

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRICA



TESI DI LAUREA

Sistema automatico di misura della caratteristica I-V di generatori fotovoltaici operanti fino a 1500 V_{DC}

Candidato:
ROBERTO GRIESI

Relatore:
Prof. PAOLO DI LEO

Correlatore:
Ing. ALESSANDRO CIOCIA

ANNO ACCADEMICO 2017-2018

A mamma e papà,

*che da sempre hanno condiviso ogni mia scelta
sostenendomi con il sudore dei loro sacrifici*

A Donato e Daniele

*per non avermi mai fatto sentire solo
durante questa avventura*

SOMMARIO

INTRODUZIONE	1
1. INFORMAZIONI GENERALI SULLA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA	3
1.1 Introduzione alla cella fotovoltaica.....	3
1.1.2 Circuito equivalente della cella solare	5
1.1.3 Caratteristica I-V.....	7
1.1.4 Dipendenza caratteristica I-V da irradianza e temperatura	10
1.2 Dati tecnici e condizioni di prova.....	11
1.2.1 STC Standard Test Conditions	11
1.2.2 Nominal Operating Cell Temperature (NOCT).....	12
1.2.3 Metodo della tensione a circuito aperto secondo la CEI 82-10.....	12
1.2.4 Variazione percentuale della potenza.....	13
1.2.5 Definizione parametri di cella in funzione di irraggiamento e temperatura.....	14
1.3 Fattori di perdita di una cella fotovoltaica	16
1.4 Potenza ed efficienza della cella.....	17
1.5 Connessioni serie e parallelo	18
1.5.1 Connessione in serie.....	19
1.5.2 Connessione in parallelo	22
2. MODULO FOTOVOLTAICO.....	25
2.1 Rendimento dei moduli fotovoltaici	25
2.2 Collegamento dei moduli fotovoltaici	27
2.2.1 Diodi di protezione.....	29
2.3 Connessione con carico.....	30
3 ACQUISIZIONE SPERIMENTALE DELLA CURVA CORRENTE TENSIONE I-V.....	33
3.1 Circuito di misura operato.....	33
3.2 Transitorio di carica di un condensatore alimentato da generatore FV	35
3.3 Studio semplificato del transitorio di carica.....	36
3.3.1 Analisi transitorio primo tratto, con generatore ideale di corrente	37

3.3.2	Analisi transitorio secondo tratto, con generatore ideale di tensione.....	38
3.3.3	Approssimazione formula del carico capacitivo	40
3.4	Dimensionamento capacità per applicazione a 1500V	41
3.5	Dimensionamento resistenza di scarica	43
4	ELABOAZIONE MISURE	45
4.1	Strumenti per acquisizione dati	45
4.2	Procedura per riporto caratteristica I-V alle condizioni STC (CEI 82-5)	47
4.3	Determinazione dei parametri caratteristici V_{OC} , I_{SC} e R_S	49
5	SISTEMA DI ACQUISIZIONE CURVA I-V A 1500 V_{DC}	51
5.1	Ricerca di mercato per i componenti a 1500 V_{DC}	51
5.2	Scelta del sistema di condensatori	52
5.2	Scelta del sistema di resistenze.....	54
5.3	Scelta dei contattori.....	55
5.3.1	Gestione contattori in modalità manuale	57
5.4	Stima del costo del sistema automatico di misura	59
6	GESTIONE AUTOMATICA DEL SISTEMA DI MISURA	60
6.1	Gestione dei contattori in modalità Automatica	60
6.2	Interfaccia grafica GUI (<i>Graphical User Interface</i>)	66
6.2.1	Definizione generale di GUI.....	66
6.2.2	Logica di funzionamento per l'elaborazione	68
6.2.3	Design ed implementazione.....	71
6.2.4	Guida all'uso della GUI.....	78
6	ESPERIENZA DI MISURA SU UN MODULO DI PROVA	86
7.1	Modulo in prova	86
7.2	Elaborazione e risultati da interfaccia grafica	88
7.3	Verifica dell'accuratezza dei risultati da interfaccia.....	89
	CONCLUSIONI.....	92
	APPENDICE A.....	94

APPENDICE B	95
APPENDICE C	98
APPENDICE D	99
APPENDICE E	100
BIBLIOGRAFIA.....	102

INTRODUZIONE

Il negativo impatto ambientale dovuto all'utilizzo di combustibili fossili e l'aumento esponenziale dei prezzi sono alcuni dei fattori che hanno favorito la diffusione dei sistemi di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Tra queste, la tecnologia fotovoltaica rappresenta l'alternativa più diffusa e con diverse opportunità di sviluppo.

Questo lavoro di tesi si propone di implementare un sistema di acquisizione dati automatico per il rilevamento della caratteristica corrente-tensione (I-V) di generatori fotovoltaici (FV) operanti fino a 1500 V_{DC}. In particolare, allo scopo di dimensionare i condensatori e le resistenze necessari per lo svolgimento delle misurazioni, è stato scelto come riferimento un impianto con potenza installata di 250kW.

Nella prima parte dell'elaborato, si opera il dimensionamento di un sistema di condensatori per l'acquisizione dei segnali di corrente e tensione di un generatore FV. Oltre ai condensatori, sono stati dimensionati anche il carico resistivo, per dissipare l'energia immagazzinata dal sistema capacitivo durante la carica, e i componenti che permettono le manovre di carica e scarica. Tutti gli elementi del circuito di misura sono dimensionati per operare fino a 1500 V_{DC}, il nuovo limite di tensione applicabile su un generatore FV, previsto dalla norma CEI 82-25.

Nella seconda parte della tesi, è stato realizzato il circuito di controllo che gestisce la carica/scarica del sistema capacitivo in maniera manuale o automatica. A tal proposito, il circuito è composto da due contattori, due moduli relè di Arduino e tre led comandati dal microcontrollore Arduino. Il sistema si avvia con un pulsante manuale, implementando quindi i tempi di carica e scarica definiti in base alla taglia dei condensatori e delle resistenze.

In seguito è stata realizzata un'interfaccia grafica GUI (*Graphical User Interface*) in ambiente Matlab per elaborare le misure acquisite di un generatore FV. In particolare, l'interfaccia permette di ottenere le caratteristiche corrente-tensione (I-V) e potenza-tensione (P-V), sia nelle condizioni ambientali di misura sia in quelle di riferimento STC (*Standard Test Conditions*) Infine, per verificare l'accuratezza dell'interfaccia creata, sono stati confrontati i risultati di un modulo di prova, ottenuti sia con l'interfaccia proposta sia con il sistema utilizzato dal Dipartimento Energia del Politecnico di Torino.

1. INFORMAZIONI GENERALI SULLA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

1.1 Introduzione alla cella fotovoltaica

La crescente dipendenza energetica, impone, ai governi di tutto il mondo, di mettere in atto delle regolamentazioni che agevolino l'utilizzo delle fonti rinnovabili. Queste regolamentazioni sono anche necessarie sia per poter abbattere i costi dell'energia elettrica, sia per ridurre il negativo impatto ambientale dovuto alla produzione di energia da combustibili fossili.

Al giorno d'oggi, l'energia solare, è tra le fonti rinnovabili più promettenti e di più facile installazione.

La conversione diretta dell'energia avviene grazie alle celle fotovoltaiche che sono dei diodi a semiconduttore in grado di convertire la luce (visibile e non) in energia elettrica. Collegando in serie e/o in parallelo molte celle, si forma il modulo fotovoltaico.

Esiste una distinzione, tra le celle fotovoltaiche, fatta in base al processo di produzione. Esse, infatti, si distinguono in celle al silicio cristallino (monocristallino o policristallino) e in celle a film sottile (silicio amorfo).

Con riferimento alla tecnologia basata sul Silicio (*Si*), analizziamo brevemente il fenomeno fisico che crea il così detto *effetto fotoelettrico*. Il Silicio possiede 4 elettroni di valenza legati nel reticolo cristallino ad altri 4 atomi tramite legami covalenti, come si può vedere dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**-1.

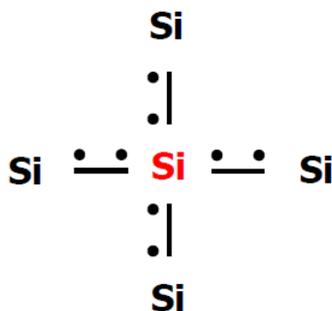


Fig. 1-1 Atomo di Silicio (*Si*)

Il funzionamento della cella, è dovuto alla creazione di una giunzione di tipo P-N, drogando, cioè, diversamente due regioni dello stesso semiconduttore.

Il drogaggio del semiconduttore, consiste nel sostituire, per esempio, ad un atomo di Si, elementi appartenenti a gruppi funzionali differenti, per esempio Boro (B) del terzo gruppo, quindi trivalente. In questo caso quindi, il Boro, legandosi a 3 atomi di Silicio lascia una lacuna e il drogaggio del cristallo è classificato come di tipo P.

Se viceversa, un atomo di Si, venisse sostituito da un atomo pentavalente come il Fosforo (P), rimarrebbe un elettrone libero, classificando il drogaggio del cristallo come di tipo N.

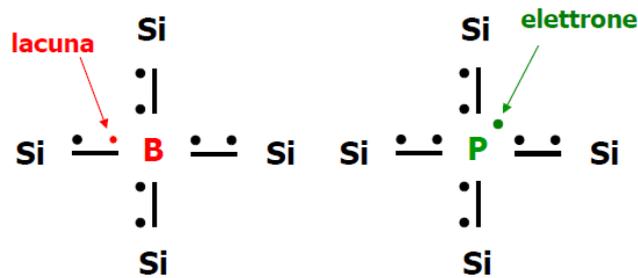


Fig. 1-2 Cristallo di tipo P, contenente gli atomi trivalenti e Cristallo di tipo N, contenente gli atomi pentavalenti

Mettendo a contatto i due strati drogati diversamente (P-N), avviene una diffusione bidirezionale, tale che, gli elettroni in eccesso nella regione di tipo N si diffondono nella regione di tipo P a più bassa concentrazione di elettroni e, viceversa, si attua una migrazione delle lacune, dalla regione di tipo P, verso lo strato di tipo N.

All’equilibrio si crea un campo elettrico E chiamato *campo di giunzione* che ha quindi l’effetto di separare gli elettroni dalle lacune.

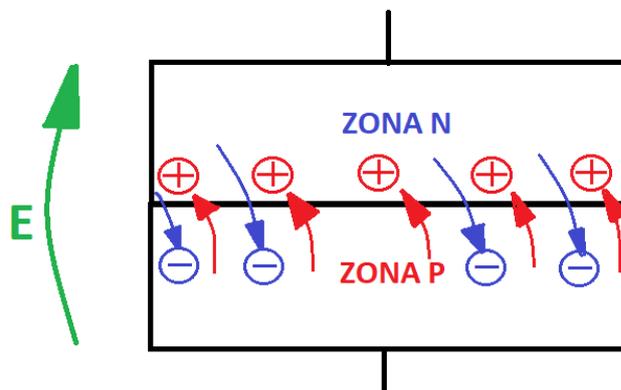


Fig. 1-3 Movimento di elettroni e lacune

Usando i fotoni presenti nella luce, come fonte di energia, è possibile far passare, gli elettroni più esterni, dalla banda di valenza a quella di conduzione, rendendoli liberi di muoversi. A questo punto, gli elettroni vengono spinti verso la “zona N” e le lacune verso la “zona P”.

Ponendo sulla superficie della cella degli elettrodi, tipicamente a griglia, si possono raccogliere queste cariche, riuscendo a far circolare corrente.

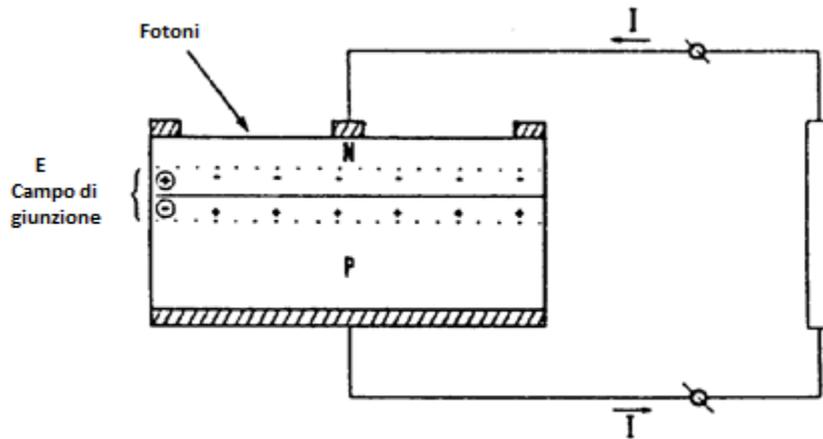


Fig. 1-4 Struttura cella solare p-Si

1.1.2 Circuito equivalente della cella solare

Il comportamento elettrico di una cella può essere rappresentato con un circuito equivalente come in Fig.1-5.

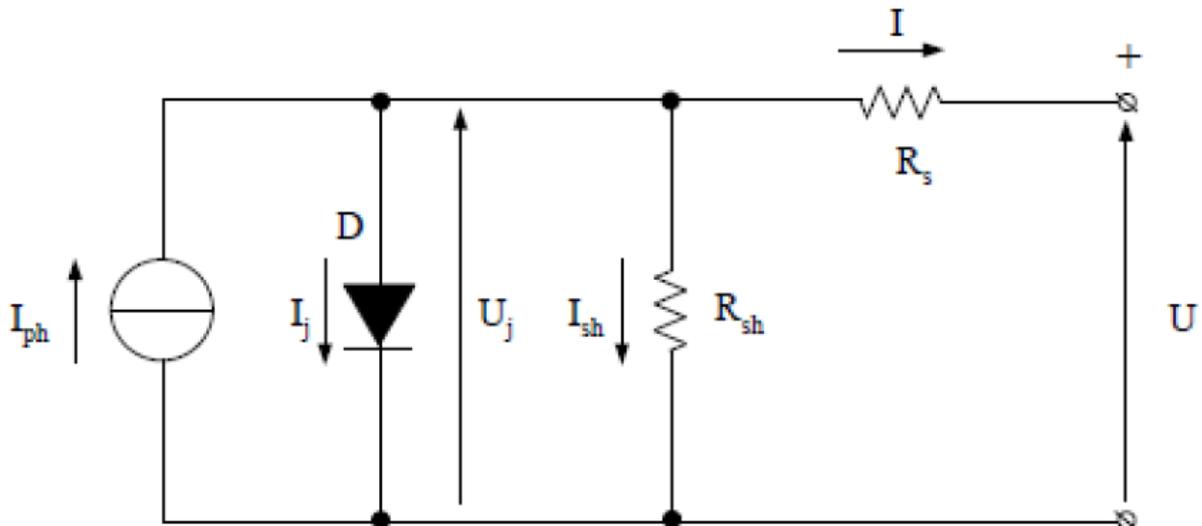


Fig. 1-5 Circuito elettrico equivalente di una cella fotovoltaica

La cella fotovoltaica genera una corrente I_{ph} proporzionale alle superficie della cella S ed alla irradianza G , secondo la formula:

$$I_{ph} = K \cdot S \cdot G \quad (1-1)$$

Il coefficiente K dipende dal tipo di cella solare considerata.

Il diodo D rappresenta la giunzione p-n descritta nel paragrafo precedente, e la corrente che passa al suo interno, segue la legge:

$$I_j = I_0(e^{A \cdot U_j} - 1) \quad (1-2)$$

Dove $-I_0$ è la corrente di saturazione inversa e U_j è la tensione che viene misurata ai terminali della giunzione. Il coefficiente A può essere calcolato in base alla seguente equazione:

$$A = \frac{q}{m \cdot k \cdot T} \quad (1-3)$$

Con q che rappresenta la carica dell'elettrone [J], T è la temperatura di giunzione [K], m è il fattore di qualità della giunzione (può variare tra 1 e 2) e k è la costante di Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

La resistenza R_{sh} è detta “resistenza di shunt” e rappresenta le perdite dovute alle correnti di dispersione nell'elettrodo frontale superiore, mentre la resistenza R_s è la “resistenza serie” e rappresenta le perdite per dispersione tra i due elettrodi.

La tensione U ai capi del carico diventa:

$$U = U_j - R_s \cdot I \quad (1-4)$$

E la corrente I che lo attraversa sarà quindi ottenuta svolgendo l'equazione al nodo:

$$I = I_{ph} - I_j - \frac{U_j}{R_{sh}} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q}{m \cdot k \cdot T} U_j} - 1 \right) - \frac{U_j}{R_{sh}} \quad (1-5)$$

1.1.3 Caratteristica I-V

Com'è già stato detto, il comportamento di una cella fotovoltaica, è uguale a quello di un diodo. Quindi, al buio, la sua caratteristica è la stessa di quella del diodo e appena viene illuminata, questa caratteristica, trasla verso il basso di una quantità pari alla corrente foto-generata, comportandosi come un generator di corrente.

