefficiente di temperatura della resistenza serie interna  $R'_S$ .

OSS. Un valore tipico per il fattore di correzione dell'irraggiamento  $a$  è 0,06.

### *Procedura di correzione 3*

Questa procedura si basa sull'interpolazione o sull'estrapolazione lineare di due caratteristiche I-V misurate. Essa utilizza almeno due caratteristiche I-V, e non richiede parametri di correzione o di adattamento. Le caratteristiche corrente-tensione misurate devono essere corrette alle condizioni di prova normalizzate o ad altri valori scelti di temperatura e irraggiamento applicando le corrispondenti equazioni. La procedura 3 non verrà approfondita in quanto il nostro interesse ricade solo sulle procedure 1 e 2.

Per quanto riguarda i parametri di correzione delle curve I-V delle equazioni (10), (12), (13), (14), in particolar modo:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $R_S$  e  $k$  per la prima procedura e  $\alpha_{rel}$ ,  $\beta_{rel}$ ,  $a$ ,  $R'_S$  e  $k'$  per la seconda procedura, la normativa definisce metodi sperimentali ben precisi per la loro determinazione. In questa tesi si illustrerà il metodo sperimentale della seconda procedura di correzione, dato che, come si vedrà nel capito 4, si sono considerate le

indicazioni proprio di quest'ultima per svolgere le prove sperimentali e arrivare ai risultati di  $a$ ,  $R'_s$  e  $k'$ . Per quanto riguarda la determinazione di  $a$  e  $R'_s$  la procedura indica quanto riportato di seguito:

- Tracciare le curve caratteristiche corrente-tensione del campione in prova a temperatura costante e a tre o più irraggiamenti differenti ( $G_1 \dots G_N$ ) coprendo l'intervallo di valori di interesse entro i quali deve essere effettuata la trasposizione della curva. I valori esatti degli irraggiamenti non devono essere necessariamente noti. Durante le misure I-V la temperatura del dispositivo deve essere stabile entro  $\pm 2$  °C. Tracciare le curve I-V in un diagramma come in *fig. 24a*;
- Supponendo che  $I_{SC1}$  sia la corrente di cortocircuito della caratteristica I-V registrata all'irraggiamento più alto  $G_1$ , trasporre sequenzialmente tutte le altre curve ( $N-1$ ) registrate ad un irraggiamento inferiore ( $G_2 \dots G_N$ ) in  $G_1$ , usando  $R'_s = 0 \Omega$ ,  $a = 0$  come valori iniziali usando le equazioni (13) e (14). Quindi tracciare le curve I-V in un diagramma come in *fig. 24c*;
- Aumentare il parametro " $a$ " dell'equazione (14) in passi di 0,001 e mantenere  $R'_s = 0 \Omega$ . Il valore appropriato di " $a$ " è stato determinato, quando le tensioni a circuito aperto ( $V_{oc}$ ) delle caratteristiche I-V trasposte coincidono con una tolleranza di  $\pm 0,5$  % o migliore (come in *fig. 24b*);
- Fissato " $a$ ", variare  $R'_s$  in passi di 10 m $\Omega$  (0,01 $\Omega$ ) in direzione positiva o negativa. Il valore appropriato di " $R'_s$ " è stato determinato quando lo scostamento dei valori della potenza massima di uscita delle caratteristiche I-V trasposte coincide con una tolleranza di  $\pm 0,5$  % o migliore. La rappresentazione finale delle curve I-V sarà come in *fig. 24d*.

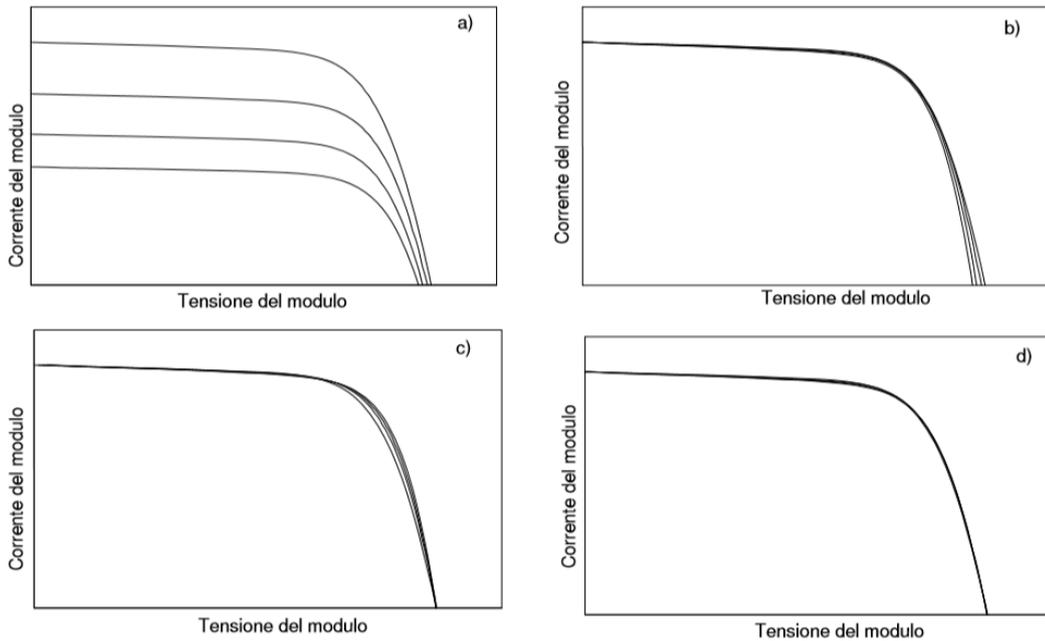


Figura 24 - Determinazione del fattore di correzione di irraggiamento (a) e resistenza serie interna ( $R'S$ ): a) Caratteristiche I-V misurate ad irraggiamenti differenti e temperatura costante; b) Caratteristiche I-V corrette in  $a=0$  e  $R'S=0 \Omega$ ; c) Caratteristiche

Di seguito si elencano i passaggi sperimentali indicati dalla norma CEI EN 60891 per determinare il fattore di correzione della curva  $k'$ :

- Tracciare le caratteristiche corrente-tensione del campione in prova ad un irraggiamento costante e a diverse temperature ( $T_1 \dots T_N$ ) che coprono l'intervallo di valori di interesse entro il quale deve essere realizzata la trasposizione della curva. Durante le misure I-V l'irraggiamento non deve scostarsi di più del  $\pm 1 \%$ . Il valore di irraggiamento deve trovarsi entro l'intervallo di valori usato per determinare i parametri di correzione dell'irraggiamento. Rappresentare il diagramma delle curve I-V come in *fig. 25a*;
- Supponendo che  $T_1$  sia la minima temperatura del dispositivo, trasporre sequenzialmente tutte le altre curve ( $N-1$ ) registrate a temperature più alte ( $T_2 \dots T_N$ ) in  $T_1$  usando  $k' = 0 \Omega/K$  nell'equazione (14). Tracciare le curve I-V corrette in un diagramma come in *fig. 25b*;

- Iniziando da 0 mΩ/K variare  $k'$  in passi di 1 mΩ/K in direzione positiva o negativa. Il valore appropriato di  $k'$  è stato determinato se lo scostamento dei valori della potenza massima di uscita delle caratteristiche I-V trasposte coincide con una tolleranza di  $\pm 0,5\%$  o migliore (come in *fig. 25c*).

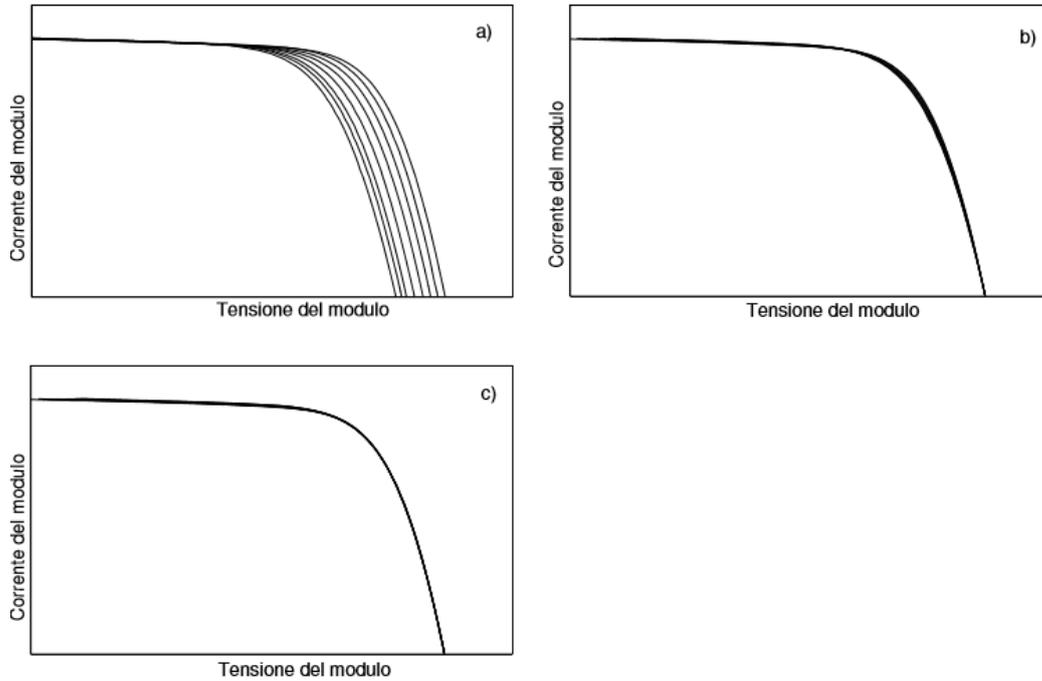


Figura 25 - Determinazione del fattore di correzione della curva  $k'$ : a) Caratteristiche I-V misurate a diverse temperature del dispositivo; b) Caratteristiche I-V corrette in temperatura con  $k' = 0 \text{ } \Omega/\text{K}/\text{K}$ ; c) Caratteristiche I-V corrette con  $k' = \text{ottimale}$ .

## CAPITOLO 3

### 3. SIMULATORE SOLARE DI PROVA

Di seguito viene riportata e descritta la strumentazione utilizzata nel corso della campagna sperimentale svolta nei laboratori del dipartimento DIISM dell'Università Politecnica Delle Marche. Il capitolo inizia con una breve descrizione della tecnologia dei simulatori solari per poi descrivere il modello usato per la sperimentazione in oggetto. In particolare, si descriveranno tutti i componenti che costituiscono il simulatore e come questi ultimi sono collegati tra di loro per arrivare a tracciare le curve tensione-corrente, oggetto principale di questo studio.

#### 3.1. Funzionamento di un simulatore solare

I simulatori solari (*solar simulators*) misurano le prestazioni in uscita di un modulo fotovoltaico tramite una procedura standard con la quale i produttori controllano che le caratteristiche di fabbrica dichiarate sulla scheda tecnica dei moduli siano rispettate. La tecnologia del simulatore solare consiste nel mandare contro il pannello in prova una sorgente luminosa che può essere pulsata (*flash test*) oppure continua. Generalmente i più utilizzati sono quelli a luce pulsata in quanto costituiti da lampade allo xeno in grado di riprodurre fedelmente lo spettro solare standard imposto dalle STC, ossia 1,5 AM (air mass). Durante il flash test, il modulo fotovoltaico viene esposto al lampo di luce per circa da 1ms ad un massimo di 30 ms e a un irraggiamento di  $1000 \text{ w/m}^2$ . L'*output* viene raccolto e rielaborato da un *software* installato su un computer collegato al simulatore. Il *software* dopo il *flash* è in grado di tracciare le curve corrente-tensione e riportare i valori dei principali parametri ( $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$  ecc.). Di seguito si riporta una figura che illustra tale grafico. I parametri e i dati misurati del modulo sono ottenuti in condizioni di prova standard (STC).