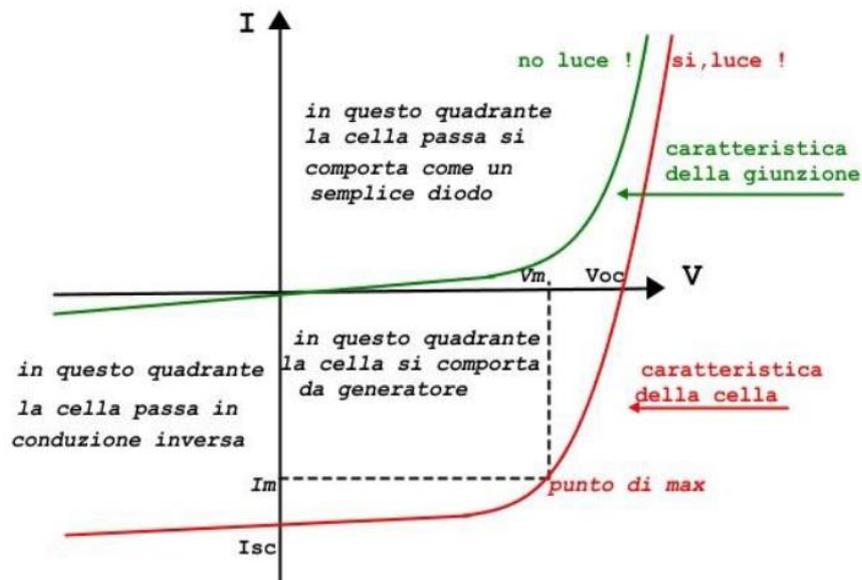


Fig. 1-6 Caratteristica I-V in condizioni di buio e non

Per comodità, la caratteristica, viene capovolta rispetto all'asse delle ascisse.

Si riporta di seguito la procedura necessaria per ottenere la caratteristica corrente-tensione di una cella fotovoltaica.

Di solito nelle applicazioni reali, si trascura il termine $\frac{U_j}{R_{sh}}$ poiché R_s è trascurabile rispetto a R_{sh} ($R_s \ll R_{sh}$). Con questa semplificazione, si ottiene, dunque, la caratteristica mostrata in Fig.1-6, che risulta dalla differenza tra la caratteristica del generatore ideale di corrente I_{ph} e quella del diodo I_j .

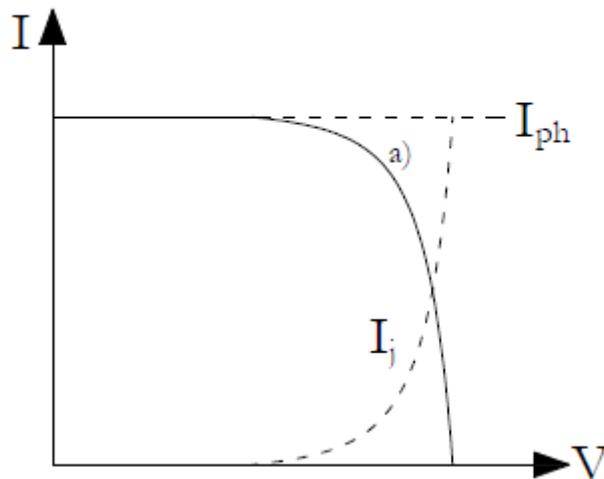


Fig. 1-7 Curva I(V) ottenuta assumendo R_{sh} infinito

Se non venisse trascurato il termine $\frac{U_j}{R_{sh}}$, si avrebbe un aumento della pendenza nel tratto orizzontale della curva e l'intersezione nel punto a circuito aperto ($I=0$ e $V=V_{oc}$) si sposterebbe verso tensioni più elevate, come riportato in Fig.1-7.

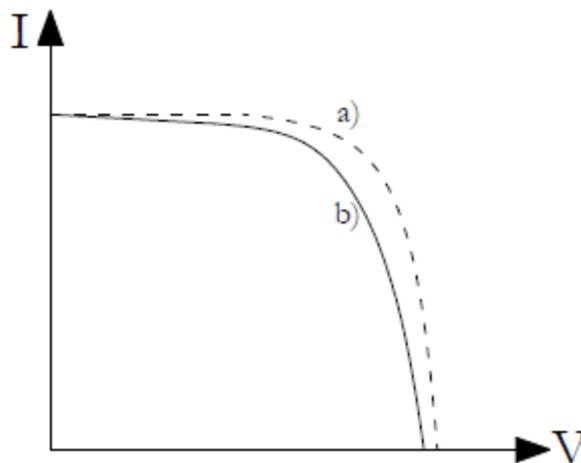


Fig. 1-8 Curva I(V) ottenuta non trascurando R_{sh}

Se nella formula (4) sostituiamo U_j , trascurando $\frac{U_j}{R_{sh}}$, si ottiene:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q}{m \cdot k \cdot T}(U + R_s I)} - 1 \right) \tag{1-6}$$

Il termine $R_s I$ permette quindi di ottenere la curva I(U) della cella solare, con una pendenza inferiore del tratto verticale come mostrato in Fig. 1-8.

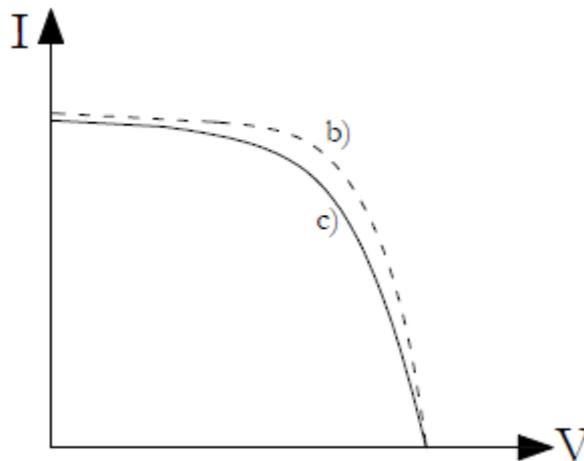


Fig. 1-9 Curva $I(V)$ di una cella solare

Questa curva fornisce informazioni riguardo l'energia elettrica che può essere prodotta dalla cella fotovoltaica. In particolare, riconosciamo tre punti più importanti, riportati sul datasheet dal costruttore, e sono:

- punto a circuito aperto per cui $I=0$ e $U=U_{oc}$;
- punto di cortocircuito per cui $I=I_{sc}$ e $U=0$;
- punto di massima potenza $I = I_M$ e $U = U_M$.

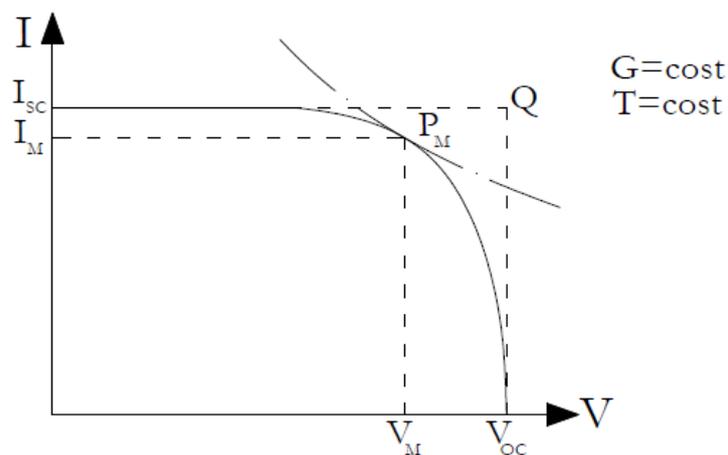


Fig. 1-10 Curva $I(U)$ cella solare

Con questi valori è possibile definire un parametro che permette di confrontare le prestazioni di una cella, questo parametro è il *Fill Factor* (FF) ed è espresso come:

$$FF = \frac{\text{Potenza massima cella reale}}{\text{Potenza massima cella ideale}} = \frac{I_M \cdot U_M}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad (1-7)$$

Più il FF è elevato, migliori sono le prestazioni della cella. In base alla tecnologia della cella, esistono dei valori tipici del FF , per esempio, per il silicio cristallino (c-Si) è 0,7-0,8 mentre per il silicio amorfo (a-Si) è 0,5-0,6. (Appunti corso Progettazione Impianti).

1.1.4 Dipendenza caratteristica I-V da irradianza e temperatura

Esiste una dipendenza della caratteristica I-V rispetto all'irraggiamento (G) ed alla temperatura (T). In particolare, come si può vedere in Fig.1-11, aumentando l'irraggiamento a temperatura costante, aumenta il punto corrispondente alla corrente di corto circuito I_{sc} , mentre il punto corrispondente alla tensione a vuoto V_{oc} , subisce piccole variazioni aumentando leggermente con l'aumento dell'irradianza.

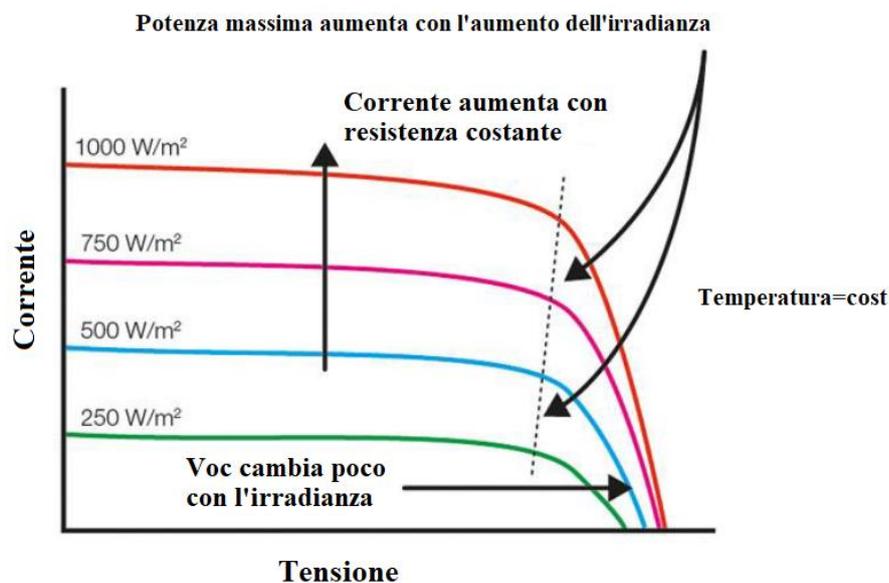


Fig. 1-11 Dipendenza curva I-V da irradianza

Si può notare, come l'area complessiva sottesa dalla curva, che quindi corrisponde alla potenza massima ottenibile, aumenti con il crescere dell'irradianza.

Viceversa, aumentando la temperatura con irraggiamento costante, la I_{sc} non aumenta significativamente, mentre, il parametro più sensibile all'aumento della temperatura è la tensione a vuoto V_{oc} .

In particolare, all'aumentare della temperatura, si riduce il punto V_{oc} . Quindi, in questo caso, la potenza massima ottenibile, diminuisce all'aumentare della temperatura.

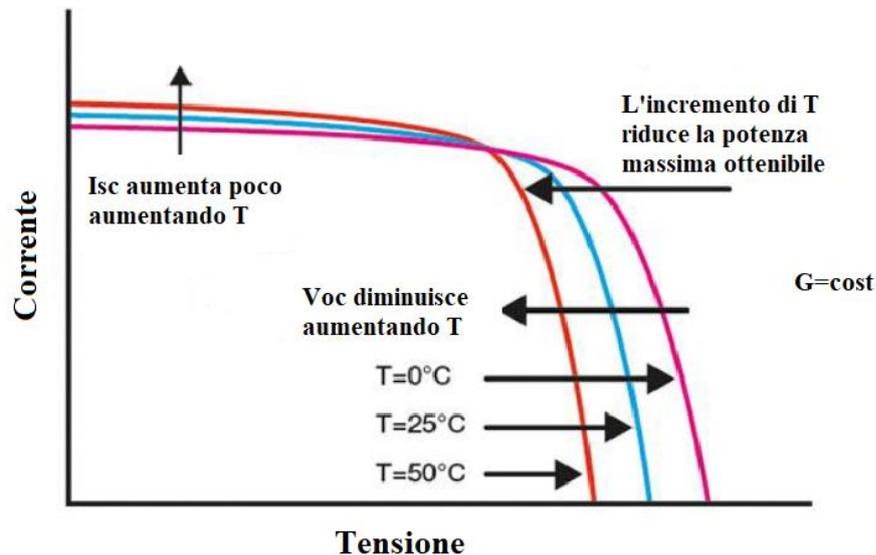


Fig. 1-12 Dipendenza curva I-V dalla temperatura

In generale, è quindi una ragionevole approssimazione considerare la corrente di corto circuito I_{sc} come dipendente solo dall'irraggiamento e la tensione a vuoto V_{oc} come dipendente solo dalla temperatura.

1.2 Dati tecnici e condizioni di prova

1.2.1 STC Standard Test Conditions

Esistono delle equazioni che consentono di definire la caratteristica di una cella fotovoltaica, al variare sia dell'irradianza che della temperatura.

Queste equazioni sono usate per definire le specifiche dei moduli fotovoltaici e fanno riferimento alle *Condizioni Standard* (STC-Standard Test Conditions), secondo la norma tecnica IEC/EN 60904, per cui:

- Irradianza in condizioni standard: $G_{STC} = 1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$;
- massa d'aria $AM = 1,5$;
- Temperatura di cella pari a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Le prestazioni di una cella o di un modulo fotovoltaico in *Condizioni Standard*, sono indispensabili per confrontare le prestazioni dei diversi moduli.

1.2.2 Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)

La Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) è la temperatura nominale di lavoro di una cella fotovoltaica che viene misurata in determinate condizioni ambientali.

In particolare, questa è la temperatura a cui si stabilizza il modulo a circuito aperto, sottoposto alle seguenti condizioni ambientali:

- irradianza $G = 800 \left[\frac{W}{m^2} \right]$;
- velocità del vento $v_{vento} = 1 \left[\frac{m}{s} \right]$;
- temperatura ambiente $T_a = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$;

Questo parametro è fornito dal costruttore e tipicamente si aggira intorno ai $40 \div 50 \text{ } ^\circ\text{C}$. Con l'NOCT, è possibile ricavare la temperatura di cella (T_c) in diverse condizioni di funzionamento (T_a e G misurata) tramite la seguente formula:

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{0,8} G_{mis} \quad (1-8)$$

1.2.3 Metodo della tensione a circuito aperto secondo la CEI 82-10

Per la tecnologia in silicio cristallino, la norma CEI EN 60904-5 (CEI 82-10), consiglia l'utilizzo del metodo descritto in questo paragrafo per ricavare la temperatura interna di funzionamento (*ECT - Equivalent Cell Temperature*) del dispositivo. Questo metodo sfrutta il fatto che la tensione a circuito aperto vari con la temperatura e lievemente con l'irraggiamento.

Conoscendo sia la tensione a vuoto in condizioni standard che il coefficiente termico β , è possibile determinare la temperatura equivalente di tutte le celle. Essendoci anche l'influenza dell'irradianza sulla tensione a vuoto, si può effettuare una ulteriore correzione.

È possibile usare questo metodo solo per le misure effettuate con irradianza al di sopra dei $200 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ poiché il coefficiente termico β , varia rapidamente se l'irradianza è inferiore a tale valore.

Il valore della ECT è ricavato usando la seguente espressione:

$$ECT = T_{aint\ funz} = \frac{A_1 + A_2 \cdot 273}{1 - A_2} \quad (1-9)$$

Con:

$$A_1 = T_{STC} + \frac{V_{OC(STC)} - V_{OC(mis)}}{\beta} \quad (1-10)$$

$$A_2 = \frac{\left(\frac{A \cdot k}{q} \right) \cdot N_S \cdot \ln \left(\frac{G_{STC}}{G_{mis}} \right)}{\beta} \quad (1-11)$$

Dove:

- A: fattore di qualità del diodo;
- K: costante di Boltzmann pari a $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K;
- q: carica elementare dell'elettrone pari a $1,6 \cdot 10^{-19}$ A · s ;
- N_S: numero celle in serie.

Il termine A_1 esprime la dipendenza della V_{OC} dalla temperatura, mentre il termine A_2 esprime la dipendenza della V_{OC} dall'irradianza. Essendo quest'ultima, una dipendenza modesta per valori di irradianza maggiori ai 200 W/m^2 , A_2 è trascurabile.