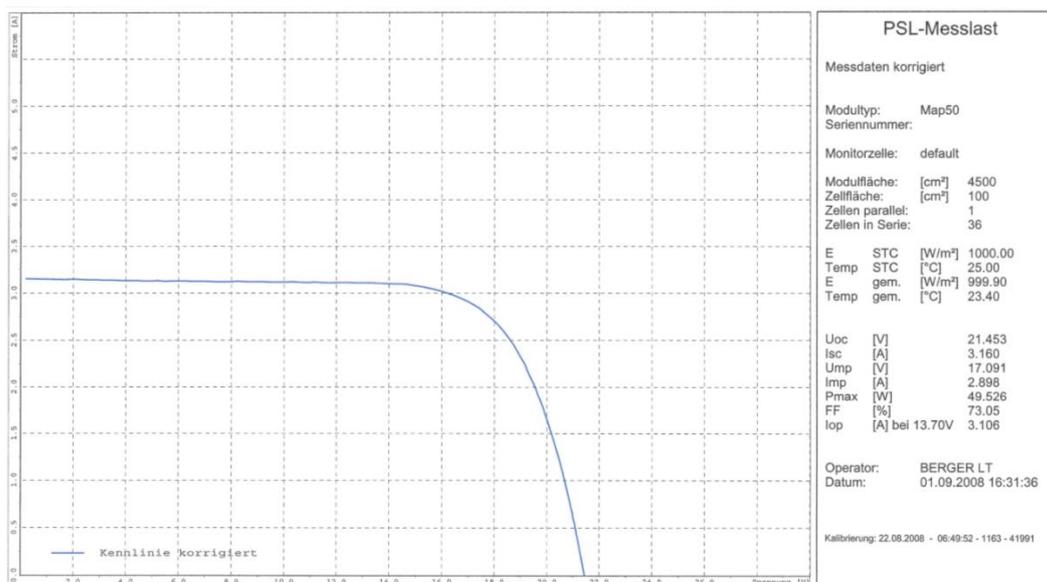


Figura 26 - curva restituita dal software PSL8

Secondo la norma UNI IEC 60904 il simulatore solare “ideale” dovrebbe avere una variazione nel livello di luce, durante il periodo di misurazione I-V inferiore a  $\pm 1\%$ , una variazione spaziale nell'irradianza nel piano di misura, e al di sopra, di  $\pm 1\%$ , e introdurre un errore spettrale minore di  $\pm 1\%$  tra la cella in esame e quella di riferimento. Questi vincoli sono essenziali per garantire un'incertezza nell'efficienza minore del  $\pm 2\%$ .

### 3.2. Il simulatore solare Berger Lichttechnik PSS8

Il simulatore Berger Lichttechnik PSS8 è quello utilizzato per la sperimentazione svolta in questa tesi. Il sistema è costituito da un simulatore solare pulsato (PSS), un dispositivo di misurazione e di carico (carico solare pulsato, PSL), un rilevatore a infrarossi (IR), un sensore Pt100, un computer con *software* dedicato per l'acquisizione di curve IV e un sistema a torre. Il PSS include un generatore di corrente e una sorgente luminosa a lamella senza elementi ottici per un'illuminazione omogenea e riproducibile. Il dispositivo soddisfa tutti i requisiti della norma IEC 60904-9, mentre la costruzione della sorgente luminosa a lamella e il tubo flash brevettato garantiscono la conformità a vita con questo standard. Il PSL è un dispositivo controllato da un processore con tre canali, utilizzato per misurare e simulare lo spettro solare. Questo permette di determinare le curve I-V dei moduli fotovoltaici, secondo la norma IEC 60904-1. Il rilevatore IR è un sistema di misurazione a infrarossi senza contatto con

testina a sensore esterna che consente l'acquisizione automatica della temperatura del modulo. Il sensore PT100, invece, è un rilevatore di temperatura a resistenza che consente l'acquisizione della temperatura ambiente e della cella. Tramite il *software* PSL, installato nel computer dedicato, vengono acquisiti, memorizzati e visualizzati tutti i dati rilevanti relativi alle curve I-V. Il sistema *tower* offre un ambiente di test stabile per una migliore uniformità e ripetibilità dei test. Nella fig. 27 si riporta una rappresentazione schematica del simulatore

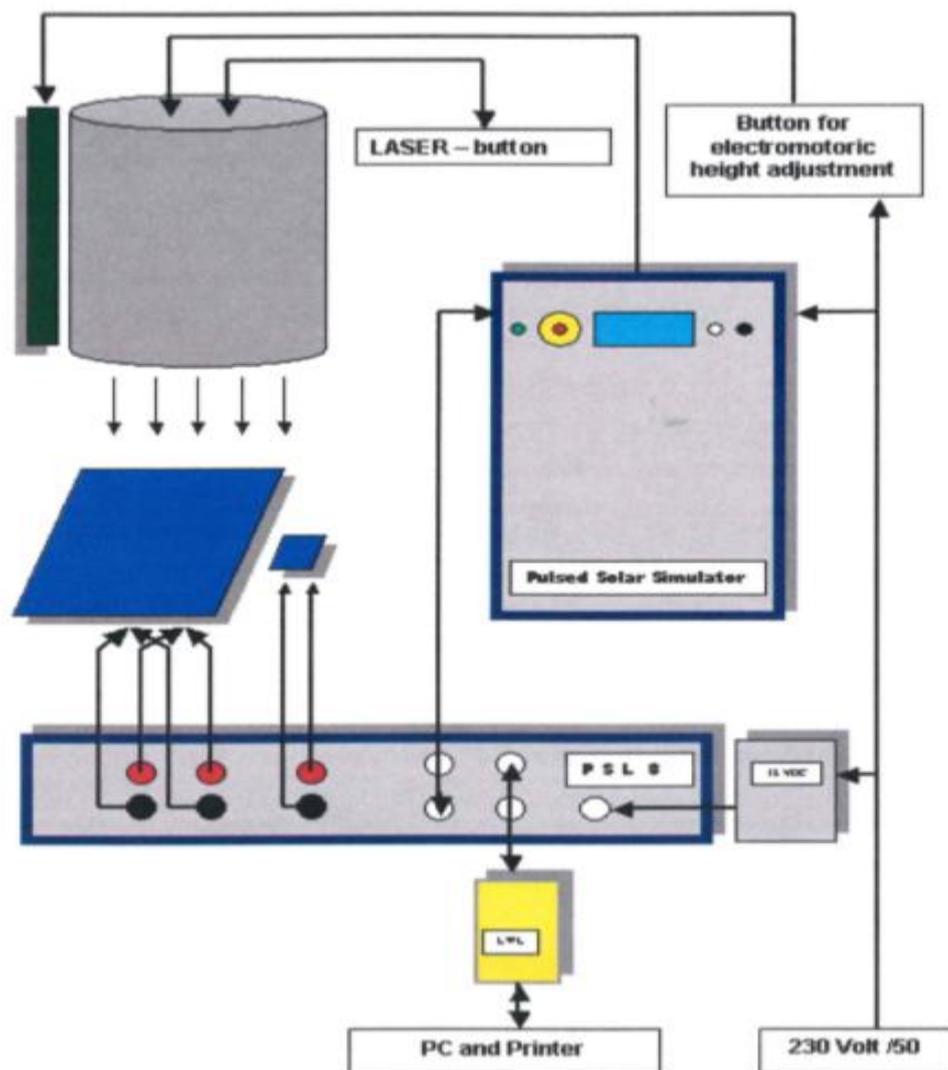


Figura 27 - Rappresentazione schematica del simulatore solare Berger Lichttechnik PSS8

### 3.3. Componenti del simulatore e il loro collegamento

#### *Lampada ad arco allo Xeno*

Il primo componente del simulatore che viene montato è la lampada allo xeno che poi andrà collegata al generatore di potenza.

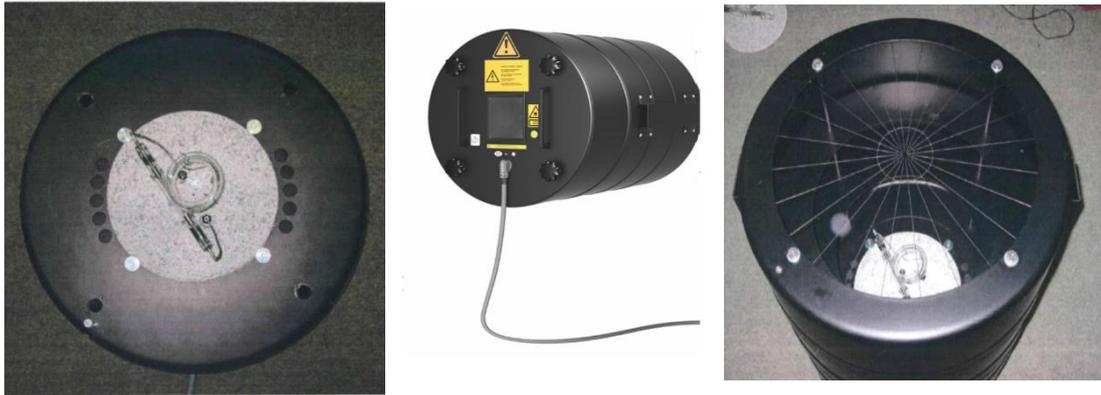


Figura 28 - Lampada allo Xeno del simulatore di prova

La lampada allo xeno è una particolare lampada ad arco che utilizza gas xeno per produrre una luce molto intensa e bianca simile alla luce solare. Queste lampade sono usate per creare un *flash* molto intenso. Sono studiate per produrre un lampo estremamente intenso per un periodo di tempo brevissimo. Il gas contenuto è una miscela di xeno ed altri gas in quantità minori. La pressione del gas può andare da pochi kilopascal a decine di kilopascal (0,01-0,1 atm). A causa della bassa temperatura del gas, lo spettro luminoso presenta molte linee spettrali che danno il caratteristico colore bianco alla luce del *flash*. La forma del vetro può essere a tubo lineare, a elica, a U o circolare (nel nostro caso è lineare). Oltre ai due elettrodi di alimentazione è presente un terzo elettrodo di innesco (che può essere interno al tubo o sotto forma di anello all'esterno del vetro) a cui viene applicato un impulso ad alta tensione per innescare l'arco. L'impulso elettrico provoca la ionizzazione del gas, il quale improvvisamente abbassa la sua resistenza elettrica e si lascia attraversare da una corrente molto intensa, di centinaia di ampere. L'energia necessaria è accumulata in un condensatore caricato con tensioni di centinaia o migliaia di volt a seconda del tubo. La durata di ogni scarica spazia dai microsecondi ai millisecondi, e la frequenza di ripetizione dei lampi può arrivare a centinaia di hertz [20].

### *Il generatore di potenza*

Come descritto anche sopra, al generatore viene collegata la lampada allo xeno il quale eroga una potenza costante per far avvenire il *flash*.



*Figura 29 - Generatore di potenza del simulatore*

Dopo aver collegato al generatore la lampada, un altro elemento fondamentale per il funzionamento del simulatore solare è il carico elettronico (PSS8) al quale si devono collegare i seguenti elementi (come mostrato in *fig. 30*):

- Sensore IR (infrarossi);
- Cella di riferimento;
- Fili con i relativi connettori per collegare il modulo fotovoltaico;
- Pt100 (rilevatore di temperature);
- Computer.



Figura 30 - Carico del simulatore a cui deve essere collegati i connettori del modulo FV e i seguenti dispositivi: Sensore IR (infrarossi), Cella di riferimento, Pt100 (rilevatore di temperature) e Computer

### Sonda Pt100

Una sonda Pt100 è una termoresistenza al platino con resistenza basata sulla caratteristica, comune a tutti i conduttori e i semiconduttori, di modificare la propria resistenza elettrica al variare della temperatura. Il sensore Pt100 ha un valore ohmico pari a 100 ad una temperatura di 0°C ed il suo coefficiente di variazione è di 0,00385 ohm per °C. La tecnologia è adatta a soddisfare i moderni requisiti rivolti a misure più precise prevede l'utilizzo di sottilissimi strati di platino su un substrato di ceramica (resistori a film sottile) [21].

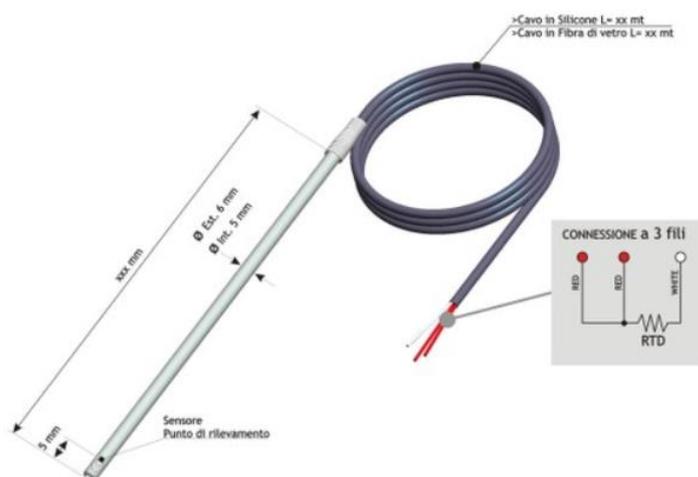
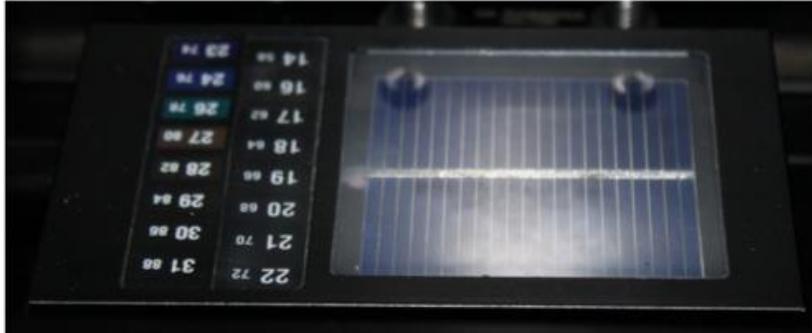


Figura 31 - Rilevatore di temperatura: sonda Pt100

### *Cella di riferimento*

Un altro elemento indispensabile per la piena funzionalità di un simulatore solare è la cella di riferimento. Si tratta di una porzione di cella fotovoltaica, incapsulata (in modo tale da porla a riparo da ossidazione e da altri processi che portano al degrado delle prestazioni) che funge da sensore di irradianza.



*Figura 32 - Cella di riferimento usata dal simulatore solare*

### *Torre verticale*

Per velocizzare le prove e svolgerle in sicurezza, il banco di prova, la lampada, la cella di riferimento e il PSL vengono alloggiati dentro un tunnel verticale dove viene simulato lo spettro solare. La torre è un sistema a telaio composta da aste verticali e orizzontali predisposte per formare un “tunnel” rettangolare. Dopo il fissaggio dei montanti, la struttura viene chiusa con dei pannelli di plastica fissati ai medesimi montanti. Inoltre, la torre è dotata di un impianto elettrico collegato ad un compressore ad aria compressa che attraverso l’apertura e la chiusura di un interruttore si alza la porta frontale della torre per posizionare i moduli sul banco di prova. Anche la torre come tutte le altre parti è certificata e dotata di schede tecniche per l’installazione e manuali per l’utilizzo in sicurezza.



Figura 33 - Torre verticale dove viene emesso il flash contro il modulo FV.

### *Calibrazione del software*

Collegate tutte le componentistiche del simulatore si procede alla calibrazione del software PSL installato su un computer con sistema windows compatibile. Il software dopo essere stato calibrato è in grado di rielaborare i dati acquisiti e restituirci le curve I-V con i principali parametri  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$  ecc. Inoltre, il software è in grado di operare la correzione in automatico delle curve I-V alle condizioni STC. La sperimentazione è partita proprio da questo: in commercio vi sono aziende che apportano le correzioni delle curve I-V nominali alle STC, queste però non forniscono alcuna informazione su come ottengono i parametri che utilizzano nelle procedure 1 e 2 della norma IEC EN 60891. Con questa sperimentazione, seguendo le procedure indicate dalla stessa norma, si vogliono determinare i valori dei coefficienti per eseguire le correzioni delle curve I-V all'STC.

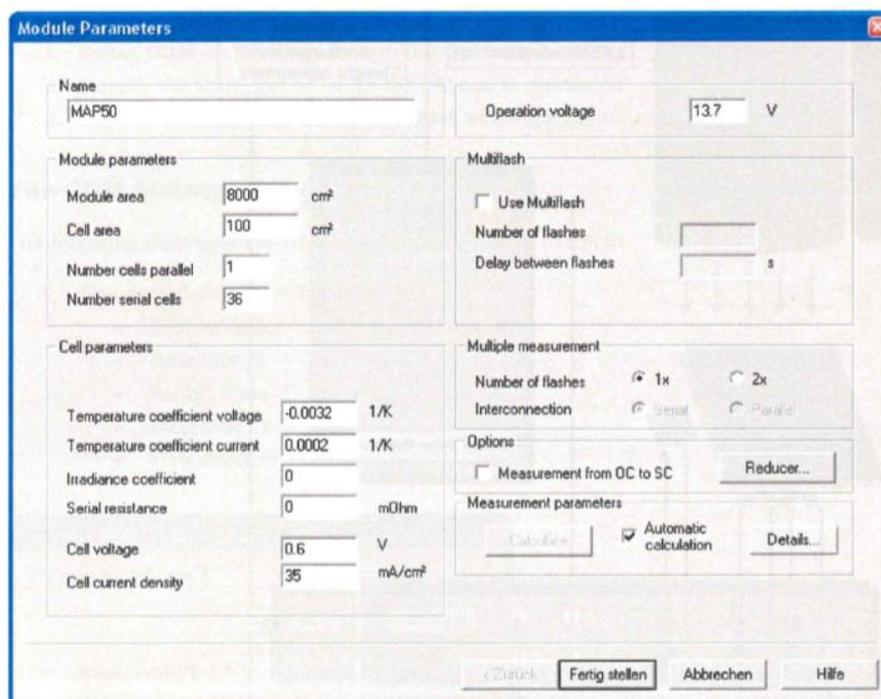


Figura 34 - finestra generica del software da calibrare, in questo caso devono essere indicati i parametri del modulo: area celle, numero di celle in serie

## CAPITOLO 4

### 4. PROVE SPERIMENTALI EFFETTUATE

In questo capitolo si illustreranno i metodi sperimentali effettuate in accordo con la seconda procedura di correzione della norma EN 60891 al fine di determinare i parametri  $a$ ,  $R'_s$  e  $k'$  che sostituiti nelle equazioni (13) e (14) permettono di fare la correzione delle curve I-V alle STC (*Standard Test Conditions*).

#### 4.1. Moduli fotovoltaici su cui si sono svolte le prove

Le prove si sono svolte su cinque moduli fotovoltaici acquistati da un unico produttore. I moduli hanno una potenza nominale di 240 Wp e sono caratterizzati da 60 celle collegate in serie realizzate in silicio policristallino. I principali parametri ( $P_{max}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $U_{mpp}$  ecc.) sono stati determinati a  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $1,5 \text{ AM}$ . Di fondamentale importanza per il nostro studio sono anche le caratteristiche termiche riportate sul *data sheet* dei moduli, in particolar modo si osserva il coefficiente di temperatura alla  $I_{sc}$  (massima corrente a cortocircuito) e il coefficiente di temperatura alla  $U_{oc}$  (massima tensione a circuito aperto). I valori di questi due coefficienti, come riportato nella scheda tecnica del modulo, sono rispettivamente  $-0,46 \text{ \%}/\text{K}$  e  $+3,69 \text{ mA}/\text{K}$ . Questi due parametri non sono altro che  $\alpha_{rel}$  e  $\beta_{rel}$  che in seguito andranno a sostituiti nelle equazioni (13) e (14) per effettuare le correzioni delle curve I-V. Di seguito, nella *fig. 35*, si riporta la scheda tecnica dei moduli fotovoltaici usati per la prova sperimentale. I valori riportati sul *data sheet* sono molto importanti perché servono per verificare che il modulo funzioni normalmente e che non abbia subito nessun tipo di danneggiamento.

## Caratteristiche tecniche / Technical Characteristics

CELLE / Cells	60 in silicio policristallino da 156x156mm / 60 polycrystalline 156x156mm
CORNICE / Frame	Profilo in alluminio anodizzato / Anodized aluminium profile
RIVESTIMENTO FRONTALE / Superstrate	Vetro temprato da 4mm / Tempered glass thickness 4mm
INCAPSULAMENTO CELLE / Encapsulation	EVA (Ethylene-Vinyl-Acetate)
RIVESTIMENTO POSTERIORE / Backsheet	Tedlar / PET / Tedlar o PYE / Tedlar / PET / Tedlar or PYE
J-BOX / J-Box	1 scatola con 3 diodi di bypass / 1 box with 3 bypass diodes
CONNETTORI / Connectors	"Tyco" compatibili / "Tyco" compatible
CABLAGGI / Cables	2 cavi da 1000mm / 2 solar cables, length 1000mm
DIMENSIONI / Dimensions	1664x995mm (+/- 1 mm)
SPESSORI / Thickness	40mm (+/- 1mm)
PESO / Weight	23 kg (+/- 1 kg)
DIMENSIONI mod. FRAMELESS / Frameless Dimensions	1658x990x5mm - 20 kg
CARICO MASSIMO SUPERFICIALE / Max load	540 kg/m <sup>2</sup>
RESISTENZA IMPATTO GRANDINE / Hail strength	Ø 25mm a 83 km/h / Ø 25mm at 83 km/h

## Caratteristiche termiche / Thermic Characteristics

(Condizioni di prova standard: irradiazione 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura 25° C +/- 2° C, spettro AM 1,5)  
 (Standard Test conditions: irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>, temperature 25° C +/- 2° C, spectrum AM 1,5)

COEFF.TEMP.Pmax / Pmax Temp. Coeff	-0,46	%/K
COEFF.TEMP.Uoc / Uoc Temp. Coeff	-133,8	mV/K
COEFF.TEMP.Isc / Isc Temp. Coeff	+3,69	mA/K
NOCT	44	°C
INTERVALLO DI TEMPERATURA / Temp.range	da -40°C a 85°C / from -40°C to 85°C	