Per cui:

$$ECT = T_{aint\ funz} = T_{STC} + \frac{V_{OC(STC)} - V_{OC(mis)}}{\beta} \quad (1-12)$$

1.2.4 Variazione percentuale della potenza

È possibile valutare la diminuzione di potenza della cella, in funzione della sua temperatura, tramite un indicatore percentuale (ΔP_m), riferito alla temperatura ambiente standardizzata a 25°C:

$$\Delta P_m = \gamma_{pm} \cdot (T_c - 25) \quad (1-13)$$

Dove γ_{pm} è il coefficiente di variazione della potenza con la temperatura ed esprime la variazione percentuale di potenza [%/°C].

1.2.5 Definizione parametri di cella in funzione di irraggiamento e temperatura

Come è stato detto nel paragrafo 1.1.4, i principali parametri della cella (tensione, corrente e potenza), dipendono dalla temperatura e dall'irraggiamento solare. È possibile descrivere tali dipendenze con le espressioni analitiche descritte nel seguito.

1.2.5.1 Espressione analitica della I_{sc}

La dipendenza, della corrente di cortocircuito I_{sc} , da irraggiamento G e temperatura di cella T_c è espressa dalla seguente formula:

$$I_{sc}(G, T) = I_{sc}(STC) \cdot \frac{G}{1000} \cdot (1 + \alpha_{I_{sc}} \cdot \Delta T) \quad (1-14)$$

$$\Delta T = T_c - 25 \text{ °C} \quad (1-15)$$

I parametri dichiarati dal costruttore sul datasheet sono:

- $I_{sc}(STC)$ espressa in *Ampere*, cioè il valore della corrente di cortocircuito misurata in condizioni standard (STC);
- $\alpha_{I_{sc}}$ è il coefficiente termico della corrente di cortocircuito. Questo, termine generalmente, è espresso dal costruttore in %/°C, altre volte viene espresso in A/°C. Per passare da una unità di misura all'altra, basta applicare l'equazione 12:

$$\alpha_{I_{sc}}[A/°C] = \frac{I_{sc}(STC)[A]}{100} \cdot \alpha_{I_{sc}}[\%/°C] \quad (1-16)$$

I restanti parametri G [$\frac{W}{m^2}$] e T_c [$^{\circ}C$], sono valutati durante le misure.

1.2.5.2 Espressione analitica della U_{oc}

La dipendenza, della tensione a vuoto U_{oc} , dalla temperatura di cella è espressa dalla seguente formula:

$$U_{oc}(T) = U_{oc}(STC) \cdot (1 + \beta_{U_{oc}} \cdot \Delta T) \quad (1-17)$$

$$\Delta T = T_c - 25 \text{ } ^{\circ}C \quad (1-18)$$

I parametri dichiarati dal costruttore sul datasheet sono:

- $U_{oc}(STC)$ espressa in *Volt*, cioè il valore della tensione a vuoto misurata in condizioni standard (STC);
- $\beta_{U_{oc}}$ è il coefficiente termico della tensione a vuoto. Questo, termine generalmente, è espresso dal costruttore in $\%/^{\circ}C$, altre volte viene espresso in $V/^{\circ}C$. Per passare da una unità di misura all'altra, basta applicare l'equazione 15:

$$\beta_{U_{oc}}[V/^{\circ}C] = \frac{U_{oc}(STC)[V]}{100} \cdot \beta_{U_{oc}}[\%/^{\circ}C] \quad (1-19)$$

Il restante parametro è valutato durante la misura, in particolare:

- T_c espressa in $^{\circ}C$, è la temperatura di cella.

1.2.5.3 Espressione analitica della P_m

La dipendenza, della potenza P_m , da irraggiamento G e temperatura di cella T_c è espressa dalla seguente formula:

$$P_m(G, T) = P_m(STC) \cdot \frac{G}{1000} \cdot (1 + \gamma_{P_m} \cdot \Delta T) \quad (1-20)$$

$$\Delta T = T_c - 25 \text{ } ^{\circ}C \quad (1-21)$$

I parametri dichiarati dal costruttore sul datasheet sono:

- $P_m(STC)$ espressa in *Watt*, cioè il valore della potenza misurata in condizioni standard (STC);
- γ_{P_m} è il coefficiente termico della potenza. Questo, termine generalmente, è espresso dal costruttore in $\%/^{\circ}C$, altre volte viene espresso in $W/^{\circ}C$. Per passare da una unità di misura all'altra, basta applicare l'equazione 18:

$$\gamma_{P_m} [W/^{\circ}C] = \frac{P_m(STC) [W]}{100} \cdot \gamma_{P_m} [\%/^{\circ}C] \quad (1-22)$$

I restanti parametri $G \left[\frac{W}{m^2}\right]$ e $T_c [^{\circ}C]$, sono valutati durante le misure.

1.2.5.4 Espressione analitica del rendimento η

La dipendenza, del rendimento η della cella, da irraggiamento G e temperatura di cella T_c è espressa dalla seguente formula:

$$\eta = \frac{P_W}{G \cdot A} = \frac{P_m(STC)}{A} \cdot (1 + \gamma_{pm} \cdot \Delta T) \quad (1-23)$$

$$\Delta T = T_c - 25 \text{ } ^{\circ}C \quad (1-24)$$

I parametri dichiarati dal costruttore sul datasheet sono:

- $P_m(STC)$ espressa in *Watt*, cioè il valore della potenza misurata in condizioni standard (STC);
- γ_{P_m} è il coefficiente termico della potenza. Questo, termine generalmente, è espresso dal costruttore in $\%/^{\circ}C$, altre volte viene espresso in $A/^{\circ}C$.

I restanti parametri $G \left[\frac{W}{m^2}\right]$ e $T_c [^{\circ}C]$, sono valutati durante le misure.

1.3 Fattori di perdita di una cella fotovoltaica

Le perdite in una cella fotovoltaica possono essere ridotte al minimo ma non completamente evitate poiché i seguenti fattori influenzano il suo comportamento:

- Riflessione e mascheramento della superficie della cella. Questo tipo di perdita si verifica quando una parte della radiazione incidente viene riflessa o colpisce la griglia frontale costituendo di solito il 10% delle perdite globali. Al fine di ridurre al minimo questo tipo di perdite, vengono applicati dei rivestimenti antiriflesso sulla superficie della cella e sulla superficie anteriore della griglia;
- Eccessi di energia dei fotoni incidenti sulla cella. Questo tipo di perdita si verifica quando i fotoni incidenti sulla superficie della cella, hanno una maggiore quantità di energia rispetto al bandgap del semiconduttore necessario a generare una coppia elettrone-lacuna. Questa ulteriore quantità di energia viene persa sotto forma di calore e costituisce solitamente il 25% delle perdite globali;
- Scarsa energia dei fotoni incidenti sulla cella. Questo tipo di perdita si verifica quando i fotoni incidenti sulla superficie della cella non hanno energia sufficiente per creare una coppia elettrone-lacuna dissipando interamente, questa poca energia, sotto forma di calore. Questa perdita costituisce di solito il 20% delle perdite globali;
- Fattore di ricombinazione. Può verificarsi una ricombinazione delle coppie elettrone-lacuna, e in questo caso si ha l'assorbimento della loro energia in forma di energia termica. La struttura cristallina del materiale (con presenza di impurità e difetti) influenza fortemente questa perdita, che può arrivare fino al 2% delle perdite globali;
- *Fill Factor*. Il diodo e le resistenze R_{sh} e R_s dissipano una parte significativa dell'energia elettrica prodotta. Infatti l'energia, non è interamente trasferita al circuito esterno e, di conseguenza, viene generata la tipica deformazione della curva caratteristica delle celle solari rispetto alla forma rettangolare ideale (Fig.10). Questo tipo di perdita può arrivare fino al 20% delle perdite totali.

1.4 Potenza ed efficienza della cella

L'efficienza di conversione è definita come:

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_i} \quad (1-25)$$

Dove P_{MAX} [W] è la massima potenza elettrica che la cella è in grado di produrre e P_i è l'irradianza incidente sulla superficie A [m^2]. Quindi si avrà $P_i = G \cdot A$.

L'efficienza di conversione delle celle fotovoltaiche disponibili sul mercato può raggiungere valori fino a circa il 23%.

In Fig.1-13 sono mostrati, per una cella con superficie S , i tipici profili della densità di corrente $J = \frac{I}{S}$ e della densità di potenza $p_U = \frac{P_U}{S}$, dove P_U è la potenza utile prodotta. Queste quantità sono espresse in funzione della tensione U :

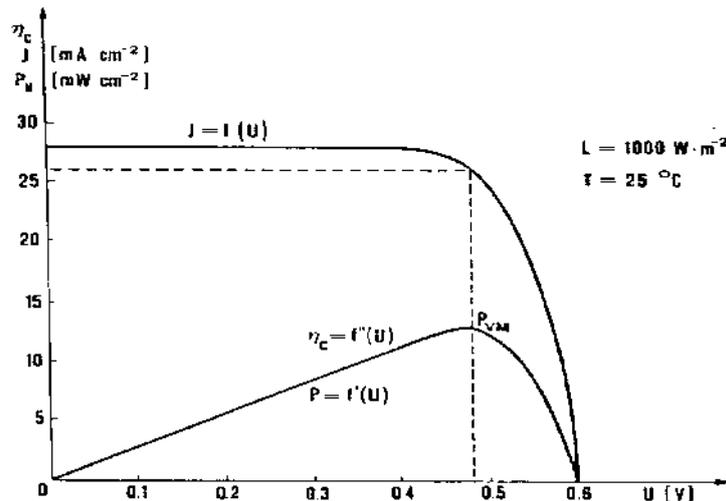


Fig. 1-13 Dipendenza dalla densità di corrente J e dalla densità di potenza p_U dalla tensione U

Inoltre, l'efficienza di conversione ha la stessa curva caratteristica della densità di potenza p_U e la potenza di ingresso P_i è costante per un dato sito geografico a certe condizioni meteo.

1.5 Connessioni serie e parallelo

In condizioni ottimali di carico e irradianza, una singola cella c-Si, è in grado di generare un valore di tensione $U \approx 0,5 - 0,6 V$ che è quasi indipendente dalla quantità di superficie irradiata. La corrente, invece, dipende fortemente dalla superficie e dei valori tipici della densità della corrente di corto circuito sono $J_{SC} \approx 25 - 35 \frac{mA}{cm^2}$ ($I_{SC} \approx 4 - 5 A$ per 12,5 cm-lato celle e $I_{SC} \approx 6 - 8$ cm-lato celle). In condizioni reali, i valori di tensione e corrente richiesti dai carichi sono molto più alti, quindi sono necessarie connessioni in serie ed in parallelo di più celle.

La connessione di più celle è ottenuta con due contatti metallici, uno posto sul lato anteriore e l'altro sul lato posteriore. I contatti posteriori coprono interamente la superficie in quanto questa

parte della cella non partecipa attivamente alla conversione di energia non venendo esposta alla radiazione solare. Viceversa, sulla parte frontale, ha luogo il processo di conversione ed è quindi necessario avere un'area irradiata di grandi dimensioni creando un compromesso tra la completa trasparenza alla radiazione incidente e la massima conversione di energia attuabile.

1.5.1 Connessione in serie

Se vengono collegate in serie N_s celle identiche, formando una stringa, ed una di esse risulta con una curva $I(V)$ diversa dalle altre, la caratteristica equivalente, ad una certa corrente, è data dalla somma delle tensioni di tutte le celle con caratteristica uguale (N_s-1) e dalla tensione della cella con caratteristica differente.

Questo è un tipico esempio di deviazione reciproca (*mismatching* o *mismatch*) della curva $I(V)$ può essere causata da limitate tolleranze di produzione o ombreggiature che coinvolgono particolari aree di un sistema fotovoltaico (o una singola cella, come descritto in precedenza).

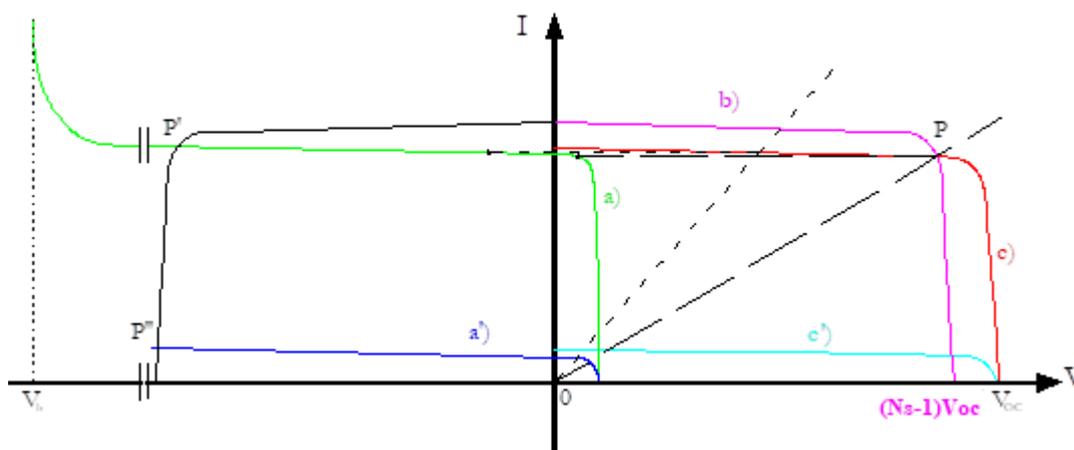


Fig. 1-14 Caratteristiche $I(V)$ delle celle collegate in serie in diverse condizioni

In Fig.1-14 sono rappresentate diverse curve $I(V)$ di celle collegate in serie con differenti problemi di mismatch. Nel dettaglio:

- Curva (a): differisce dalle altre per difetto costruttivo;
- Curva (a'): diversa dalle altre perché ombreggiata;
- Curva (b): risultante delle caratteristiche delle (N_s-1) celle normalmente funzionanti;
- Curva (c): è la risultante della curva (b) e della curva (a);
- Curva (c'): è la risultante della curva (b) e della curva (a');

È possibile osservare che la potenza massima (punto P) dell'intera stringa, in entrambe le situazioni (curva(c) e curva(c')), è significativamente inferiore alla potenza massima ottenibile con celle a funzionamento normale Ns (curva(b)).

In particolare, il mismatch causato dall'ombreggiatura determina gli effetti peggiori per la produzione di energia da sistema solare.

Dalla curva I(V) di un sistema fotovoltaico, è possibile verificare che la tensione di circuito aperto V_{OC} è data dalla somma delle tensioni di circuito aperto di ciascuna cella per cui:

$$U_{OC} = \sum_i U_{OC_i} \quad (1-26)$$

Invece, la corrente di corto circuito I_{SC} corrisponde circa al minimo valore di corto circuito tra le singole celle:

$$I_{SC} \cong (I_{SC_i})_{\min} \quad (1-27)$$

Nel caso di una cella completamente ombreggiata, la corrente di cortocircuito è nulla ($I_{SC}=0$) e si comporta come un carico puramente resistivo. Al contrario, se la curva (a)/(a') non è molto diversa dalle altre, avviene una riduzione della corrente di corto circuito permettendo comunque al sistema fotovoltaico di produrre seppur in modo minore.

Se il valore della resistenza di carico è inferiore a quello corrispondente al funzionamento nel punto P, la cella (a) funziona come un carico con tensione inversa. La situazione più pericolosa è il cortocircuito ai terminali delle celle Ns in serie, poiché ai suoi terminali è applicata la somma delle tensioni delle celle completamente irradiate $(N_s - 1) \cdot U$.

I punti P' e P'' rappresentano le condizioni operative per le due configurazioni (rispettivamente: difetti costruttivi e ombreggiatura), ottenuti in modo simmetrico rispetto all'asse della corrente.

In questa condizione, l'energia che la cella difettosa deve dissipare può essere troppo alta formando dei punti caldi (*hot spot*) che, dopo un certo tempo, possono portare alla rottura irreversibile della cella.

In particolare, il limite per la cella solare, è la tensione di breakdown U_b e se la tensione delle celle Ns-1 supera questo valore, si ha la rottura istantanea della cella fotovoltaica. Valori tipici della

tensione di rottura è $U_b = 25 - 50V$ per una cella al silicio, ma poiché ciascuna cella è in grado di fornire una tensione $U \approx 0,5V$, è necessario un collegamento in serie di 50-100 celle per danneggiare la cella.