## Caratteristiche elettriche / Electrical Characteristics

(Condizioni di prova standard: irradiazione 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura 25° C +/- 2° C, spettro AM 1,5)  
 (Standard Test conditions: irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>, temperature 25° C +/- 2° C, spectrum AM 1,5)

MASSIMA POTENZA (tolleranza +/- 3%) Maximum power (tolerance +/- 3%)	Pmax	200	205	210	215	220	225	230	235	240	Wp
CORRENTE ALLA MASSIMA POTENZA Current at point of maximum power	Imp	7,06	7,17	7,25	7,33	7,44	7,53	7,61	7,70	7,78	A
TENSIONE ALLA MASSIMA POTENZA Voltage at point of maximum power	Umpp	28,31	28,60	28,96	29,32	29,56	29,90	30,22	30,54	30,86	V
CORRENTE DI CORTO CIRCUITO Short Circuit Voltage	Isc	7,69	7,77	7,83	7,89	7,96	8,03	8,11	8,17	8,24	A
TENSIONE A CIRCUITO APERTO Open Circuit Voltage	Uoc	36,44	36,64	36,82	37,02	37,26	37,40	37,48	37,52	37,56	V
MASSIMA TENSIONE DI SISTEMA Maximum System Voltage		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	V
EFFICIENZA DEL MODULO Module Efficiency	Eff	12,09	12,39	12,69	12,99	13,30	13,60	13,90	14,20	14,50	%

Figura 35 - Scheda tecnica dei moduli fotovoltaici impiegati nelle prove sperimentali

## 4.2. Prove per controllare la funzionalità dei moduli fotovoltaici

Le prime prove che si sono effettuate con il simulatore consistono nella verifica che, in primis, questi ultimi non fossero danneggiati, ma in particolar modo si è voluto controllare la rispondenza della potenza massima erogata dichiarata dal produttore sulla scheda tecnica. Per determinare la potenza massima erogata dai cinque pannelli fotovoltaici si sono generate, tramite il simulatore e il *software*, le curve I-V di questi ultimi. Ogni modulo è stato inserito all'interno della torre sull'apposito supporto. In seguito, su tutti i moduli, è stato fatto partire il *flash* prodotto dalla lampada xeno collegata al generatore di potenza e al *software* PSL. Il *software* ci ha restituito sul computer la rappresentazione grafica delle curve I-V dei moduli testati alle condizioni operative di prova e la relativa traslazione di queste ultime alle STC. Oltre che alla correzione delle curve I-V, il *software* riporta il valore dei principali parametri ( $P_{max}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $U_{mpp}$ ) e restituisce in *output* un file CSV (foglio Excel) con il valore delle coppie di tutti i punti della curva corrente-tensione. Per ogni modulo sono stati effettuati 20 flash test da cui tramite il file CSV elaborato dal software si sono determinate le potenze massime alle condizioni di prova ( $P_{mes}$  MAX) e la potenza massima corretta alle condizioni standard ( $P_{LT}$  MAX). Di seguito si riportano le tabelle con i risultati per ogni modulo. Conseguentemente, dai valori ottenuti si è calcolato lo scostamento percentuale della potenza  $P_{LT}$  MAX rispetto alla potenza indicata sulla scheda tecnica dall'azienda produttrice, ossia rispetto a 240 Wp, per controllare che quest'ultimo rientrasse nei range percentuali di potenza indicati sui dati di targa.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	U_mes	I_mes	U_L	I_L	U_LT	I_LT	U_ref	E_Ref
2	0,207124	8,67013	0,207124	9,07098	0,206158	9,0763	0,05178	0,95581
3	0,19171	8,62803	0,19171	9,08212	0,190815	9,08745	0,051465	0,950002
4	0,19171	8,65509	0,19171	9,07593	0,190815	9,08125	0,051662	0,953632
5	0,19171	8,58893	0,19171	9,08261	0,190815	9,08794	0,051229	0,945645
6	0,19171	8,60397	0,19171	9,07066	0,190815	9,07598	0,051387	0,948549
7	0,145466	8,619	0,145466	9,05877	0,144787	9,06409	0,051544	0,951454
8	4,10699	8,59495	4,10699	9,01629	4,08783	9,02158	0,051642	0,953269
9	4,7544	8,56788	4,7544	9,02916	4,73222	9,03445	0,051406	0,948912
10	5,23225	8,53781	5,23225	9,02855	5,20784	9,03385	0,051229	0,945645
11	5,57137	8,55284	5,57137	9,02713	5,54537	9,03242	0,051328	0,94746
12	5,92591	8,58292	5,92591	9,02773	5,89825	9,03303	0,051505	0,950728

Figura 36 - Estratto file CSV restituito dal software dopo il flash, riportante le coordinate dei punti delle curve I-V non corrette ( $U_{mes}$  e  $I_{mes}$ ) e corrette ( $U_L$ )

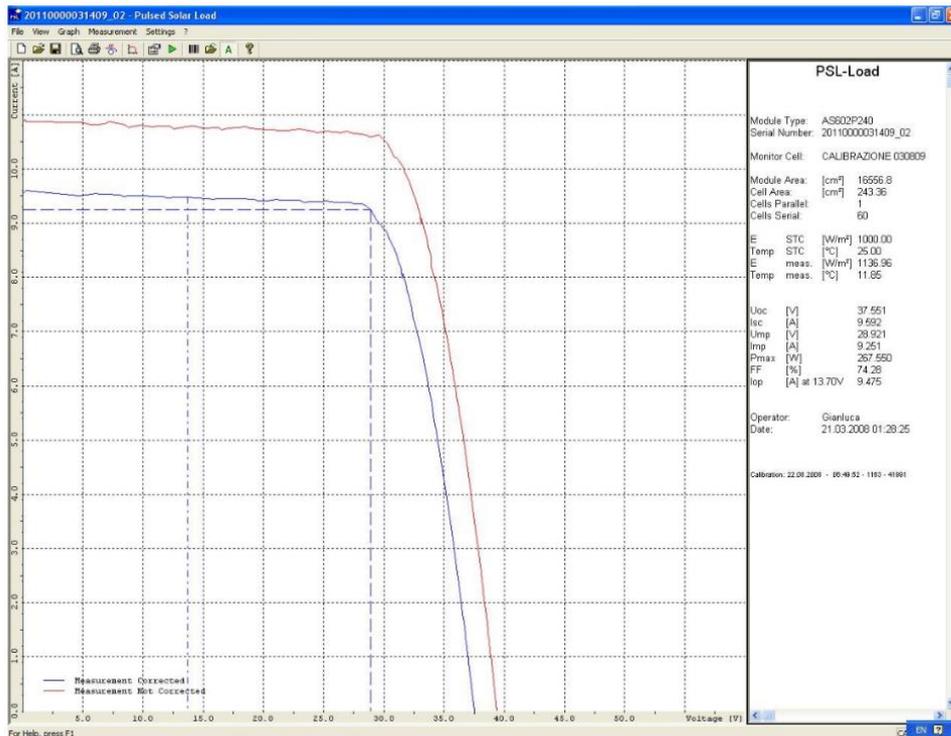


Figura 37 -- File restituito dal software PSL8 dopo ogni impulso; viene riportata la curva alle condizioni operative di prova (OPC) e quella traslata alle condizioni STC.

Tablelle con i valori delle prime prove effettuate al gennaio del 2020:

id_prova	P_mes MAX	P_LT MAX	scost %	IRR [W/m <sup>2</sup> ]	T [°C]
1	313,1405435	248,8667813	4%	1218,64	14,94
2	312,035272	249,2724902	4%	1211,11	14,97
3	311,6880886	249,2962023	4%	1211,02	14,97
4	312,4578127	249,2432404	4%	1211,74	15
5	312,3649354	249,2740833	4%	1211,74	15,03
6	311,5977547	249,2804384	4%	1211,02	15,04
7	311,1969769	249,2591395	4%	1209,56	15,04
8	312,3649354	249,1371085	4%	1212,11	15,05
9	311,1048859	249,3510936	4%	1208,84	15,06
10	311,489721	247,9453032	3%	1217,19	15,06
11	311,6820283	249,2096359	4%	1209,56	15,07
12	311,4452347	249,0544569	4%	1211,38	15,1
13	310,8567667	249,1761562	4%	1208,84	15,09
14	311,4340949	249,0762818	4%	1209,93	15,09
15	312,0238933	249,0618733	4%	1211,38	15,11
16	311,0127949	249,1088473	4%	1209,93	15,13
17	311,847497	249,1879721	4%	1212,83	15,14
18	312,3649354	248,9821942	4%	1214,28	15,16
19	311,3382652	249,0754505	4%	1209,2	15,15
20	311,1675293	249,0990484	4%	1210,65	15,15
<b>Valore medio</b>	<b>311,731</b>	<b>249,098</b>	<b>4%</b>	<b>1211,548</b>	<b>15,07</b>

Tabella 2 - Modulo fotovoltaico AS31408

id_prova	P_mes MAX	P_LT MAX	scost %	IRR [W/m <sup>2</sup> ]	T [°C]
1	311,8050485	247,979768	3%	1214,65	14,81
2	311,4732499	247,880543	3%	1216,46	14,81
3	311,8359613	247,781959	3%	1215,74	14,81
4	311,7123101	247,765748	3%	1215,74	14,82
5	311,1329011	247,707051	3%	1216,1	14,84
6	309,5467471	246,910386	3%	1213,92	14,87
7	310,9488115	247,814593	3%	1215,01	14,88
8	311,3716382	247,705814	3%	1215,01	14,9
9	311,3716382	247,648562	3%	1215,01	14,92
10	312,2095555	247,576525	3%	1219,00	14,92
11	311,6195717	247,616558	3%	1216,46	14,91
12	310,3608056	247,689894	3%	1213,56	14,94
13	311,5268333	247,56727	3%	1216,46	14,94
14	311,278946	247,51738	3%	1215,37	14,94
15	310,2688532	247,623506	3%	1213,56	14,95
16	310,935417	247,475443	3%	1214,28	14,95
17	309,3895816	246,791231	3%	1212,11	14,97
18	310,935417	247,574013	3%	1213,92	14,98
19	310,935417	247,499825	3%	1214,28	14,98
20	310,5167413	247,558395	3%	1215,01	14,99
<b>Valore medio</b>	<b>311,059</b>	<b>247,584</b>	<b>3%</b>	<b>1215,083</b>	<b>14,91</b>

Tabella 3 - Modulo fotovoltaico AS31409

id_prova	P_mes MAX	P_LT MAX	scost %	IRR [W/m <sup>2</sup> ]	T [°C]
1	313,296	249,927	4%	1212,47	15,1
2	313,061	249,797	4%	1213,92	15,07
3	312,613	249,805	4%	1210,29	15,07
4	313,545	249,733	4%	1213,92	15,08
5	312,531	249,559	4%	1213,56	15,11
6	312,365	249,580	4%	1210,65	15,13
7	312,458	249,629	4%	1211,38	15,13
8	310,556	248,454	4%	1209,2	15,13
9	312,613	249,563	4%	1211,38	15,14
10	311,682	249,582	4%	1207,75	15,16
11	312,024	249,407	4%	1209,93	15,16
12	311,682	249,161	4%	1212,47	15,18
13	312,425	249,375	4%	1214,28	15,17
14	311,931	249,136	4%	1213,56	15,18
15	310,425	249,442	4%	1206,3	15,2
17	311,931	249,313	4%	1210,65	15,23
18	311,682	249,272	4%	1209,56	15,24
19	312,613	248,772	4%	1218,28	15,25
20	311,013	249,437	4%	1208,48	15,26
<b>Valore medio</b>	<b>312,129</b>	<b>249,418</b>	<b>4%</b>	<b>1211,475</b>	<b>15,16</b>

Tabella 4 - Modulo fotovoltaico AS31411

id_prova	P_mes MAX	P_LT MAX	scost %	IRR [W/m <sup>2</sup> ]	T [°C]
1	315,0712697	249,264016	4%	1121,54	14,71
2	314,8539085	248,764936	4%	1224,81	14,69
3	313,8883556	249,009055	4%	1217,55	14,68
4	313,6704708	248,779676	4%	1220,09	14,68
5	313,7953397	249,099573	4%	1217,19	14,7
6	313,7643344	248,722674	4%	1120,82	14,7
7	312,8538985	248,831516	4%	1216,83	14,72
8	313,7953397	248,483895	4%	1222,27	14,74
9	314,1143335	248,946752	4%	1121,18	14,74
10	312,4530437	248,833708	4%	1215,37	14,75
11	313,4194526	248,778758	4%	1217,19	14,76
12	312,7983628	248,968413	4%	1213,92	14,78
13	313,0159072	248,836803	4%	1215,37	14,77
14	311,3732417	247,729935	3%	1214,28	14,78
15	304,3966402	244,480378	2%	1216,83	14,79
16	312,7983628	248,827539	4%	1214,65	14,79
17	312,9232673	248,802445	4%	1217,55	14,8
18	312,6745264	248,819968	4%	1214,28	14,81
19	312,3927903	248,693311	4%	1216,1	14,82
20	312,6435673	248,300908	3%	1219	14,82
<b>Valore medio</b>	<b>312,835</b>	<b>248,549</b>	<b>4%</b>	<b>1202,841</b>	<b>14,75</b>

Tabella 5 - Modulo fotovoltaico AS31412

id_prova	P_mes MAX	P_LT MAX	scost %	IRR [W/m <sup>2</sup> ]	T [°C]
1	314,6852433	256,504802	7%	1186,33	14,46
2	313,3243157	256,335576	7%	1179,8	14,47
3	313,0146383	256,416451	7%	1180,52	14,48
4	313,6051164	256,44491	7%	1180,89	14,49
5	313,5122853	256,384938	7%	1180,16	14,53
6	314,0411632	255,803113	7%	1187,42	14,53
7	313,2956794	256,368161	7%	1180,16	14,54
8	312,3051386	256,514683	7%	1177,62	14,54
9	315,3828639	258,582193	8%	1179,8	14,56
10	312,0564173	256,484505	7%	1176,89	14,56
11	312,5160429	256,074537	7%	1180,52	14,56
12	313,1409609	256,349164	7%	1179,43	14,57
13	312,4233045	256,379228	7%	1176,53	14,55
14	312,4618151	256,580921	7%	1177,98	14,56
15	311,6237912	256,445172	7%	1175,44	14,56
16	312,5170897	256,295891	7%	1177,26	14,61
17	312,7974858	256,296336	7%	1176,89	14,62
18	312,4552333	256,443647	7%	1179,07	14,61
19	312,4861615	256,486435	7%	1177,26	14,63
20	311,9530323	256,386847	7%	1177,26	14,64
<b>Valore medio</b>	<b>312,980</b>	<b>256,479</b>	<b>7%</b>	<b>1179,362</b>	<b>14,64</b>

Tabella 6 - Modulo fotovoltaico AS31413

Dalle prime prove normali effettuate si è potuto constatare che i moduli non sono danneggiati e che la potenza massima dichiarata sulla scheda tecnica viene rispettata. Dopo questa prima parte di prove, dove si è verificata la potenza massima dei moduli, si è potuto passare alle prove sperimentali per determinare i coefficienti  $R's$  e  $k'$ , secondo la norma EN 60891, in particolare seguendo il metodo di correzione due.

#### **4.3. Procedura per determinazione del parametro $a$ e $R's$**

Come indicato dalla norma, per determinare  $R's$  si devono avere diversi irraggiamenti, mentre bisogna mantenere una temperatura costante. Al fine di variare l'irraggiamento sono stati utilizzati vari strati di carta da lucido (è un tipo di carta a bassa opacità che consente il passaggio della luce). In particolar modo abbiamo operato nel seguente modo:

- Si è ottenuto un primo irraggiamento senza applicare nessuno strato di carta sul modulo fotovoltaico registrando quindi un irraggiamento medio per i cinque moduli fotovoltaici di  $1188,75 \text{ W/m}^2$ ;
- Per ottenere il secondo irraggiamento, avente un valore inferiore al primo, si è applicato un primo strato di carta da lucido sia al modulo fotovoltaico che alla cella di riferimento ottenendo un valore medio di irraggiamento per i cinque pannelli fotovoltaici di  $942,14 \text{ W/m}^2$ ;
- Si è proseguito allo stesso modo fino all'aggiunta di quattro strati di carta da lucido con un irraggiamento medio per i cinque moduli di  $561,78 \text{ W/m}^2$ ;
- Infine, per mantenere una temperatura stabile le prove si sono effettuate tra le ore 11 e 13 della giornata, in tal modo le oscillazioni massime indicate dalla norma sono state rispettate.



Figura 38 - Rappresentazione banco di prova con il modulo fotovoltaico e cella di riferimento ricoperti con la carta da lucido

Di seguito si riportano in dettaglio le tabelle con le variazioni dell'irraggiamento e i valori della temperatura per ogni modulo fotovoltaico registrati dal software:

Modulo AS31408		
Numero fogli	Irraggiamento [ $W/m^2$ ]	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
0	1186,69	24
1	939,11	23,91
2	774,3	24,03
3	648,33	24,01
4	557,57	24,08

Tabella 7 - Variazione irraggiamenti modulo fotovoltaico AS341408

Modulo AS31409		
Numero fogli	Irraggiamento [ $W/m^2$ ]	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
0	1191,41	23,8
1	942,74	23,69
2	771,39	23,74
3	667,93	23,86
4	573,54	23,84

Tabella 8 - Variazione irraggiamenti modulo fotovoltaico AS341409

Modulo AS31411		
Numero fogli	Irraggiamento [ $W/m^2$ ]	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
0	1185,97	22,79
1	947,46	23,01
2	757,23	23,11
3	680,27	23,21
4	571,00	23,37

Tabella 9 - Variazione irraggiamenti modulo fotovoltaico

Modulo AS31412		
Numero fogli	Irraggiamento [ $W/m^2$ ]	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
0	1191,41	24,17
1	939,74	24,11
2	768,13	24,04
3	644,33	24,06
4	553,58	24,08

Tabella 10 - Variazione irraggiamenti modulo fotovoltaico

Modulo AS31413		
Numero fogli	Irraggiamento [ $W/m^2$ ]	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
0	1188,15	23,63
1	941,65	23,60
2	769,94	23,60
3	637,07	23,66
4	553,21	23,68

Tabella 11 - Variazione irraggiamenti modulo fotovoltaico AS341409

#### 4.4 Procedura per la determinazione del parametro $k'$

Per determinare  $k'$ , come indicato nella normativa CEI EN 60891, si devono tracciare le curve corrente-tensione del campione in prova (modulo fotovoltaico) a un irraggiamento costante e a diverse temperature ( $T_1...T_N$ ). Inoltre, durante le misurazioni, l'irraggiamento non deve scostarsi del  $\pm 1\%$ . Per ottenere temperature a diversi intervalli si è usato una stufa elettrica in grado di riscaldare l'ambiente di prova. Operativamente si sono eseguiti i seguenti passaggi:

- Si è posizionato il modulo fotovoltaico sul banco di prova all'interno della torre senza nessun strato di carta da lucido applicato in superficie e si è eseguito un primo "flash test" a temperatura ambiente in modo da ottenere una prima curva I-V ad una temperatura più bassa possibile

(nel nostro caso ambiente) per poi andare a tracciare le altre curve a temperature più alte (come indicato dalla norma);

- Il secondo step è stato quello di accendere a torre “chiusa” una stufa elettrica fino a quando la sonda Pt100, tramite il software non ha registrato una temperatura di 40 °C;
- Infine, a partire dalla temperatura di 40 °C si sono eseguito letture ogni intervallo di  $\pm 5$  °C, prima spegnendo una resistenza della stufa e poi spegnendola del tutto, per un totale di 4 impulsi, più precisamente si è effettuato un flash a 40 °C, 35 °C, 30 °C e 25 °C (nelle prove gli intervalli di temperatura hanno subito oscillazione di massimo  $\pm 2$  °C).



Figura 39 - Stufa elettrica usata per alzare la temperatura nella torre

Di seguito si riportano, in dettaglio, le tabelle con i valori di ciascuna lettura per ogni modulo, a temperatura variabile e irraggiamento costante:

Modulo AS31408		
Letture	Temperatura [°C]	Irraggiamento [W/m <sup>2</sup> ]
1	26,54	1185,61
2	39,43	1185,24
3	35,50	1189,96
4	29,95	1184,15
5	27,05	1184,15

Tabella 12 - Valori variazione temperatura modulo AS31408

Modulo AS31409		
Lettura	Temperatura [°C]	Irraggiamento [W/m <sup>2</sup> ]
1	26,24	1179,07
2	38,89	1185,24
3	35,25	1185,61
4	30,05	1183,43
5	26,58	1183,43

Tabella 13- Valori variazione temperatura modulo AS31409

Modulo AS31411		
Lettura	Temperatura [°C]	Irraggiamento [W/m <sup>2</sup> ]
1	25,64	1183,43
2	39,64	1185,97
3	35,25	1184,52
4	29,35	1184,88
5	27,33	1185,24

Tabella 14 - Valori variazione temperatura modulo AS31411

Modulo AS31412		
Lettura	Temperatura [°C]	Irraggiamento [W/m <sup>2</sup> ]
1	24,08	1188,51
2	39,25	1190,32
3	35,33	1189,24
4	29,39	1182,27
5	26,76	1183,43

Tabella 15 - Valori variazione temperatura modulo AS31409

Modulo AS31413		
Lettura	Temperatura [°C]	Irraggiamento [W/m <sup>2</sup> ]
1	25,79	1183,43
2	39,88	1185,24
3	35,63	1183,03
4	29,39	1182,27
5	26,76	1183,43

Tabella 16- Valori variazione temperatura modulo AS31409

## CAPITOLO 5

### 5. RISULTATI DEI TEST SPERIMENTALI

In questo capitolo verranno analizzati i dati ricavati dai test sperimentali svolti nel Dipartimento “DIISM” dell’Università Politecnica delle Marche e verranno riportati i valori di  $a$ ,  $R'_s$  e  $k'$  che si sono calcolati a partire dalle prove sperimentali variando o l’irraggiamento o la temperatura e mantenendo costante l’altro parametro.