Il modo migliore per evitare la formazione di hot spot è collegare in parallelo ad ogni cella un diodo di bypass (D_p). Approssimando le celle come generatori ideali di corrente, la Fig.1-15 mostra quanto descritto:

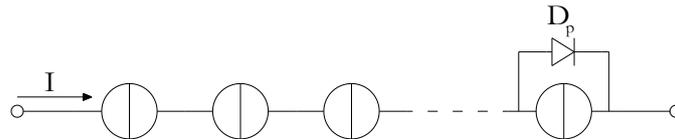


Fig. 1-15 Diodo di by-pass in parallelo alle celle collegate in serie

Il compito del diodo D_p è far sì che la corrente continui a confluire anche se una cella è in stato di mismatch evitando che agisca come un carico garantendo, quindi, la produzione continua di energia elettrica. Inoltre, la corrente di corto circuito della stringa, non sarà più limitata al valore

Il diodo D_p ha il compito di fare in modo che la corrente di corto circuito della stringa non sia più limitata al valore della corrente della cella con caratteristica peggiore (a'), ma sia pari a quello delle rimanenti celle in serie con migliore caratteristica. Quindi permette di non avere il brusco calo di potenza erogata (curva (c')) ma alla potenza totale in uscita viene sottratta solo la potenza della cella "guasta".

Tuttavia, nelle applicazioni reali, il collegamento di un diodo a ciascuna cella non è conveniente e un buon compromesso è quello di collegare un diodo a stringhe di celle (di solito gruppi di 18-24-36 celle collegate) che costituiscono un modulo fotovoltaico (modulo PV).

Nel caso di celle collegate in serie con diodi di protezione in parallelo, è possibile osservare che:

- Se una cella è interrotta, la stringa non produce energia (nessuna corrente nella stringa);
- Se una cella è cortocircuitata, la potenza prodotta dalla stringa viene ridotta solo del contributo della cella cortocircuitata.

1.5.2 Connessione in parallelo

Analogamente al caso precedente, se si collegano in serie N_p celle identiche, e una di esse risulta con curva $I(V)$ diversa dalle altre, la caratteristica equivalente, ad una certa tensione, è data dalla somma delle correnti di tutte le celle con caratteristica uguale (N_p-1) in buono stato e dalla corrente della cella con caratteristica differente.

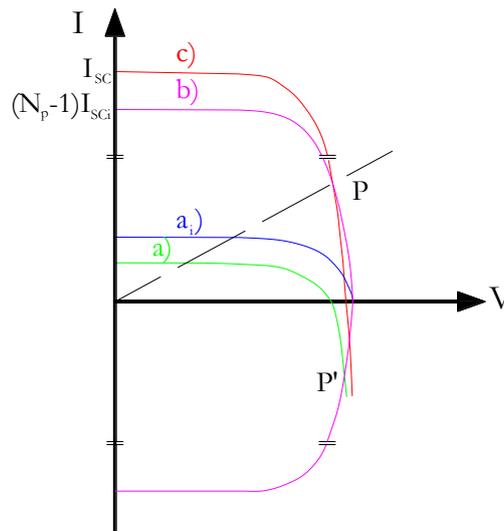


Fig. 1-16 Caratteristiche $I(V)$ delle celle collegate in parallelo in diverse condizioni

In Fig.1-16 sono rappresentate diverse curve $I(V)$ di celle collegate in parallelo con differenti problemi di mismatch. Nel dettaglio:

- Curva (a): differisce dalle altre per difetto costruttivo;
- Curva (a_i): caratteristica di una singola cella in buone condizioni;
- Curva (b): è la risultante delle caratteristiche (N_p-1) celle normalmente funzionanti
- Curva (c): è la risultante delle caratteristiche (N_p-1) celle normalmente funzionanti e della curva(a);

Dalla curva $I(V)$ risultante, è possibile verificare che la corrente di corto circuito I_{sc} è pari alla somma delle correnti di corto circuito delle singole celle.

$$I_{sc} = \sum_i I_{sc_i} \tag{1-28}$$

Invece, la tensione a vuoto V_{OC} corrisponde circa al valore minimo della tensione a circuito aperto tra le singole celle:

$$U_{OC} \cong (U_{OCi})_{min} \quad (1-29)$$

Dal punto di vista del carico, se una cella è oscurata, le celle collegate in parallelo si comportano come N_p-1 celle irradiate. Diversamente dalla connessione in serie, la condizione peggiore è quella di circuito aperto, infatti in questa situazione, la cella difettosa è costretta ad assorbire l'intera corrente che scorre nelle N_p-1 celle normalmente operative.

Se l'assorbimento di potenza diventa troppo alto, può causare una sovratemperatura che danneggia la cella. Quando la cella è danneggiata, smette di funzionare e le restanti N_p-1 celle tornano a funzionare di nuovo in parallelo. In generale la connessione in parallelo delle singole celle non è diffusa.

Per quanto riguarda il punto di vista del carico, tuttavia, l'influenza di una cella ombrata con connessione in parallelo, è inferiore rispetto al caso di connessione in serie.

La migliore soluzione teorica sarebbe quella di collegare un diodo D_s in serie a ciascuna cella in parallelo poiché questa configurazione eviterebbe che la cella difettosa funzioni come un carico con corrente inversa. Tuttavia, non può essere applicato al parallelo di singole celle poiché la caduta di tensione ai terminali di un diodo è dello stesso ordine di quella su dalla singola cella. Pertanto, è più convenzionale applicare questa protezione a stringhe di diverse decine di celle collegate in serie, come mostrato in Fig.1-17.

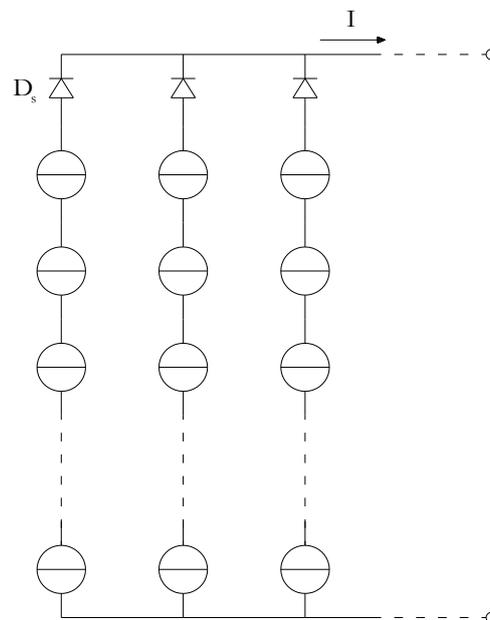


Fig. 1-17 Diodo di protezione in serie alle celle

Tuttavia, in entrambe le tipologie di connessione (serie e parallelo), è vantaggioso avere celle con caratteristiche $I(V)$ le più simili tra loro al fine di evitare i problemi analizzati.

Pertanto, nella costruzione di un modulo, è molto importante un'attenta selezione delle celle (*sorting*) da collegare, verificando che abbiano una curva $I(V)$ il più simile tra loro.

Nonostante questa selezione però, alcune perdite di potenza non possono essere evitate e la potenza massima ottenibile è sempre inferiore alla somma della potenza massima dei singoli moduli. Per questo motivo si sottrae alla potenza massima sempre il 2-3% della potenza di progetto.

2. MODULO FOTOVOLTAICO

Collegando elettricamente diverse celle fotovoltaiche tra loro (ad esempio 36 o 72 celle) è possibile ottenere un assieme che, opportunamente incapsulato e irrigidito può essere usato più agevolmente; a questo dispositivo è stato dato il nome di *modulo fotovoltaico*.



Fig. 2-1 Modulo fotovoltaico a 72 celle

2.1 Rendimento dei moduli fotovoltaici

È possibile valutare la potenza solare (P_s) incidente su un modulo fotovoltaico di area A data una certa irradianza (G) e una temperatura (T), secondo la seguente formula:

$$P_s = G \cdot A \quad (2-1)$$

Se con P_M indichiamo la potenza massima che un modulo è in grado di produrre, il rendimento globale del modulo è :

$$\eta_M = \frac{P_M}{P_s} = \frac{P_M}{G \cdot A} \quad (2-2)$$

In alternativa è possibile esprimere il rendimento globale tramite i rendimenti parziali:

$$\eta_M = \eta_P \cdot \eta_{EC} \cdot \eta_{IM} \quad (2-3)$$

Dove:

η_M = rendimento globale del modulo;

η_P = rendimento di riempimento;

η_{EC} = rendimento di incapsulamento;

η_{IM} = rendimento di irradianza disuniforme;

Il rendimento di riempimento η_P tiene conto del fatto che a partecipare attivamente alla conversione di energia è solo l'area delle celle fotovoltaiche e non tutta l'area del modulo. Pertanto, è il rapporto tra l'area che occupano le celle e l'area totale del modulo e dà valori tipici di efficienza di riempimento di circa l'85%.

Il rendimento di incapsulamento η_{EC} è espresso dalla seguente formula:

$$\eta_{EC} = \eta_C \cdot \eta_T \cdot \eta_{MIS} \quad (2-4)$$

Con:

η_C = rendimento di conversione fotovoltaica della cella senza il vetro di copertura e senza la resina incapsulante

η_T = efficienza ottica del vetro e della resina. Considera l'assorbimento della radiazione solare di questi materiali che è $\approx 95\%$;

η_{MIS} = rendimento che, per un dato valore di irradianza, è determinato sia dall'eventuale disuniformità tra le caratteristiche I(V) delle celle (*mismatch*), sia dalle perdite per effetto Joule delle connessioni tra le celle ed è $\approx 95\%$;

2.2 Collegamento dei moduli fotovoltaici

Se si escludono le applicazioni che fanno uso di un solo modulo, in genere è necessario collegare tra loro in serie/parallelo più moduli fotovoltaici per ottenere la potenza desiderata.

Il numero di moduli collegati in serie, determina la tensione del sistema fotovoltaico collegato alla rete e che quindi corrisponde alla tensione d'ingresso sull'inverter.

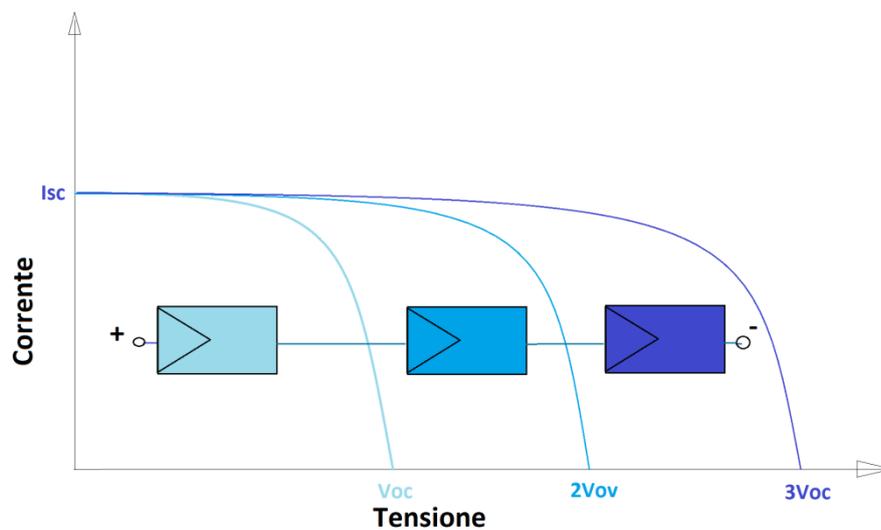


Fig. 2-2 Connessione in serie di tre moduli FV

Collegando in parallelo più stringhe, aumenta la corrente di corto circuito in uscita ai terminali del sistema fotovoltaico.

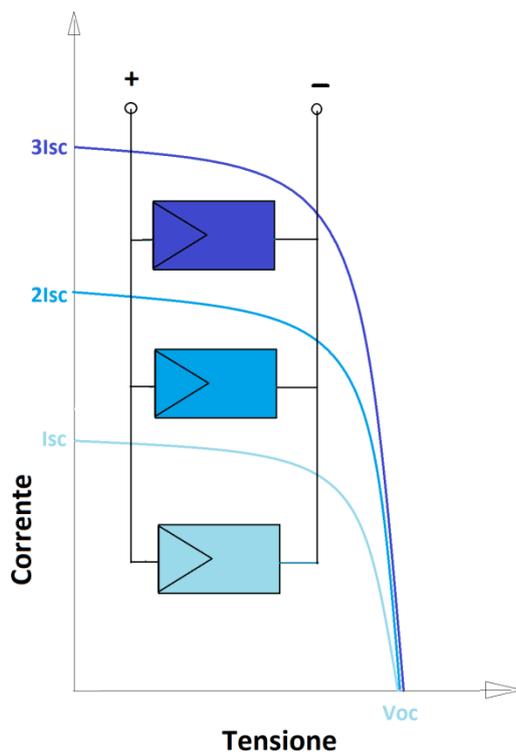


Fig. 2-3 Connessione in parallelo di tre moduli FV

Collegando n moduli uguali tra loro in serie si forma una *stringa* e collegando m stringhe in parallelo si realizza un *array*.

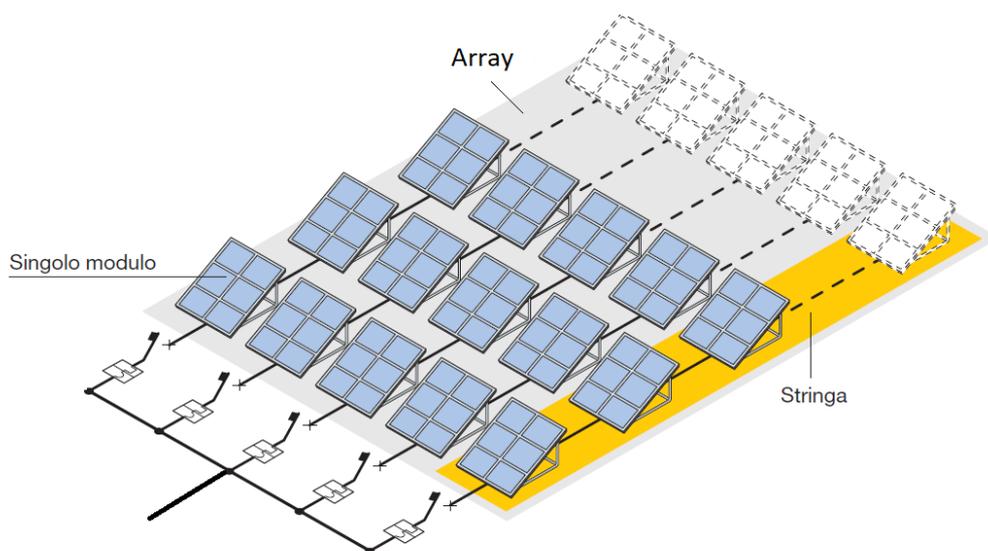


Fig. 2-4 Collegamento di moduli FV

È importante che in un array fotovoltaico, analogamente a quanto visto per le celle, le caratteristiche e le condizioni operative di ogni singolo modulo siano le più uniformi possibili per non avere considerevoli perdite di efficienza.

Da un punto di vista qualitativo, il comportamento elettrico di un array fotovoltaico è simile a quello dei moduli che lo compongono che a loro volta hanno una curva corrente-tensione pari alla somma delle caratteristiche delle singole celle.

2.2.1 Diodi di protezione

Se in un modulo di una stringa avviene un'anomalia (*mismatch*), facendo funzionare il modulo come utilizzatore, l'intera stringa non produrrebbe più energia. Per evitare ciò si collega in parallelo ad ogni modulo un diodo di bypass D_p che in condizioni di normale funzionamento non conduce come mostrato in Fig.2-5.

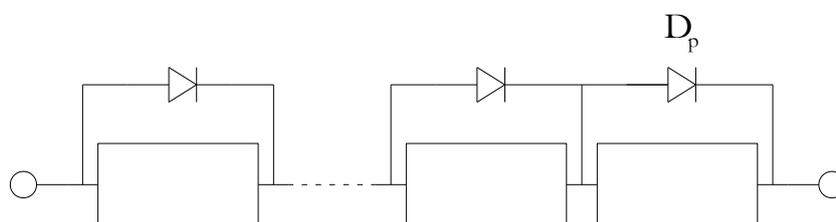


Fig. 2-5 Diodi di protezione in parallelo D_p

Per proteggere i moduli collegati in parallelo, occorre installare un diodo di protezione D_s in serie al modulo o alla stringa come mostrato in Fig.2-6. Il diodo sarà percorso dalla corrente generata dal modulo (o dai moduli) provocando una caduta di tensione dovuta al suo valore di tensione di soglia (0,6-0,8 V). Questa tensione di soglia deve essere trascurabile rispetto alla tensione generata dal modulo (o dai moduli) al fine di limitare le perdite di potenza nel sistema.

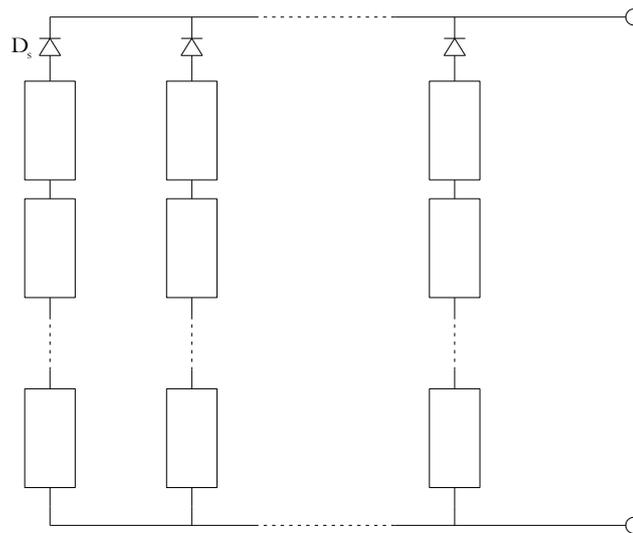


Fig. 2-6 Diodi di protezione D_s in serie alle stringhe

Se una o più celle in una stringa sono difettose, viene creata una dissimmetria in tensione a circuito aperto tra le stringhe collegate in parallelo, pertanto il diodo D_s agisce come un blocco scollegando la stringa interessata. In questo caso, quindi, la stringa non produrrà più energia. Tuttavia, questa situazione è rara quando la tensione operativa è sufficientemente bassa rispetto alla tensione a vuoto. Infatti, nei sistemi con dispositivi MPPT la tensione operativa è circa l'80% della tensione a vuoto ed è possibile non utilizzare questi diodi di protezione.

2.3 Connessione con carico

In Fig. 2-7, è mostrata una caratteristica reale di un modulo di 36 celle in serie connesso ad un carico e con irradianza $G=1000\text{W/m}^2$ alla temperatura di 25°C :

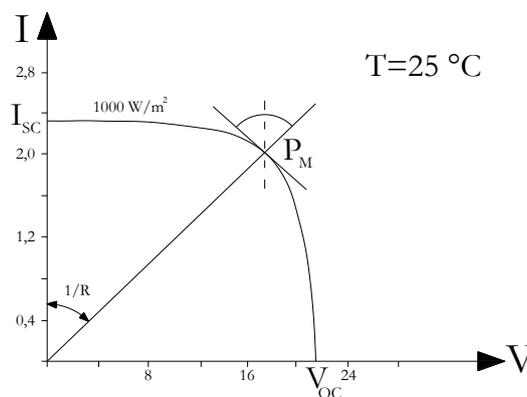


Fig. 2-7 Tipica caratteristica $I(V)$ di un modulo fotovoltaico

L'intersezione tra la caratteristica $I(V)$ del modulo e quella del carico, individua il punto di lavoro. Le due condizioni più rilevanti sono quella di corto circuito ($I=I_{SC}$ e $V=0$) e la condizione di circuito aperto ($I=0$ e $V=V_{OC}$).

Inoltre, il comportamento del modulo fotovoltaico, è possibile approssimarlo in base alla regione di lavoro. Infatti nel tratto $I_{SC}-P_M$ (dove P_M è il punto di massima potenza), il comportamento del modulo è approssimabile a quello di un generatore ideale di corrente, mentre nel tratto P_M-V_{OC} è approssimabile al comportamento di un generatore ideale di tensione.

Il migliore punto di funzionamento è il punto di massima potenza P_M , quindi, per sfruttare a pieno il generatore fotovoltaico, è necessario collegare un carico adeguato.

Nella Fig.2-7 il carico, che è puramente resistivo, deve avere una resistenza ottimale definita dalla retta con pendenza $1/R$. In questo caso, la pendenza della curva $I(V)$ è uguale alla pendenza della retta di carico $0-P_M$ ed è verificata la seguente espressione

$$\frac{dI}{dV} = \frac{1}{R} \quad (2-5)$$

Analogamente a quanto visto per le celle, l'irraggiamento (G) e la temperatura (T) hanno influenza sulla curva. In particolare, a temperatura costante e diminuendo l'irradianza, la corrente di corto circuito diminuisce in modo proporzionale mentre la tensione a vuoto resta costante.

In Fig.2-8 è possibile notare come aumentando l'irradianza, il punto di lavoro individuato dall'intersezione con la retta di carico (con R costante) si sposta aumentando il punto di massima potenza al crescere dell'irradianza. Dal punto C al punto A è definito il luogo dei punti di massima potenza, che in prima approssimazione può essere visto come una retta verticale.

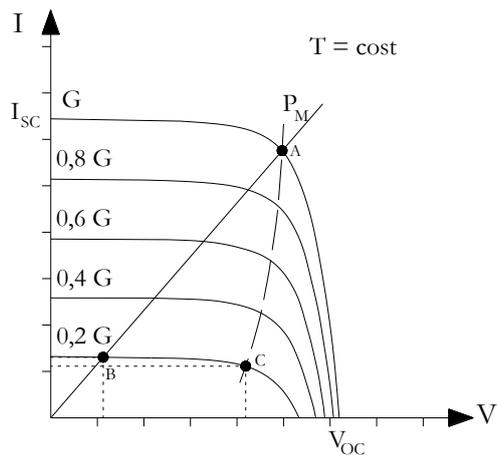


Fig. 2-8 Influenza dell'irradianza sul punto di massima potenza

Aumentando invece la temperatura i punti di massima potenza sono individuati non più da una retta ma da una regione sul piano I-V come mostrato in Fig.2-9.

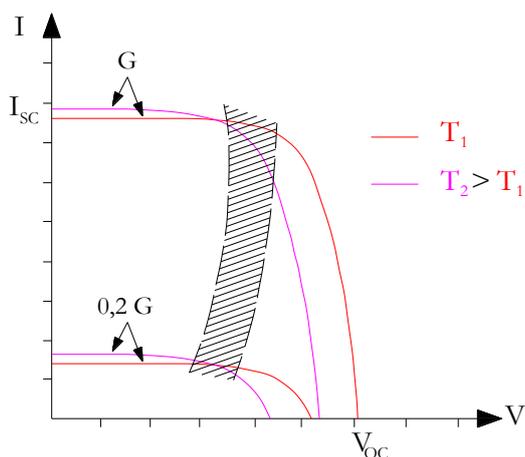


Fig. 2-9 Influenza della temperatura sul punto di massima potenza

Per assicurarsi che l'array fotovoltaico funzioni sempre nel punto di massima potenza MPP (Maximum Power Point) si utilizzano degli inseguitori del punto di massima potenza chiamati MPPT (Maximum Power Point Tracker). Un MPPT essenzialmente analizza ogni 5 minuti la curva caratteristica I(V) definendo il punto di massima potenza e adattando ad esso il carico.

3 ACQUISIZIONE SPERIMENTALE DELLA CURVA CORRENTE TENSIONE I-V

A causa dell'azione combinata dei fattori ambientali, come la luce, la temperatura, l'ossigeno e l'umidità, le celle solari e quindi i moduli fotovoltaici, subiscono nel tempo un deterioramento. Inoltre possono presentarsi difetti dovuti a cause esterne, come ad esempio danni da trasporto, eventi atmosferici come fulminazione o grandine, installazione non corretta o anche difetti di produzione.

Come detto precedentemente, un guasto sul modulo fotovoltaico, porta a ridurre la sua potenza massima erogabile, il che si traduce in perdita economica per il proprietario dell'impianto. È quindi interesse di quest'ultimo poter valutare le condizioni di funzionamento per prevedere o riparare eventuali danni sui moduli.

Per far ciò è necessario poter definire la curva I-V dell'impianto FV individuando il punto di massima potenza (MPP) e effettuando il riporto della curva alle condizioni STC, secondo la norma IEC/EN 60904, sarà possibile confrontare i valori nel punto di massima potenza, con i dati di targa forniti dal costruttore.

In questo capitolo viene affrontato il primo dei due obiettivi prefissati per questo lavoro di tesi riguardante il dimensionamento di uno strumento, che operi fino a 1500 V_{DC}, composto da un sistema di condensatori e da un sistema di resistenze, che consenta l'acquisizione dei segnali di corrente e tensione.

Il valore di tensione pari a 1500 V_{DC}, corrisponde al nuovo limite, previsto dalla norma CEI 82-25, che può essere applicato ad un generatore fotovoltaico.

3.1 Circuito di misura operato

Nella letteratura, sono descritti diversi metodi che consentono di definire la caratteristica I-V e P-V di un generatore FV.

Il metodo su cui è basato questo studio è un metodo dinamico che consiste nella carica di un carico capacitivo esterno secondo lo schema elettrico in Fig. 3-1.

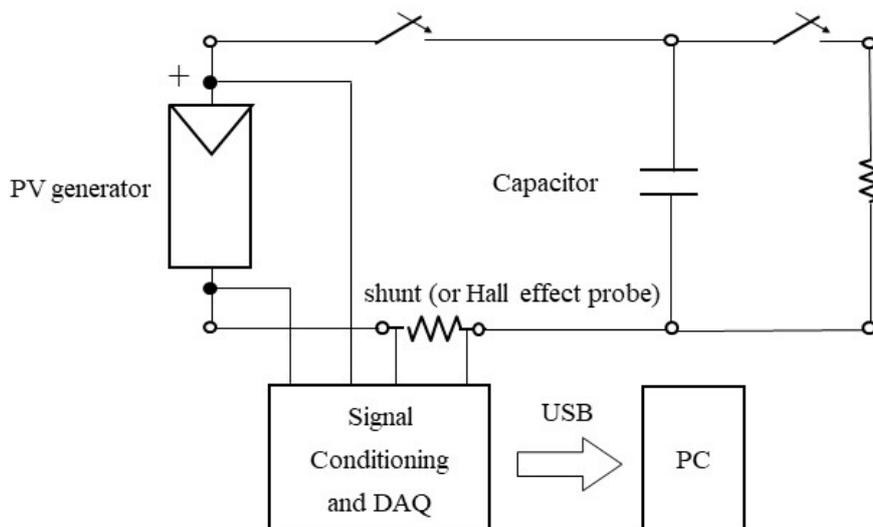


Fig. 3-1 Circuito di misura

Il procedimento di acquisizione delle misure di corrente e tensione avviene durante la carica del sistema capacitivo, che inizialmente è scarico, ed è reso possibile usando un modulo DAQ (*Data Acquisition*) che permette la successiva elaborazione da PC.

Questo metodo permette di ottenere le misure in un tempo molto breve che dipenderà dalla taglia del condensatore ($\cong 5-100$ ms). Essendo quindi un processo molto veloce, si evita che i parametri ambientali, come irraggiamento e temperatura, non cambino durante le misure, garantendo l'uniformità dei valori di corrente e tensione registrati.

La resistenza in parallelo al condensatore, serve per poter scaricare l'energia accumulata dal condensatore al termine della misura.

3.2 Transitorio di carica di un condensatore alimentato da generatore FV

In Fig.3-2 è riportato il circuito equivalente di un modulo solare collegato alla capacità esterna tramite un interruttore di potenza PB. La capacità è modellizzata dal parallelo della capacità con la sua resistenza di isolamento R_c . Nello schema sono stati trascurati i parametri parassitici di giunzione e di accoppiamento verso terra del modulo.

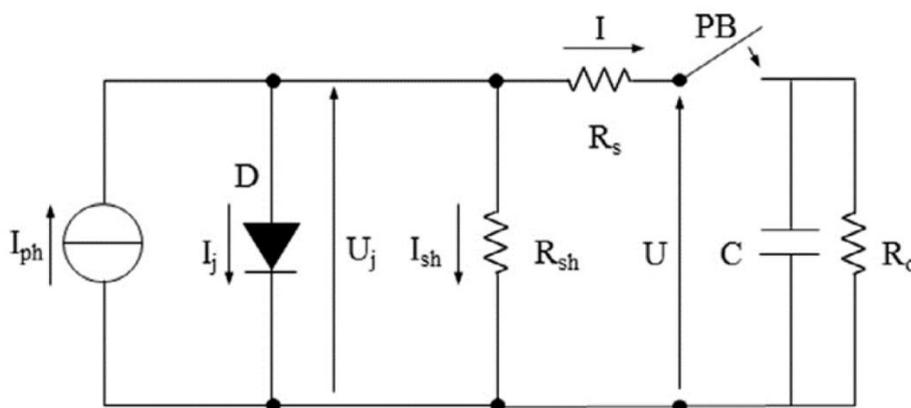


Fig. 3-2 Modello modulo solare con la capacità modellizzata con resistenza propria

Partendo quindi da una condizione iniziale di circuito aperto, con condensatore scarico e scollegato dal sistema (PB aperto), la misura viene avviata chiudendo l'interruttore PB dando il via al transitorio di carica. Un tipico transitorio di carica misurato, è riportato in Fig. 3-3 con una capacità esterna installata di 1mF

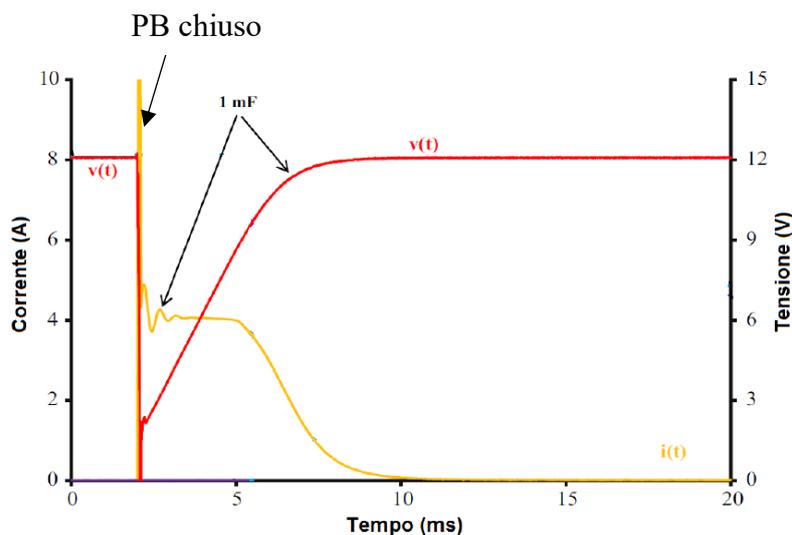


Fig. 3-3 Caratteristiche di tensione e corrente nel tempo con $C=1mF$

Sul segnale di corrente, appena viene chiuso PB, si può notare la presenza di alcune oscillazioni che aumentano in ampiezza e frequenza all'aumentare della capacità esterna installata.

Per poter valutare correttamente la corrente I_{SC} , è necessario escludere, dalle misure, queste oscillazioni, definendo quindi il punto effettivo di inizio misura, al termine del loro transitorio.

Estendendo lo studio ad un campo FV, i parametri parassitici dei moduli, come l'accoppiamento capacitivo con il terreno, sono più elevati, portando quindi ad un incremento del coefficiente di smorzamento dell'evoluzione del transitorio RLC e determinando un impatto meno marcato sulle oscillazioni.

Per ottenere un valore corretto del punto di massima potenza sulla curva I-V il valore della capacità dovrà essere di alcune decine di mF.

3.3 Studio semplificato del transitorio di carica

Si procede con l'analisi del transitorio adottando un'approssimazione a tratti.

Quando i punti operativi sono nella zona tra la corrente di corto circuito e il punto di massima potenza, il diodo in Fig. 3-2 si comporta come un circuito aperto.

Per esempio, i moduli FV in silicio cristallino, presentano una corrente di massima potenza circa uguale alla corrente di cortocircuito ($I_{mpp} \approx 0,9 - 0,95 I_{SC}$). Trascurando le perdite per dispersione dovute alla R_{sh} (resistenza di Shunt), questa approssimazione permette di descrivere il generatore fotovoltaico come un generatore ideale di corrente.

Nel tratto tra il punto di massima potenza e la condizione di circuito aperto (V_{OC}), il comportamento del diodo, insieme alla resistenza in serie, si può considerare come un circuito equivalente di Thévenin, dove il generatore ideale di tensione ha un valore pari alla V_{OC} .

Con questo approccio, si ha per entrambi i modelli un unico carico, collegato al generatore, che è la capacità, assumendo la resistenza interna della capacità (R_C) infinita.