#### 5.1. Valori sperimentali $a$ e $R'_s$ ottenuti dalle prove

Tenendo conto delle indicazioni della procedura di correzione 2 della norma CEI EN 60891 e dei valori che si sono acquisiti dalle prove a irraggiamento decrescente ed a temperatura costante, con l’ausilio del programma Excel, siamo stati in grado di tracciare le curve I-V per ogni modulo. Riportando inoltre le equazioni (13) e (14) sempre sullo stesso foglio Excel siamo stati in grado di determinare i valori più appropriati di  $a$  e  $R'_s$ , considerando che il valore giusto di “ $a$ ” si ottiene quando le tensioni di circuito aperto ( $V_{oc}$ ) delle caratteristiche I-V trasposte coincidono con una tolleranza di  $\pm 0,5\%$ , mentre per quanto riguarda il valore appropriato di  $R'_s$  questo si determina quando lo scostamento dei valori di potenza massima ( $P_{max}$ ) di uscita delle caratteristiche I-V trasposte coincidono con una tolleranza di  $\pm 0,5\%$ .

Di seguito si riportano le curve I-V che si sono ottenute dalle prove sperimentali e i relativi scostamenti alla  $V_{oc}$  e  $P_{max}$  delle caratteristiche I-V trasposte. In base agli scostamenti si sono determinati i valori più appropriati di  $a$  e  $R'_s$ .

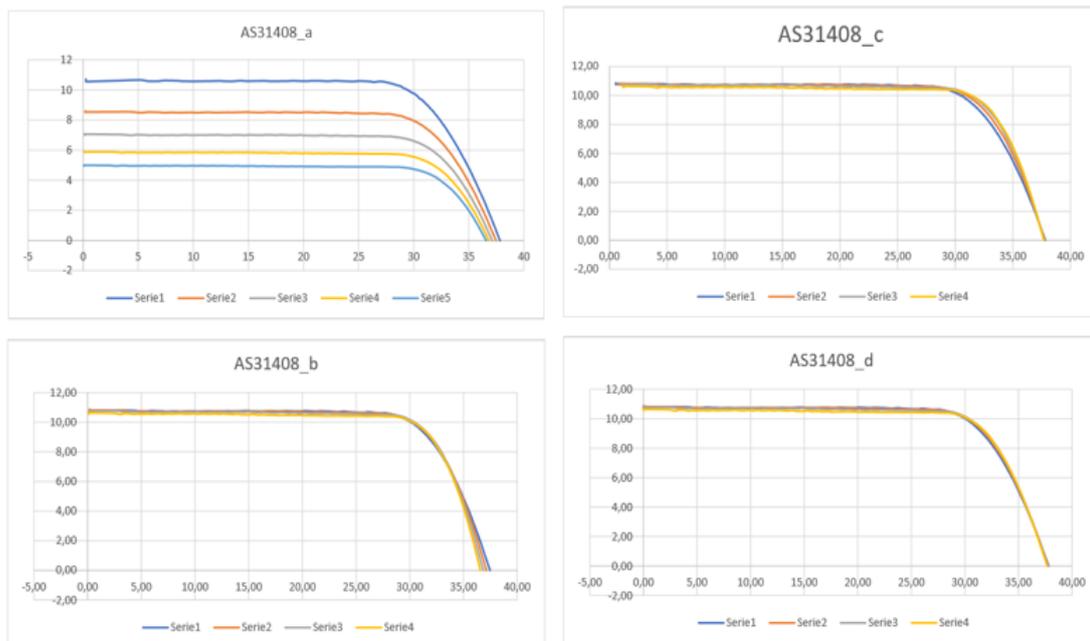


Figura 40 - Curve I-V ottenute dai dati sperimentali: a) caratteristiche I-V ad irraggiamenti differenti e temperatura costante; b) curve I-V corrette in  $a = 0$  e  $R'_s = 0 \Omega$ ; c) curve I-V in  $a =$  ottimale e  $R'_s = 0 \Omega$ ; d) curve I-V corrette in  $a =$  ottimale e  $R'_s =$  ottimale.

scostamenti $V_{OC}$			
Scost_1-2_ %	Scost_2-3%	Scost_3-4_ %	Scost_4-1_ %
0,07%	0,09%	0,16%	-0,33%

Tabella 17 – Scostamenti curve I-V a circuito aperto del modulo AS31408

scostamenti $P_{max}$			
Scost_1-2_ %	Scost_2-3%	Scost_3-4_ %	Scost_4-1_ %
-0,44%	-1,48%	1,78%	0,11%

Tabella 18 - Scostamenti delle potenze massime delle curve I-V trasposte del modulo AS31408

Modulo AS31408	
Parametro	Valore
a	0,04
R'S	0,21

Tabella 19 - Valori coefficienti a e R's del modulo AS31408

Si riportano i grafici e le tabelle anche degli altri quattro moduli per i quali sono eseguite le stesse operazioni sperimentali:

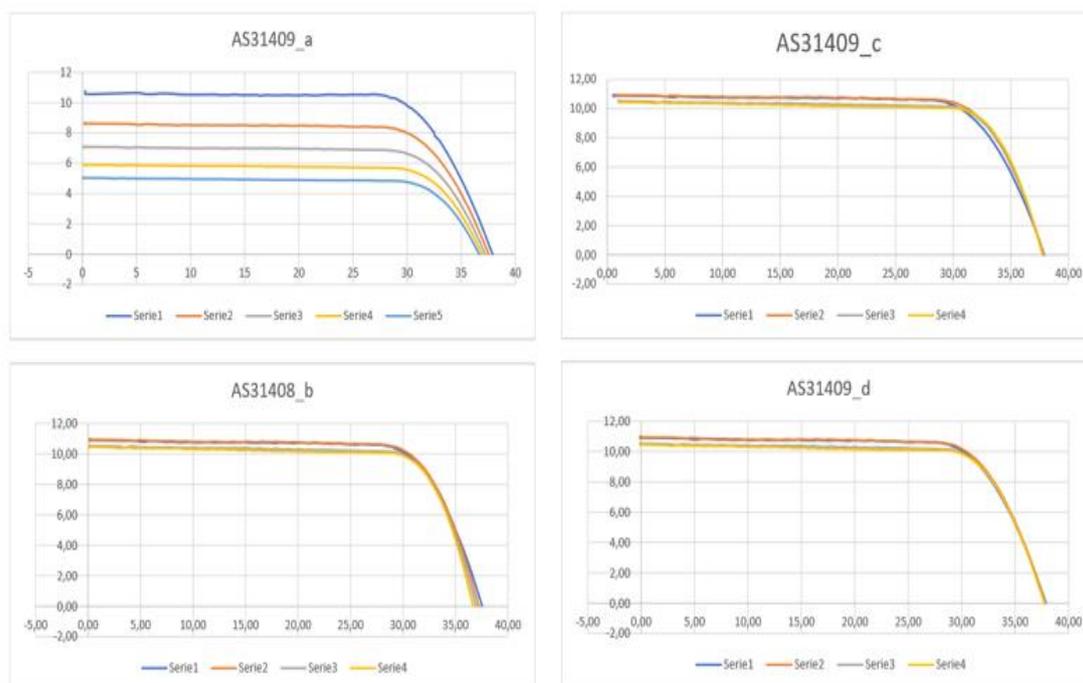


Figura 41- Curve sperimentali I-V modulo ASAS31409

Scostamenti $V_{OC}$			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
0,03%	0,18%	0,16%	-0,38%

Tabella 20 - Scostamenti curve I-V a circuito aperto del modulo AS31409.

Scostamenti Pmax			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
-0,86%	2,68%	0,49%	-2,38%

Tabella 21 - Scostamenti delle potenze massime delle curve I-V trasposte del modulo AS31409.

Modulo AS31409	
Parametro	Valore
a	0,04
R's	0,23

Tabella 22 - Valori coefficienti a e R's del modulo AS31409.

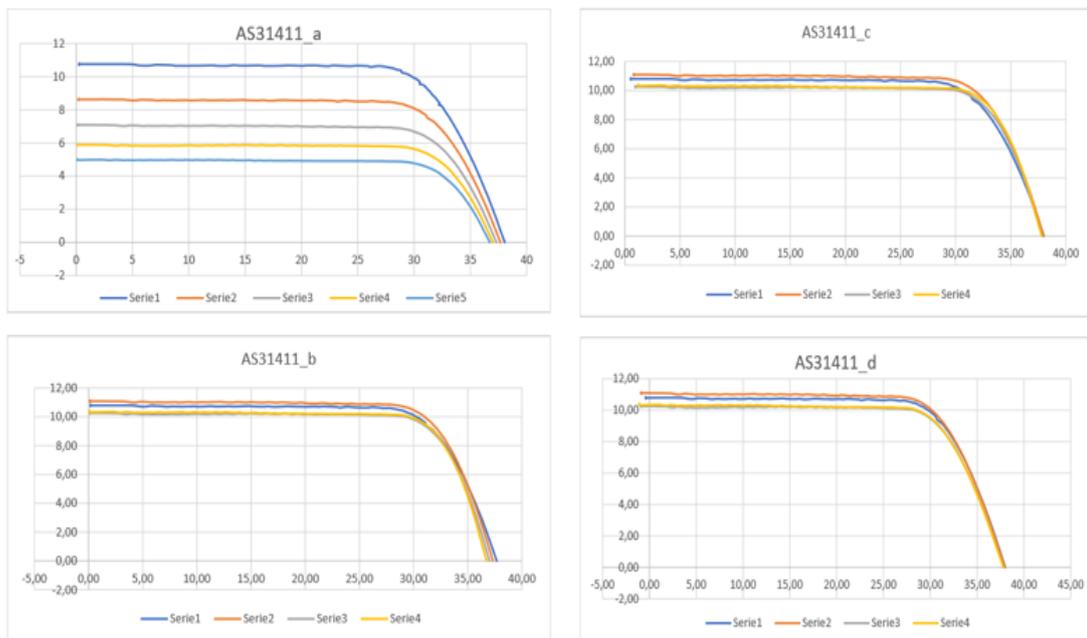


Figura 42 - Curve sperimentali I-V modulo ASAS31411.

Scostamenti $V_{OC}$			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
0,10%	0,37%	0,07%	-0,54%

Tabella 23 - Scostamenti delle potenze massime delle curve I-V trasposte del modulo AS31411-

Scostamenti Pmax			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
-1,88%	6,07%	-0,46%	-4,02%

Tabella 24 - Scostamenti curve I-V a circuito aperto del modulo AS31411.

Modulo AS31411	
Parametro	Valore
a	0,04
R's	0,42

Tabella 25 – Valori coefficienti a e R's del modulo AS31411.

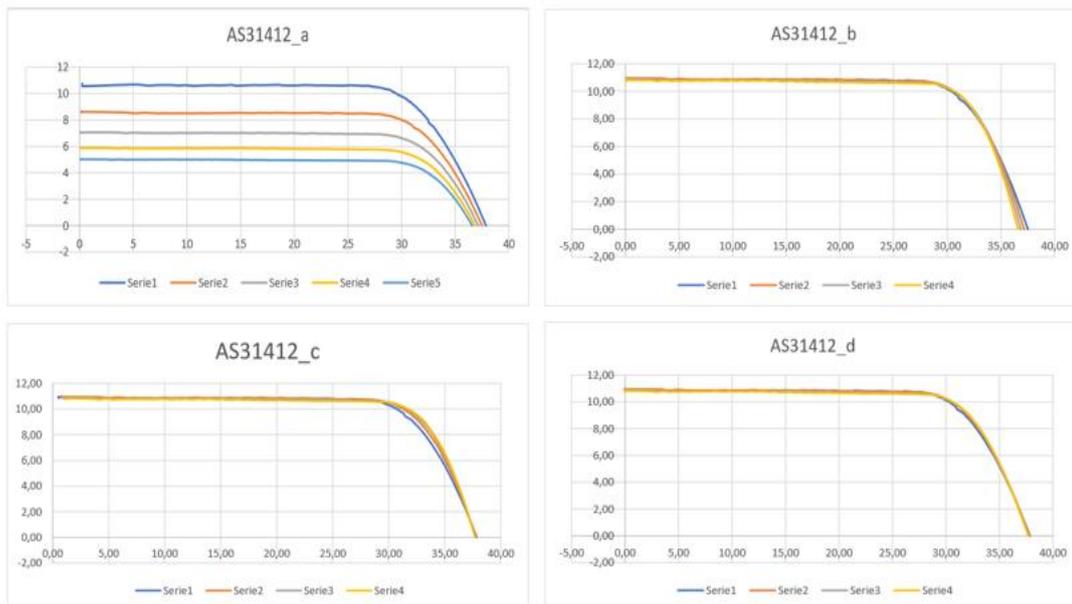


Figura 43 - Curve sperimentali I-V modulo ASAS31412.