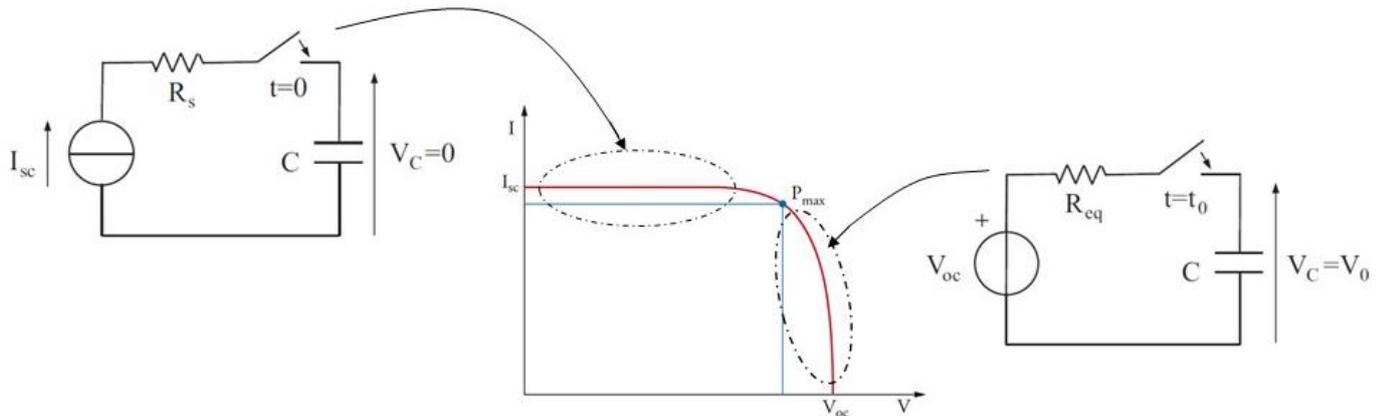


Fig. 3-4 Circuiti semplificati per l'analisi a tratti

3.3.1 Analisi transitorio primo tratto, con generatore ideale di corrente

Nel primo tratto, quindi, il transitorio ha inizio quando il generatore ideale di corrente viene chiuso sulla capacità attraverso l'interruttore. Il valore di corrente che percorre la capacità, dipende dal numero di stringhe in parallelo (N_p) dove ogni stringa genera una I_{ph} circa uguale alla corrente di cortocircuito che passa nelle celle in serie (N_s) di ogni modulo di stringa.

L'andamento della corrente segue la legge:

$$i(t) = I_s N_p \quad 0 < t < t_0 \tag{3-1}$$

All'istante di chiusura parte il transitorio con corrente pari alla corrente di cortocircuito e tensione nulla. Il valore di tensione aumenta poi linearmente in modo proporzionale rispetto all'irradianza solare che investe la cella ed in modo inversamente proporzionale rispetto alla capacità utilizzata secondo la legge:

$$i(t) = C \frac{dv}{dt} \Rightarrow v(t) = \frac{1}{C} \int_0^{t_0} I_s N_p = \frac{I_s N_p}{C} \cdot t \quad \text{per } 0 < t < t_0 \tag{3-2}$$

Quando il condensatore è carico, all'istante t_0 , ai terminali del condensatore ci sarà una tensione pari alla tensione a V_0 .

3.3.2 Analisi transitorio secondo tratto, con generatore ideale di tensione

Terminato il primo transitorio, all'istante t_0 , inizia il transitorio del secondo tratto della curva, dove il generatore ideale di tensione ha un valore pari a $N_S V_{OC}$ dove con N_S si indica il numero di moduli in serie.

La legge che descrive questo circuito, è una legge differenziale del primo ordine, dove l'unica incognita è la tensione ai capi del condensatore $v(t)$:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{v(t)}{R_{eq} \cdot C} = \frac{N_S \cdot V_{OC}}{R_{eq} \cdot C} \quad (3-3)$$

La condizione finale del transitorio precedente, all'istante t_0 , diventa ora la condizione iniziale di questo secondo transitorio per cui:

$$v(t = t_0) = V_0 = \frac{I_{SC} \cdot N_P \cdot t_0}{C} \quad (3-4)$$

Quindi, l'andamento della tensione, ai capi del condensatore, è descritto dalla soluzione dell'equazione differenziale:

$$v(t) = V_{OC} \cdot N_S + \left(\frac{I_{SC} \cdot N_P \cdot t_0}{C} - V_{OC} \cdot N_S \right) \cdot e^{\frac{-(t-t_0)}{R_{eq}C}} \quad \text{per } t_0 < t < \infty \quad (3-5)$$

Allo stesso modo, per quanto riguarda la corrente, ci deve essere continuità nel tempo rispetto al primo transitorio:

$$i(t = t_0) = I_{SC} \cdot N_P \quad (3-6)$$

E l'evoluzione della corrente è descritta dalla soluzione dell'equazione differenziale, per cui:

$$i(t) = C \frac{dv}{dt} = \left(\frac{V_{OC} \cdot N_S}{R_{eq}} - \frac{I_{SC} \cdot N_P \cdot t_0}{R_{eq} \cdot C} \right) \cdot e^{\frac{-(t-t_0)}{R_{eq}C}} \quad \text{per } t_0 < t < \infty \quad (3-7)$$

Il valore della capacità in funzione del tempo t_0 è determinato dalla seguente espressione:

$$C = \frac{I_{SC} \cdot N_P}{V_{OC} \cdot N_S - R_{eq} \cdot I_{SC} \cdot N_P} \cdot t_0 \quad (3-8)$$

Il tempo finale di carica del condensatore (t_f) è definito dalla somma delle durate dei due transitori. Il secondo transitorio vede il generatore fotovoltaico come un generatore reale di tensione, per cui la costante di tempo è $\tau = R_{eq}C$.

In definitiva il tempo di carica sarà:

$$t_f = t_0 + R_{eq}C \quad (3-9)$$

Sostituendo t_0 nella formula (3-8), è possibile valutare il valore della capacità durante tutto il transitorio:

$$C = \frac{I_{SC} \cdot N_P}{V_{OC} \cdot N_S + 4 \cdot R_{eq} \cdot I_{SC} \cdot N_P} \quad (3-10)$$

Non essendo noto a priori il valore della R_{eq} , di seguito viene proposto un metodo di calcolo approssimativo. Graficamente, questo parametro, corrisponde al tratto lineare, della caratteristica I-V, cioè il tratto che collega il punto tensione a massima potenza (V_{mpp}) con la corrente di cortocircuito (I_{SC}).

Il valore della R_{eq} è quindi esprimibile come:

$$R_{eq} = \frac{V_{OC} - V_{mpp}}{I_{SC}} \cdot \frac{N_S}{N_P} \quad (3-11)$$

Sostituendo nella formula (3-10) si ottiene la formula per ricavare la taglia esatta della capacità esterna:

$$C = \frac{I_{SC} \cdot N_P}{V_{OC} \cdot N_S + 4 \cdot \frac{V_{OC} - V_{mpp}}{I_{SC}} \cdot \frac{N_S}{N_P} \cdot I_{SC} \cdot N_P} \quad (3-12)$$

3.3.3 Approssimazione formula del carico capacitivo

In condizioni vicine a quelle STC, i moduli fotovoltaici cristallini, hanno una tensione nel punto di massima potenza (V_{mpp}) pari a circa l'80% della V_{OC} . Quindi:

$$R_{eq} \cong \frac{V_{OC} - 0,8 \cdot V_{OC}}{I_{SC}} \cdot \frac{N_S}{N_P} = 0,2 \cdot \frac{V_{OC} \cdot N_S}{I_{SC} \cdot N_P} \quad (3-13)$$

Sostituendo la (3-13) nella (3-12):

$$C = A \cdot t_f \cdot \frac{I_{SC} \cdot N_P}{V_{OC} \cdot N_S} \cong 0,55 \cdot t_f \cdot \frac{I_{SC} \cdot N_P}{V_{OC} \cdot N_S} \quad (3-14)$$

Il coefficiente A, è un coefficiente adimensionale il cui valore ($A=0,55$) è stato trovato facendo varie verifiche sperimentali su diverse tecnologie di moduli.

P_{mpp} (kW)	Tech.	A
228.2	p-Si	0.55
189.0	p-Si	0.53
172.3	p-Si	0.54
170.5	m-Si	0.55
168.7	p-Si	0.52
94.70	m-Si	0.53
92.80	m-Si	0.54
86.50	m-Si	0.55
81.70	m-Si	0.56
71.26	m-Si	0.55
56.10	m-Si	0.53
51.05	p-Si	0.52
48.08	p-Si	0.52
3.527	m-Si	0.52
3.512	m-Si	0.52
0.550	BSC	0.52

Tabella 1 Verifiche sperimentali su varie tecnologie fotovoltaiche per ricavare il coefficiente A

3.4 Dimensionamento capacità per applicazione a 1500V

Usando le formule descritte nel paragrafo precedente, si procede al dimensionamento della capacità da applicare ad un generatore fotovoltaico con tensione massima di 1500 Vdc.

Simulando lo studio per tre diversi array fotovoltaici, rispettivamente da 100 kW, 250kW e 500 kW e supponendo diversi tempi di carica t_f (0.08-0.25 sec), in Tab.2 sono stati riportati i rispettivi valori delle capacità ottenuti applicando la formula (44) con $N_p = N_s = 1$.

Tempo carica Condensatore t_f [secondi]	Taglia Condensatore [mF]		
	100 [kW]	250 [kW]	500 [kW]
0.08	2.794	6.984	13.968
0.09	3.143	7.857	15.714
0.1	3.492	8.730	17.460
0.11	3.841	9.603	19.206
0.12	4.190	10.476	20.952
0.13	4.540	11.349	22.698
0.14	4.889	12.222	24.444
0.15	5.238	13.095	26.190
0.16	5.587	13.968	27.937
0.17	5.937	14.841	29.683
0.18	6.286	15.714	31.429
0.19	6.635	16.587	33.175
0.2	6.984	17.460	34.921
0.21	7.333	18.333	36.667
0.22	7.683	19.206	38.413
0.23	8.032	20.079	40.159
0.24	8.381	20.952	41.905
0.25	8.730	21.825	43.651

Tabella 2 Taglie di condensatori ottenute variando t_f per le tre potenze (100 kW; 250 kW; 500 kW) a 1500Vdc

La I_{SC} per i tre casi, si calcola dalla formula della potenza di array che dipende dal FF (*Fill Factor*). Tipicamente il FF ha un valore di 0,7 ($FF=0,7$) per cui:

$$P_{array} = 0,7 \cdot V_{OC} \cdot I_{SC} \quad (1-15)$$

Dunque:

$$I_{sc} = \frac{P_{array}}{0,7 \cdot V_{OC}} \tag{1-16}$$

I tre valori di I_{SC} ricavati sono riportati in Tabella 3:

Potenza array [kW]	Voc [kV]	Isc [A]
100	1.5	95.24
250	1.5	238.10
500	1.5	476.19

Tabella 3 Isc per i tre diversi casi

In Fig.3-5 viene riportata una mappa che aiuta a trovare la capacità ideale in funzione della tensione a vuoto e della corrente di cortocircuito supponendo un tempo di carica di 1 ms.

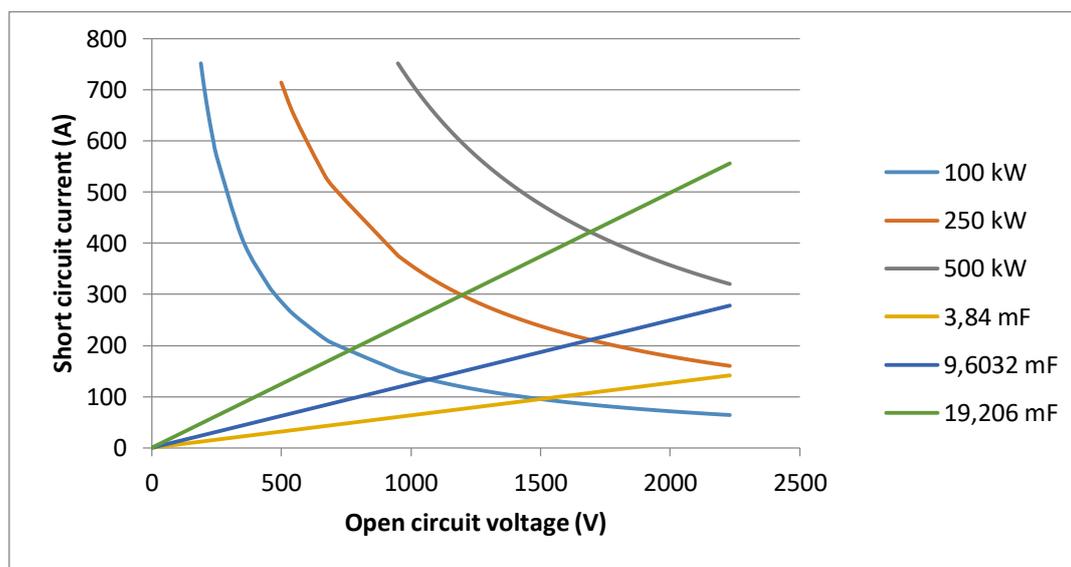


Fig. 3-5 Taglie capacità

Le iperboli rappresentano le diverse potenze dell'array ottenute con la formula (1-15). Ad esempio, un condensatore da 3,84 mF è la giusta scelta per ottenere la caratteristica I-V di impianti da 100 kW a 1500V.

Per procedere alla ricerca delle offerte presenti sul mercato, si è deciso di studiare il sistema fotovoltaico con potenza installata di 250 kW. Inoltre, come previsto dalla norma, è necessario che

il tempo delle misure, quindi la durata del transitorio di carica (t_f), sia il più breve possibile (entro i 110ms) per evitare che i parametri ambientali, come irraggiamento e temperatura, varino eccessivamente durante la misura.

Dunque, la ricerca si è concentrata su un sistema di capacità dimensionato con tempo di carica t_f compreso tra 0,8-1,1 sec, e dalla Tabella 2 risulta una taglia equivalente compresa tra 6,98-9,6 mF.

3.5 Dimensionamento resistenza di scarica

Trovando sul mercato una taglia precisa del sistema di condensatori (vedi Capitolo 5), con tensione nominale di 1500 Vdc, è facile calcolare l'energia immagazzinata durante la misura secondo la legge:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (3-17)$$

Per dimensionare il sistema di resistenze, è necessario stabilire il tempo di scarica (T) in secondi, sapendo che è pari a 5 volte la costante di tempo $\tau = RC$:

$$T = 5 \cdot \tau = 5 \cdot R \cdot C \quad (3-18)$$

Supponendo un intervallo di tempo accettabile, per completare la scarica, compreso tra 0,5-10 sec e ipotizzando di aver scelto un sistema di capacità con $C_{eq} = 9,3 \text{ mF}$, in Tabella 4 sono riportati i diversi valori di resistenza, ottenuti in funzione dei diversi tempi di scarica.

Tempo di scarica t_s	Resistenza	Potenza da dissipare	Corrente di picco
[sec]	[Ohm]	[kW]	[A]
0,5	10,8	20,93	139,5
1	21,5	10,46	69,8
1,5	32,3	6,98	46,5
2	43,0	5,23	34,9
2,5	53,8	4,19	27,9
3	64,5	3,49	23,3
3,5	75,3	2,99	19,9
4	86,0	2,62	17,4
4,5	96,8	2,33	15,5
5	107,5	2,09	14,0
5,5	118,3	1,90	12,7
6	129,0	1,74	11,6
6,5	139,8	1,61	10,7
7	150,5	1,49	10,0
7,5	161,3	1,40	9,3
8	172,0	1,31	8,7
8,5	182,8	1,23	8,2
9	193,5	1,16	7,8
9,5	204,3	1,10	7,3
10	215,1	1,05	7,0

Tabella 4 Valori in funzione del tempo di scarica supponendo la scarica di un condensatore $C_{eq}=9,3 \text{ mF}$

Nelle ultime due colonne della Tabella 4, sono anche riportati i rispettivi valori di:

- potenza che il sistema dovrà dissipare secondo la nota legge:

$$P = \frac{E}{T} = \frac{\frac{1}{2}CV^2}{T} \quad (3-19)$$

- corrente di picco, cioè la corrente ad inizio transitorio di scarica, che si andrà poi ad annullare al termine del transitorio secondo la nota espressione:

$$i(t) = C \frac{dv}{dt} = -\frac{V}{R} e^{-\frac{1}{RC}t} \quad (3-20)$$

A questo punto è quindi possibile affrontare una ricerca sulle offerte, proposte dal mercato, adatte per questa particolare applicazione.

4 ELABOAZIONE MISURE

Nei paragrafi successivi vengono descritte le modalità di acquisizione dei dati che poi andranno elaborate dall'interfaccia GUI di MATLAB.