Scostamenti VOC			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
0,11%	0,14%	0,12%	-0,38%

Tabella 26 - Scostamenti delle potenze massime delle curve I-V trasposte del modulo AS31412

Scostamenti Pmax			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
-0,88%	-0,06%	0,07%	0,86%

Tabella 27 - Scostamenti curve I-V a circuito aperto del modulo AS31412.

Modulo AS31412	
Parametro	Valore
a	0,04
R's	0,21

Tabella 28 Valori coefficienti a e R's del modulo AS31412

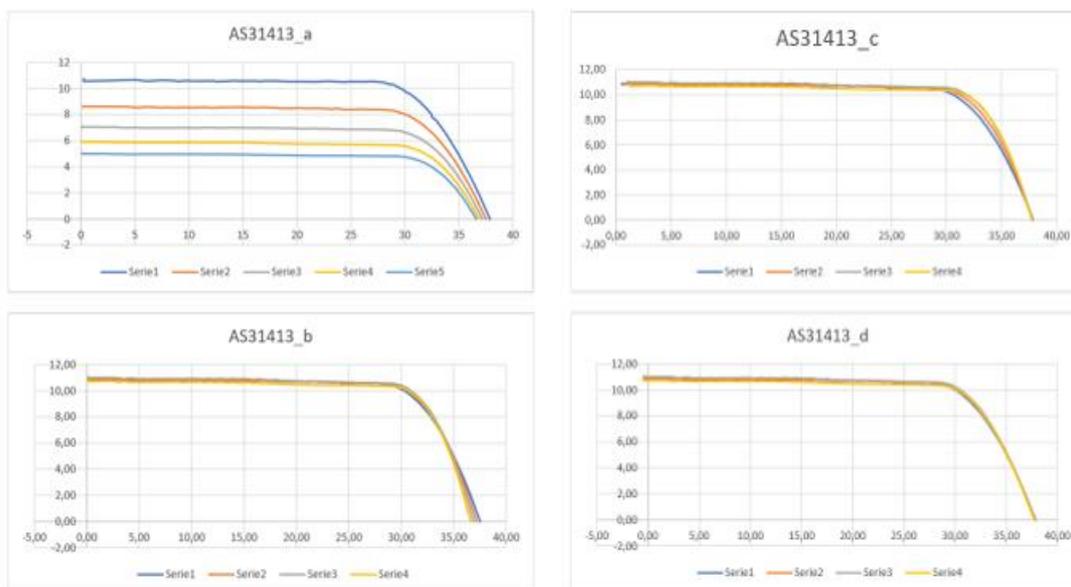


Figura 44 - - Curve sperimentali I-V modulo ASAS31413

Scostamenti $V_{OC}$			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
0,07%	0,09%	0,16%	-0,33%

Tabella 29 - Scostamenti delle potenze massime delle curve I-V trasposte del modulo AS31413

Scostamenti Pmax			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
-0,44%	-1,48%	1,78%	0,11%

Tabella 30 - Scostamenti curve I-V a circuito aperto del modulo AS31413

Modulo AS31413	
Parametro	Valore
a	0,04
R's	0,29

Tabella 31 - Valori coefficienti a e R's del modulo AS31413

## 5.2 Valori sperimentali $k'$ ottenuti dalle prove

Come per  $a$  e  $R's$ , anche per  $k'$  si sono seguite le indicazioni dalla norma CEI EN 60891. I valori che si sono ottenuti nelle prove sperimentali sono stati riportati su un foglio Excel e sono state tracciate le curve I-V. In seguito, si sono traslate le curve I-V, andando a variare  $k'$  in passi da  $0,01 \Omega$ , con  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $R's$  fissati ( $\alpha$  e  $\beta$  noti dalle schede tecniche mentre  $R's$  corrispondente al valore ottimale precedentemente ottenuto). Il valore “giusto” di  $k'$  è stato determinato quando la tolleranza delle curve I-V trasposte è stata la migliore possibile (la norma indica una tolleranza di  $\pm 5\%$ ).

Di seguito si riportano le curve I-V ottenute dai valori ottenuti sperimentalmente con i relativi scostamenti delle curve e i valori di  $k'$ .

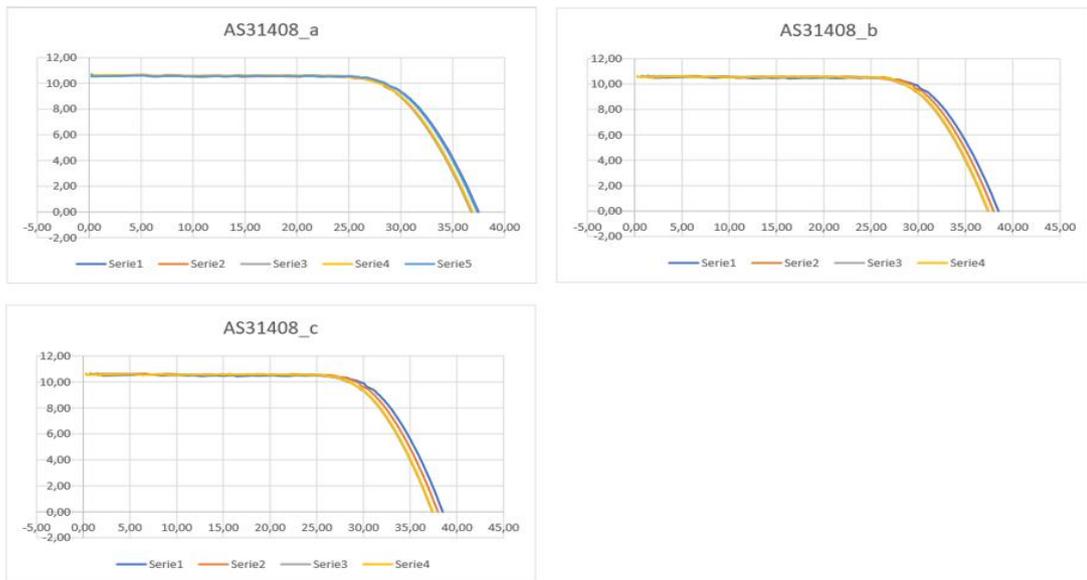


Figura 45- Curve I-V ottenute dai dati sperimentali: a) caratteristiche I-V misurate a diverse temperature dal dispositivo.; b) caratteristica I-V corrette in temperatura con  $k' = 0 \text{ ohm/K}$ ; c) caratteristiche I-V con  $k' = \text{ottimale}$ .

scostamenti Pmax			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
1,45%	2,70%	-0,36%	-3,92%

Valore parametro  $k' = 0,001$

Tabella 32 - Scostamenti delle potenze massime di uscita delle curve I-V trasposte del modulo AS31408 e il corrispondente valore di  $k'$ .-

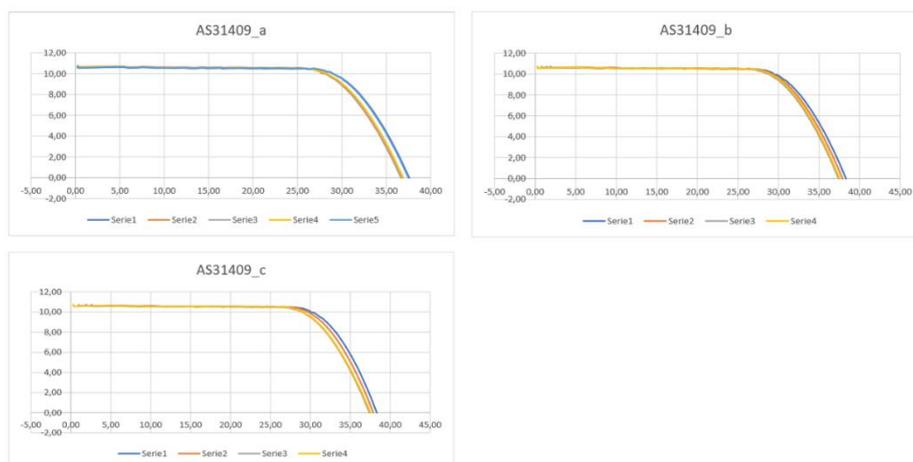


Figura 46 – Curve I-V ottenute dai dati sperimentali del modulo AS31409.

scostamenti Pmax			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
1,78%	2,41%	-0,40%	-3,91%

**Valore parametro k' = 0,005**

Tabella 33 - Scostamenti delle potenze massime di uscita delle curve I-V trasposte del modulo AS31409 e il corrispondente valore di k'.

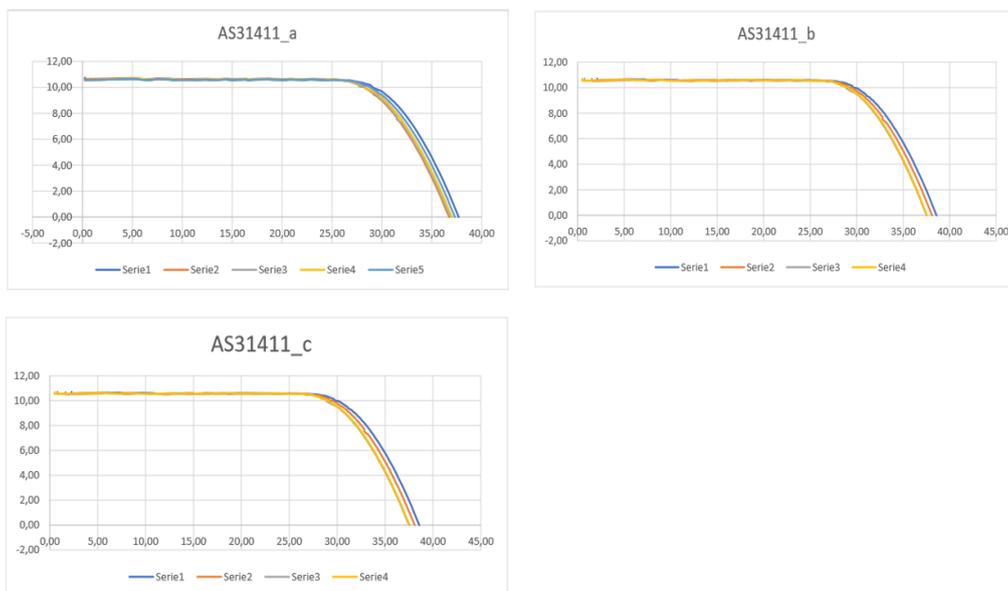


Figura 47 - Curve I-V ottenute dai dati sperimentali del modulo AS31411

scostamenti Pmax			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
1,67%	1,65%	-0,22%	-3,17%

**Valore parametro k' = 0,001**

Tabella 34 - Scostamenti delle potenze massime di uscita delle curve I-V trasposte del modulo AS31411 e il corrispondente valore di k'.