4.1 Strumenti per acquisizione dati

Oltre al sistema di condensatori e resistenze, dimensionati nel paragrafo precedente, per ricavare la caratteristica I-V dell'intero generatore fotovoltaico e per poter applicare il riporto alle condizioni STC, con le formule descritte nel paragrafo 5.2, è necessaria la seguente strumentazione:

- PC portatile con interfaccia USB;
- Morsettiera *BNC-6251 BNC*. È un modulo DAQ di acquisizione dati multifunzione portatile con connessioni USB. Grazie alla sua tecnologia, permette di ottenere molta accuratezza e frequenza di campionamento elevata.

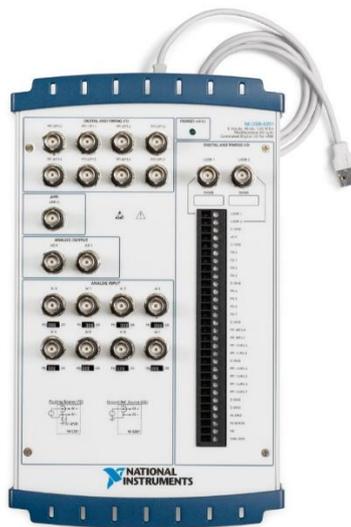


Fig. 4-1 Morsettiera *BNC-6251 BNC*

- Sonda differenziale di tensione *SopphireSI9002*. Permette di misurare la tensione in sicurezza, tramite i due puntali forniti dal costruttore con lo strumento



Fig. 4-2 Sonda differenziale di tensione SoppshireSI9002

- Sonda di corrente ad effetto Hall LEM-HEME PR30 da 30 A_{pk}. Collegata direttamente alla morsettiera tramite cavo coassiale a 2 m con BNC isolato, è in grado di rilevare sia corrente in DC, che corrente in AC tramite grazie ad un trasformatore di corrente.



Fig. 4-3 Sonda di corrente Hall LEM-HEME PR30

- Piranometro modello *Kipp&Zonen CMP11* per rilevare l'irradianza solare. Fornisce risultati in mV ed ha un fattore di correzione di 73,7 mV → 1000 W/m².



Fig. 4-4 Piranometro Kipp&Zonen CMP11

- Cella sensore di irradianza in silicio monocristallino m-Si. Fornisce risultati in mV ed ha un fattore di correzione di $9,28 \text{ mV} \rightarrow 1000 \text{ W/m}^2$.



Fig. 4-5 Cella sensore in m-Si

- Termoresistenza per valutazione temperatura ambiente.

4.2 Procedura per riporto caratteristica I-V alle condizioni STC (CEI 82-5)

Avendo effettuato le misure in condizioni diverse dalle condizioni normalizzate (STC), è necessario quindi correggerle per riportarle alle condizioni standard. Per far ciò si fa riferimento alla normativa CEI EN 60891 (CEI 82-5) nella quale vengono descritti tre diverse procedure per il riporto delle misure alle condizioni STC.

La procedura adottata per l'elaborazione dei dati tramite l'interfaccia grafica (GUI), è riferita al primo metodo che è principalmente empirico.

Le formule utilizzate sono le seguenti:

$$I_{corr} = I_{mis} + I_{SCmis} \left(\frac{G_{STC}}{G_{reale}} - 1 \right) + \alpha (T_{STC} - T_{intfunz}) \quad (4-1)$$

$$V_{corr} = V_{mis} - R_S (I_{corr} - I_{mis}) - KI_{corr} (T_{STC} - T_{intfunz}) + \beta (T_{STC} - T_{intfunz}) \quad (4-2)$$

Dove:

- I_{mis} e V_{mis} sono una coppia di punti misurati. Usando tutte le coppie di questi valori si definisce la caratteristica nelle condizioni di misura;
- I_{corr} e V_{corr} sono una coppia di punti riportati alle condizioni STC. Facendo il riporto per tutte le coppie di punti misurati, si definisce la caratteristica nelle condizioni STC
- G_{reale} è l'irradianza misurata o con il piranometro, o con la cella solare in m-Si, oppure facendo la media tra le misure di questi due strumenti.
- $T_{intfunz}$ è la temperatura di cella misurata direttamente, oppure con il *metodo NOCT* (descritto nel paragrafo 1.2.2), oppure con il *metodo della tensione a circuito aperto*, proposto della norma CEI 82-10 (descritto nel paragrafo 1.2.3).
- G_{STC} e T_{STC} sono i valori di irradianza e temperatura nelle condizioni in cui si vogliono riportare le misure. In questo caso, per il riporto alle condizioni standard:

$$G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2 \quad \text{e} \quad T_{STC} = 25^\circ\text{C}$$
- I_{SCmis} è la corrente di corto circuito ottenuta dalle misure.
- α e β sono i due coefficienti termici della corrente di corto circuito e della tensione a vuoto in $A/^\circ\text{C}$ e $V/^\circ\text{C}$.
- R_S è la resistenza serie interna del campione di prova.
- k è un fattore di correzione della curva.

4.3 Determinazione dei parametri caratteristici V_{OC} , I_{SC} e R_s

Calcolo della V_{OC}

Per definire la V_{OC} in modo sperimentale, è necessario definire il tempo di offset, poiché è ottenuta facendo la media della tensione in questo intervallo di tempo.

Infatti, la memorizzazione dei valori di corrente e tensione avviene qualche millesimo di secondo prima che inizi il transitorio di carica. In questo intervallo di tempo, dunque, il circuito rimane aperto con corrente nulla, risultando la condizione ideale per poter misurare la V_{OC} .

Se la corrente non risultasse nulla vorrà dire che è affetta da un disturbo, e diventa necessario eliminare il valor medio di questo disturbo, sottraendolo alla misura di corrente.

Calcolo della I_{SC}

Sul grafico I-V, la I_{SC} è ricavata facendo l'intercetta dei valori di corrente compresi tra 0-30% della V_{OC} , dove la corrente rimane pressochè costante. Analiticamente l'equazione della retta è:

$$I = mV + I_{SC} \quad (4-3)$$

In Fig. 4-6 è riportata, graficamente, la modalità con cui viene ricavata la I_{SC}

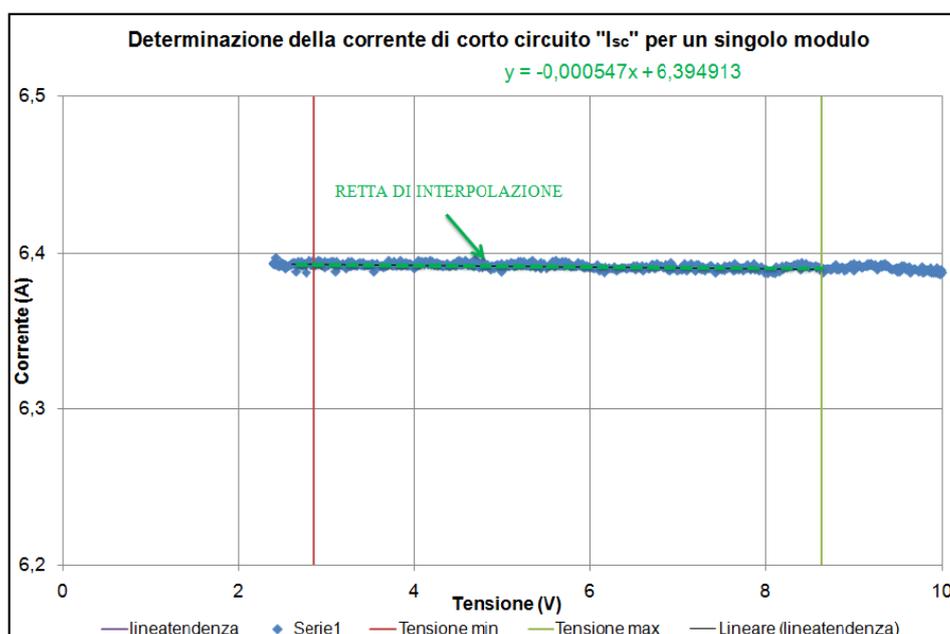


Fig. 4-6 Determinazione della I_{SC} per un singolo modulo

La retta verde rappresenta la retta ottenuta interpolando le coppie di corrente e tensione misurate, ed essendo quasi orizzontale, il coefficiente angolare m della, formula (4-3), risulta essere nullo.

Calcolo della R_S

Anche la resistenza serie (R_S) è ottenuta per interpolazione lineare ma dei valori vicini alla tensione a vuoto, quindi a basse correnti (di solito 0,5-1 A) avendo così un tratto di curva lineare.

Graficamente è l'inverso del coefficiente angolare m della retta interpolante.

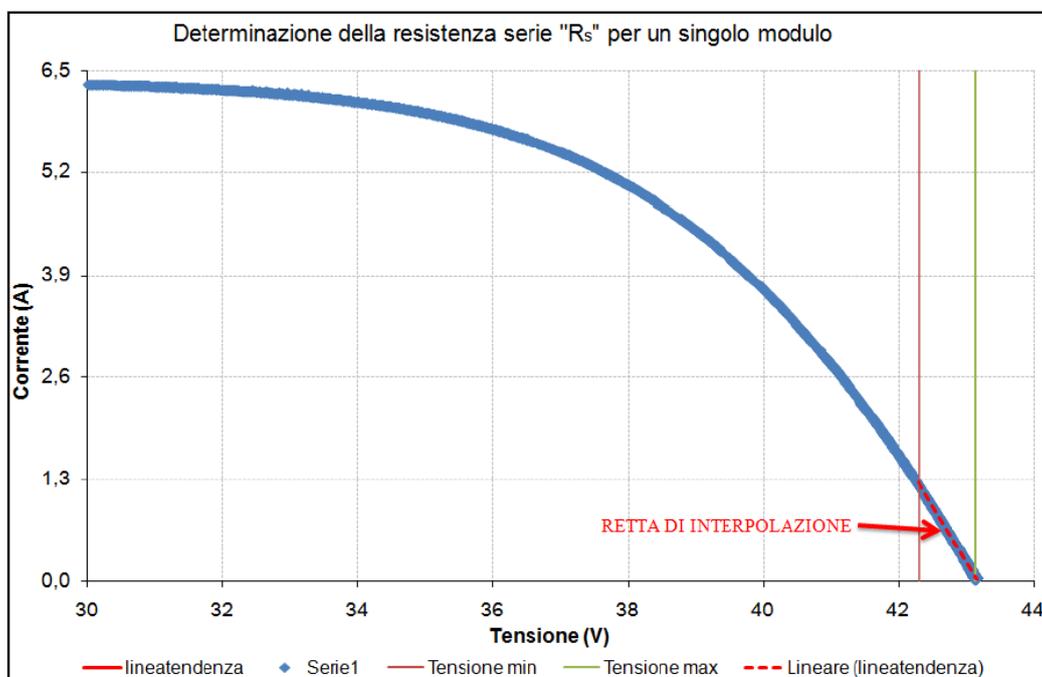


Fig. 4-7 Determinazione della R_S per un singolo modulo

5 SISTEMA DI ACQUISIZIONE CURVA I-V A 1500 VDC

5.1 Ricerca di mercato per i componenti a 1500V_{DC}

In Fig.5-1 è riportato lo schema elettrico base pensato per la realizzazione dello strumento necessario per l'acquisizione dei segnali di corrente e tensione.

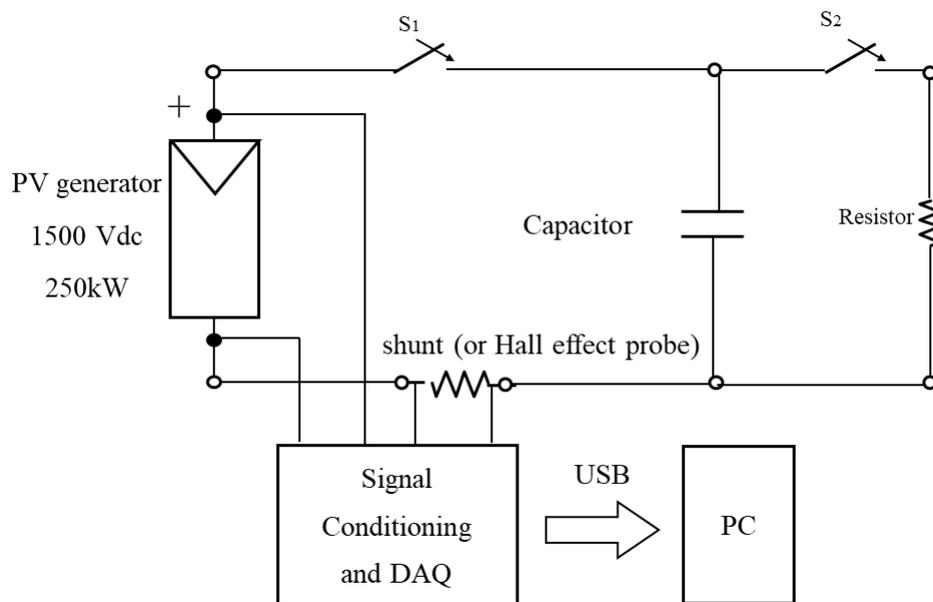


Fig. 5-1 Schema elettrico

I componenti su cui mira la ricerca sono:

- Sistema di condensatori con $C_{eq} \cong 6,98 - 9,6$ mF;
- Sistema di resistenze dimensionate in base al condensatore scelto ed al tempo di scarica;
- Interruttori di manovra S₁ e S₂.

Il primo passo, dovendo acquistare come Politecnico, quindi in qualità di Pubblica Amministrazione (P.A.), è stato quello di consultare il catalogo dei prodotti presenti sul MePA (Mercato Elettronico della Pubblica Amministrazione). Questa prima ricerca ha dato esito negativo per tutti i componenti, quindi si è proceduto a indire un bando di gara, sempre sul MePA, per ogni componente. Alla scadenza dei bandi, non essendo pervenute alcune offerte, si è proceduto nella ricerca di altre soluzioni consultando i cataloghi di produttori non presenti sul MePA.

5.2 Scelta del sistema di condensatori

La tecnologia più adatta per questa applicazione, è quella dei *condensatori di potenza a film* che rispetto ai tradizionali condensatori elettrolitici, offrono risultati migliori. Questi condensatori hanno la possibilità di autorigenerarsi, dopo un eventuale guasto, per via dell'uso di films di plastica come dielettrici e per una metallizzazione in alluminio effettuata sotto vuoto, su uno od entrambi i lati del condensatore, ottenendo così gli elettrodi. Inoltre, per quasi tutti i produttori, questi condensatori sono conformi allo standard CEI 1071 e cioè sono in grado di sopportare vari picchi di tensione fino al doppio della tensione nominale dichiarata.

Di seguito sono elencate le tre principali soluzioni d'acquisto, di tre diversi produttori, trovate consultando i cataloghi presenti in rete.

Prima soluzione

Soluzione con 6 condensatori in parallelo della ditta *ICAR*, modello *P5Y 1600-200* da 1,6 mF e tensione nominale di 2000Vdc ciascuno, raggiungendo una $C_{eq} = 9,6 \text{ mF}$.



Fig. 5-2 Condensatore della ditta ICAR-P5Y 1600-200 da 1,6 mF a 2000Vdc

Questa soluzione è stata scartata per via dei tempi di consegna eccessivamente lunghi. Infatti, seppur presenti a catalogo, la produzione di alcuni modelli sarebbe partita solo dopo aver effettuato l'ordine, con un'attesa stimata dal costruttore di almeno 6 mesi.

Inoltre un ulteriore motivo di scarto, è stato il peso di un singolo condensatore, il quale è risultato essere di 16 kg, raggiungendo un peso totale di 96 kg.

Seconda soluzione

Soluzione con 12 condensatori in parallelo della ditta *KENDEIL*, modello *K36201801_K0U335* da 0,8 mF e tensione nominale di 2000Vdc ciascuno, raggiungendo una $C_{eq} = 9,6 \text{ mF}$.



Fig. 5-3 Condensatore della ditta *KENDEIL-K36201801_K0U335* da 1,6 mF a 2000Vdc

Anche questa soluzione è stata scartata, ma per via dell'eccessivo impiego di singole unità. Infatti aumentando il numero di condensatori, sarebbe aumentata la probabilità che uno di loro venga sostituito per un guasto. Inoltre questa soluzione, considerando sempre il numero di condensatori impiegati, avrebbe previsto maggiore ingombro, cosa poco idonea per uno strumento trasportabile.

Terza soluzione

Soluzione con 3 condensatori in parallelo della ditta americana *AVX* modello *DFHHV013A3107* da 3,1 mF e tensione nominale di 1900Vdc ciascuno, raggiungendo una $C_{eq} = 9,3 \text{ mF}$.