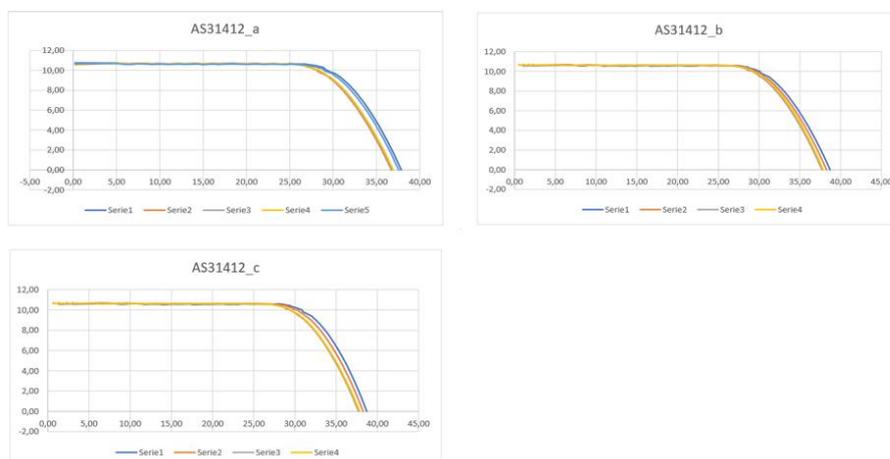


Figura 48 - Curve I-V ottenute dai dati sperimentali del modulo AS31412

scostamenti Pmax			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
1,99%	2,53%	-0,47%	-4,19%

Valore parametro  $k' = 0,005$

Tabella 35 - Scostamenti delle potenze massime di uscita delle curve I-V trasposte del modulo AS31412 e il corrispondente valore di  $k'$ .

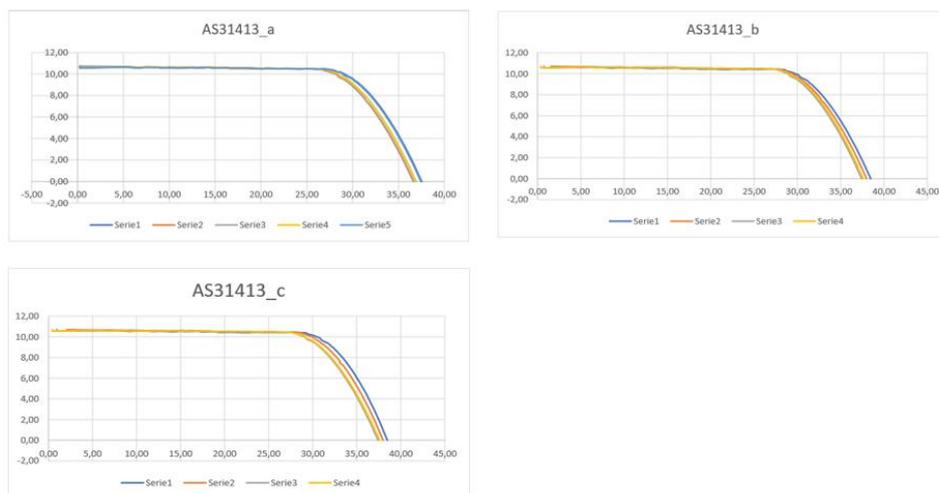


Figura 49 - Curve I-V ottenute dai dati sperimentali del modulo AS31413

scostamenti Pmax			
Scost_1-2_%	Scost_2-3%	Scost_3-4_%	Scost_4-1_%
1,71%	2,94%	-0,45%	-4,35%

Valore parametro  $k' = 0,005$

Tabella 36 - Scostamenti delle potenze massime di uscita delle curve I-V trasposte del modulo AS31412 e il corrispondente valore di  $k'$ .-

Come si può osservare dai risultati riportati nelle tabelle relativi agli scostamenti, alcuni di essi non rientrano nelle tolleranze indicate dalla normativa CEI EN 60891, tuttavia vi si avvicinano molto. Questo ci fa supporre che alcune prove andranno rifatte per lo sviluppo futuro del lavoro. In definitiva, i valori di  $a$ ,  $R'_s$  e  $k'$  ottenuti dalle prove sperimentali si riepilogano nella *tabella 37*.

Tabella riepilogativa parametri			
Pannello	$a$	$R'_s$	$k'$
AS31408	0,040	0,21	0,001
AS31409	0,04	0,23	0,005
AS31411	0,04	0,42	0,001
AS31412	0,04	0,21	0,005
AS31413	0,04	0,29	0,005

Tabella 37 - Riepilogo dei valori  $a$ ,  $R'_s$  e  $k'$  ottenuti tramite le prove sperimentali

# CAPITOLO 6

## 6. CONCLUSIONI

L'obiettivo di questa tesi è stato quello di determinare i valori dei coefficienti di correzione delle curve caratteristiche corrente-tensione dei pannelli fotovoltaici rilevate a temperature e irraggiamento differenti dalle condizioni standard definite dalla norma IEC 60904, ossia 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura delle celle 25 °C e spettro solare 1,5 AM. In particolare, si sono voluti determinare i coefficienti correzione  $a$ ,  $R'_s$  e  $k'$  della seconda procedura della norma CEI EN 60891 con luce generata tramite simulatore solare. I valori ottenuti dalle prove si riepilogano nella tabella 37.

Come si è specificato nel capitolo 5, e lo si ribadisce in questo, una parte degli scostamenti non rientrano nelle tolleranze indicate dalla normativa CEI EN 60891. Questo ci fa ipotizzare che in un lavoro futuro alcune prove andranno organizzate meglio e dovranno essere eseguite con maggiore attenzione.

Sarà necessario cercare di migliorare gli ambienti e la strumentazione utilizzata per l'acquisizione delle curve I-V; come, per esempio, rivedere le prove con dei filtri appositi che si possano direttamente installare sulla lampada che emette il *flash* per creare gli irraggiamenti differenti, mentre per quanto riguarda le temperature i moduli dovranno essere posti in ambienti isolati, in cui la temperatura "desiderata" sia meno soggetta a variazioni.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] <https://www.greenplanner.it/energie-rinnovabili/>
- [2] <https://addiocontatore.it/2018/02/21/energia-non-rinnovabile-conseguenze/>
- [3] Paolo Pietrogrande e Andrea Masullo “Energia verde per un paese rinnovabile”
- [4] <https://www.isprambiente.gov.it/it>
- [5] <https://www.ecoage.it/conferenza-rio-de-janeiro-1992.htm>
- [6] <https://unfccc.int/process/conferences/pastconferences/cancun-climate-change-conference-november-2010/statements-and-resources/Agreements>
- [7] <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>
- [8] [https://online.scuola.zanichelli.it/lupiascienzetera/wp-content/uploads/Zanichelli\\_SienzeIntegrate\\_Energia\\_Solare.pdf](https://online.scuola.zanichelli.it/lupiascienzetera/wp-content/uploads/Zanichelli_SienzeIntegrate_Energia_Solare.pdf)
- [9] <https://greennetworkenergy.it/green-stories/futuro-green/energia-marina/>
- [10] <https://energit.it/quali-sono-le-energie-alternative-promettenti-per-il-futuro/>
- [11] <https://www.fotovoltaiico-sicuro.it/storia-del-fotovoltaiico/>
- [12] Soteris Kalogirou, “Solar Energy Engineering: Processes and System” – 1° ed.
- [13] Persegona, Nicola. "Le tecnologie fotovoltaiche." (2011).
- [14] <http://www.edutecnica.it/elettronica/semi/semiconduttori.htm>
- [15] Roberto Caldon, Fabio Bignucolo, “Impianti di produzione dell’energia elettrica – Criteri di scelta e dimensionamento.
- [16] <http://energyprofessionalsymposium.com>
- [17] Cencherle, Andrea. "Analisi delle performance giornaliere e di lungo termine di sistemi fotovoltaici e caratterizzazione delle perdite termiche." (2015)
- [18] [http://old.enea.it/produzione\\_scientifica/pdf\\_volumi/V2008\\_18-ProgettareFotovoltaiico.pdf](http://old.enea.it/produzione_scientifica/pdf_volumi/V2008_18-ProgettareFotovoltaiico.pdf)
- [19] Stefano Notarnicola, “Recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita”
- [20] [https://it.wikipedia.org/wiki/Lampada\\_allo\\_xeno](https://it.wikipedia.org/wiki/Lampada_allo_xeno)
- [21] [https://autosen.com/it/articoli\\_tecnici-termoresistenza\\_al\\_platino](https://autosen.com/it/articoli_tecnici-termoresistenza_al_platino)

## **FONTI IMMAGINI**

- [1]: Jos G.J. Olivier and Jeroen A.H.W. Peters, "Trend in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emission"
- [2]: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4b/ParisAgreement.svg>
- [3]: [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg\\_ind\\_ren&lang](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_ind_ren&lang)
- [4]: <https://energiaoltre.it/fotovoltaico-uecoop/>
- [5]: <http://www.lagattasultettomilano.com/pannelli-solari>
- [6]: <http://educazionetecnica.dantect.it/2012/01/06/la-centrale-idroelettrica/>
- [7]: <https://www.sostenibile.com/blog/2016/02/come-funziona-un-impianto-eolico/>
- [8]: <https://www.chimica-online.it/download/corrente-elettrica.htm>
- [9]: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-12-Spettro-delle-radiazioni-elettromagnetiche-corso-Dati-satellitari-Obiettivo\\_fig5\\_325402057](https://www.researchgate.net/figure/Figura-12-Spettro-delle-radiazioni-elettromagnetiche-corso-Dati-satellitari-Obiettivo_fig5_325402057)
- [10]: [https://www.chimica-online.it/download/legame\\_metallico.htm](https://www.chimica-online.it/download/legame_metallico.htm)
- [11]: <http://www.edutecnica.it/elettronica/semi/semiconduttori.htm>
- [12]: <http://laboratoriodifisicac290.blogspot.com/2013/02/conduttori-semiconduttori-e-isolanti.html>
- [13]: <http://martinocolonna.people.ing.unibo.it/fond%20chim%20gestionale/legame%20metallico.pdf>
- [14]: <https://www.chimitutor.org/la-giunzione-pn/>
- [15] <http://ristrutturazioni.over-blog.com/l-effetto-fotovoltaico-cos-e.html>
- [16] <http://www.st-ingegneria.com/analisi-rendimento-moduli-fotovoltaici-e-curva-corrente-tensione-i-v.html>
- [17] Renato Ricci, "Energia solare fotovoltaica sezione 2-Il generatore fotovoltaico" Sezione 2
- [18] Davide Murgia "Tecniche per l'identificazione dei difetti e per l'analisi delle performance nei moduli fotovoltaici." (2018) p. 16
- [19] [https://www.bonarrigo.altervista.org/PANNELLO\\_SOLARE2/Guida\\_Fotovoltaico\\_Libro.pdf](https://www.bonarrigo.altervista.org/PANNELLO_SOLARE2/Guida_Fotovoltaico_Libro.pdf) -
- [21] <http://www.pvcompare.net/it/news-dal-sito/223-pregi-e-difetti-dei-pannelli-solari-semi-flessibili-per-nautica-e-camperistica>