Fig. 5-4 Condensatore della ditta AVX- DFHHV013A3107 da 1,3 mF a 1900 Vdc

Questa soluzione permette di completare la ricarica del sistema di condensatori in $\cong 0,1$ sec come riportato in Tabella 2, rispettando così il limite normativo sulla durata della misura.

La scelta è ricaduta su questa soluzione soprattutto per limitato numero di unità capacitive da installare, riducendo statisticamente il rischio di dover sostituire un condensatore per guasto.

5.2 Scelta del sistema di resistenze

Definito quindi il valore della capacità da installare ($C_{eq} = 9,3$ mF) e applicando le formule viste nel paragrafo 3.5, è stato possibile dimensionare in modo preciso il valore della resistenza equivalente, necessaria per la scarica dell'energia accumulata dal sistema di condensatori.

Consultando i diversi cataloghi online, si è deciso di optare per un sistema di 3 resistenze di potenza in serie, ciascuna da 47 Ω della ditta *TE Connectivity* modello *TE750B47RJ* ottenendo una $R_{eq}=141\Omega$. Da datasheet, ciascuna resistenza risulta in grado di dissipare 750 W con tensione nominale di 500Vdc, arrivando quindi ad una potenza totale dissipabile di 2,25 kW e tensione applicabile di 1500Vdc.



Fig. 5-5 Resistenza di potenza TE Connectivity TE750B47RJ, $47\Omega \pm 5\%$ 750W, Filo avvolto, terminali a saldare

Quindi, consultando la Tabella 4, che è stata ottenuta supponendo proprio $C_{eq} = 9,3 \text{ mF}$, si può rilevare il rispettivo tempo di scarica che risulta essere $t_s \cong 6,55 \text{ sec}$. Sempre in Tabella 4 è riportata la potenza che il sistema di resistenze dovrà dissipare, pari a 1,6 kW, rientrando quindi abbondantemente nelle specifiche tecniche delle resistenze scelte.

5.3 Scelta dei contattori

Per comandare la carica e la scarica del sistema di condensatori, si è valutato l'uso di due contattori elettromagnetici, cioè due dispositivi meccanici di manovra, con posizione di riposo “normalmente aperto”.

Dopo varie ricerche, confermando la difficoltà nel reperire dispositivi con adeguata tensione nominale (almeno 1500Vdc), è stato trovato un modello di contattori idoneo per l'applicazione in esame, della ditta americana *GIGAVAC*.



Fig. 5-6 Contattore della ditta GICAVAC-HX22 con $V_n=1500\text{ Vdc}$ e $I_n=300\text{ A}$

Dalle specifiche di datasheet, questo dispositivo presenta una tensione nominale $V_n=1500\text{ Vdc}$ e corrente nominale $I_n=300\text{ A}$, con la possibilità di scegliere tra tre diversi livelli di tensione per i contatti ausiliari (12Vdc, 24Vdc e 48Vdc).

Si è scelto di acquistarne due, da usare sia per la carica del condensatore (S_1) che per la scarica sulle resistenze (S_2), nonostante la corrente prevista nel transitorio di scarica sia un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella del transitorio di carica.

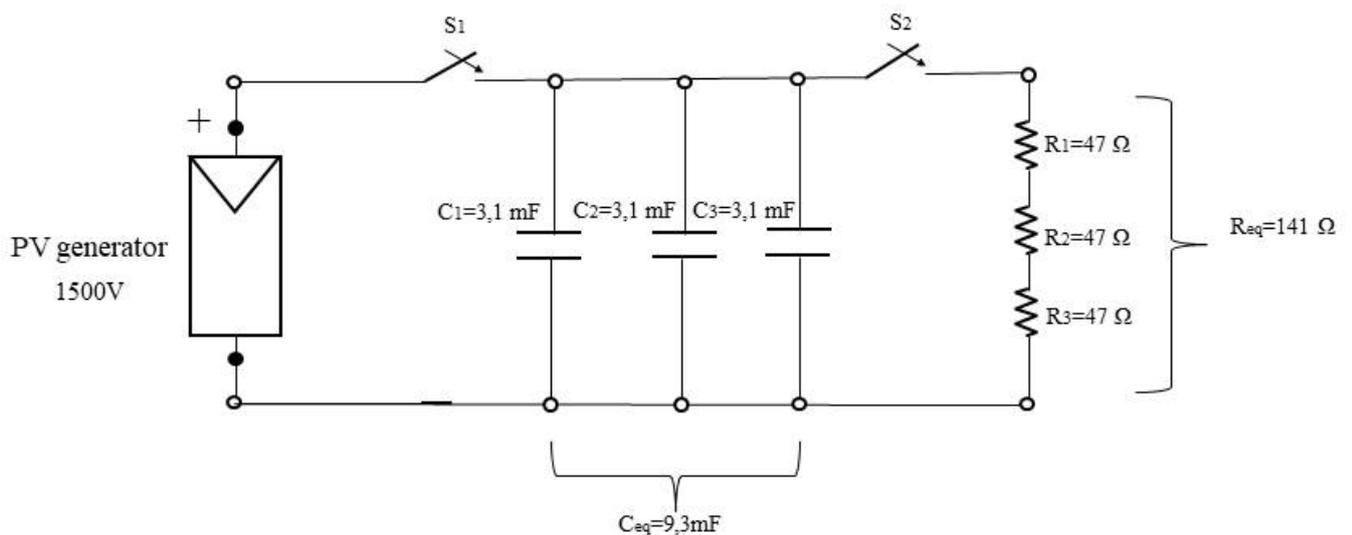


Fig. 5-7 Schema elettrico del circuito di potenza

L'elemento principale di un contattore è la bobina di eccitazione avvolta intorno al nucleo magnetico mobile. Eccitando la bobina, la parte del nucleo mobile si chiude, per attrazione, sulla

parte del nucleo magnetico fisso e diseccitando la bobina, la parte mobile torna nella posizione di riposo “*normalmente aperto*”. In Fig.5-8 è riportato uno schema del funzionamento di un classico dispositivo.

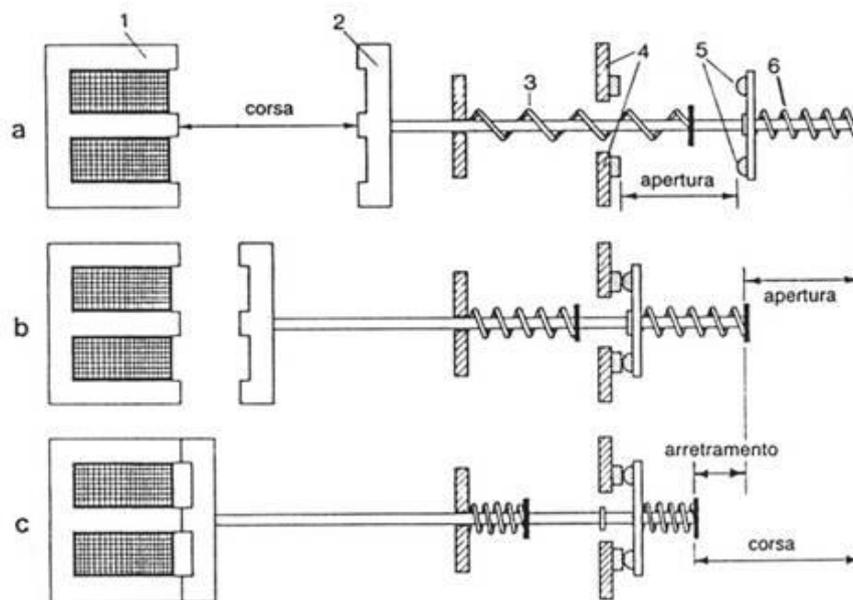


Fig. 5-8 Schema classico di funzionamento di un contattore

Per eccitare i contatti ausiliari, è stato scelto il modello con tensione nominale da 12V, procedendo anche all’acquisto di una batteria, con questo livello di tensione, per poterli quindi comandare.

5.3.1 Gestione contattori in modalità manuale

Per la gestione di questi due dispositivi, sono state previste due modalità: “*Manuale*” ed “*Automatico*”.

In questo paragrafo viene descritta la logica di funzionamento per la modalità “*Manuale*”

Nella modalità “*Manuale*”, per evitare la simultanea chiusura dei 2 dispositivi (S_1 e S_2), la commutazione avviene tramite un interruttore a tre posizioni. Nel dettaglio, nella posizione 0 (posizione di riposo) entrambi gli ausiliari dei contattori non vengono eccitati lasciando i contattori aperti. Nella posizione 1 viene eccitata solo la bobina del contattore S_1 consentendo la carica dei condensatori e lasciando aperto il contattore S_2 sulle resistenze. Ed infine nella posizione 2 viene

eccitata solo la bobina del contattore S2 consentendo la scarica, dell'energia accumulata dai condensatori, sulle resistenze.

Di seguito è riportato lo schema elettrico riferito alla modalità "Manuale".

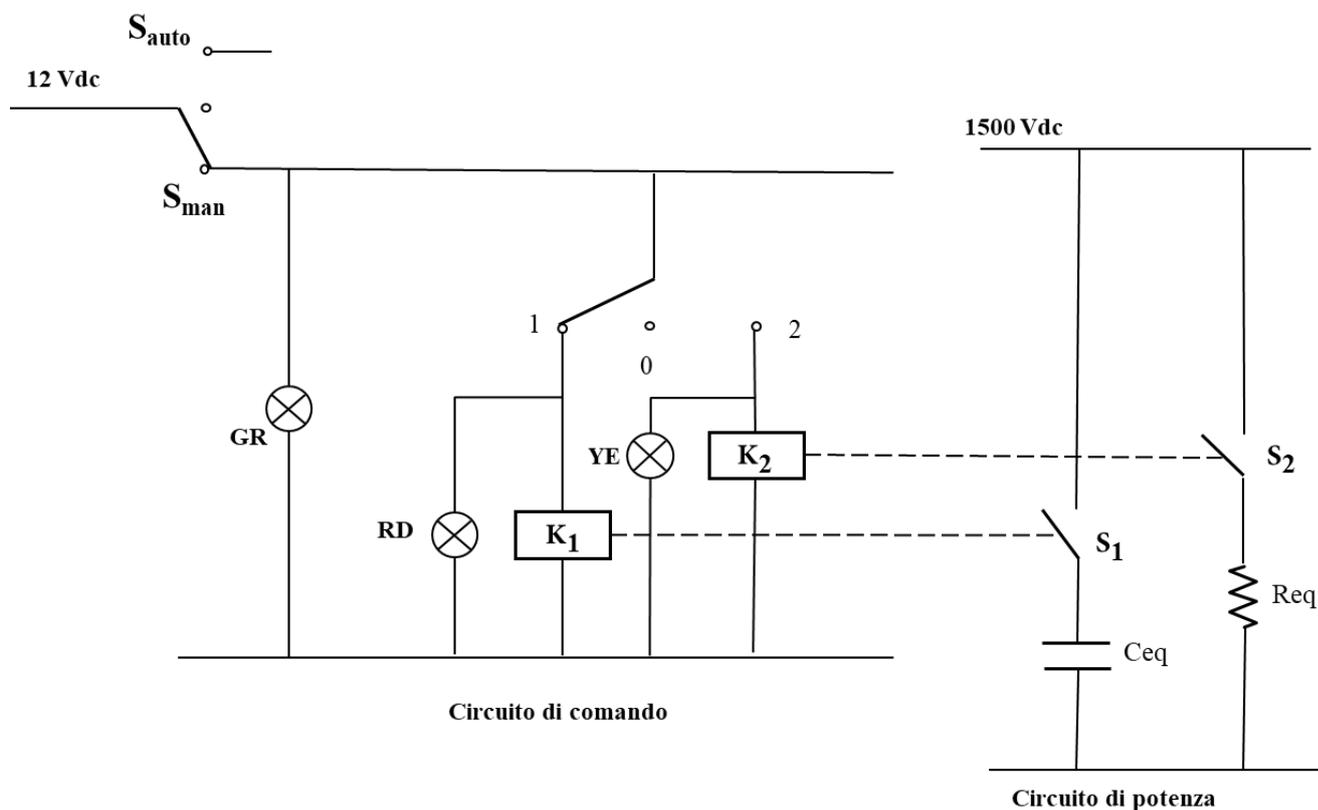


Fig. 5-9 Schema elettrico del circuito di comando e del circuito di potenza per la modalità manuale

Per entrambe le modalità, come è possibile notare in Fig. 5-9 e in Fig.6-3, sono stati inseriti dei led in parallelo ai contatti ausiliari dei contattori. L'accensione del led indica quindi che i contatti ausiliari, del rispettivo contattore, sono eccitati e che quindi il rispettivo dispositivo è chiuso.

La scelta tra le due modalità, per motivi di sicurezza, è fatta a monte del circuito di comando con un commutatore a due posizioni a chiave estraibile. Con questo commutatore si esclude dunque la possibilità di un uso simultaneo tra le due modalità.

5.4 Stima del costo del sistema automatico di misura

In questo paragrafo, sono riportati i preventivi, comprensivi di IVA, pervenuti contattando i produttori dei componenti elettrici discussi precedentemente.

Per le tre soluzioni del sistema capacitivo, i rispettivi preventivi pervenuti sono:

- 6 condensatori della ditta *ICAR* modello *P5Y 1600-200*, da 288,5 €/cad. per un totale di 1731€ (soluzione scartata);
- 12 condensatori della ditta *KENDEIL* modello *K36201801_K0U335* da 208,4 €/cad. per un totale di 2500,8€ (soluzione scartata);
- 3 condensatori della ditta *AVX* modello *DFHHV013A3107* da 827 €/cad. per un totale di 2481€ (soluzione scelta);

L'offerta proposta per il sistema di resistenze risulta:

- 3 resistenze della ditta *TE Connectivity* *TE750B47RJ* da 57,25 €/cad. per un totale di 171,75€.

L'offerta proposta per i dispositivi di manovra:

- 2 contattori della ditta *GIGAVAC* modello *HX22* da 138 €/cad. per un totale di 276 €.

Altri componenti acquistati sono

- Batteria da 12V per comandare contattori ed alimentare microcontrollore da 15 €.
- Quadro elettrico per alloggiare il sistema capacitivo, della ditta *Schneider Electric* modello *Spacial S3D* da 234,04 €
- Carrello portapacchi, per il trasporto dello strumento da 70€
- Led da 12V e commutatori da 20€;
- Microcontrollore *Arduino Mega 2560* da 12€

6 GESTIONE AUTOMATICA DEL SISTEMA DI MISURA

In questo capitolo sono descritte le due automatizzazioni studiate per il sistema di misura. Esse riguardano la gestione dei contattori e l'elaborazione delle misure.

Quindi, nel primo paragrafo, è descritta la logica di funzionamento implementata per la modalità “Automatic”, prevista per la gestione della carica e della scarica del sistema di condensatori.

In seguito verrà presentata l'interfaccia grafica GUI (*Graphical User Interface*) in ambiente Matlab, creata per poter elaborare in modo semplice ed intuitivo, le misure di corrente e tensione acquisite durante la carica del sistema di condensatori. Al termine dell'elaborazione, in degli appositi assi cartesiani inseriti nell'interfaccia, verranno tracciate le curve caratteristiche I-V e P-V sia nelle condizioni di misura che in quelle STC. Inoltre, durante l'elaborazione, sarà compilato un report con tutti i parametri caratteristici del generatore FV in prova. Confrontando i dati ottenuti, con le caratteristiche dichiarate dal costruttore sul datasheet, sarà quindi possibile valutare se vi è un calo delle prestazioni o meno del campione di prova.

Infine, sarà descritta un'esperienza sperimentale svoltasi nel mese di maggio (2018) e verranno commentati i risultati ottenuti elaborando le misure con l'interfaccia creata.

6.1 Gestione dei contattori in modalità Automatica

Oltre alla possibilità di comandare manualmente la chiusura e l'apertura dei due contattori, è stata studiata ed implementata anche la modalità “Automatic”. Questa modalità consente di impostare, tramite il microcontrollore *Arduino*, il tempo di carica t_f e quello di scarica t_s , affidando quindi a quest'ultimo la gestione delle operazioni di manovra.

Il microcontrollore Arduino è uno strumento open source, con software scritto in linguaggio C o C++, che permette di creare progetti interattivi con il mondo fisico esterno. Grazie alla sua elettronica incorporata, consente ai progettisti di eseguire lavori senza necessariamente conoscere l'interno dell'hardware.



Fig. 6-1 Scheda Arduino Mega 2560 utilizzata per l'automatizzazione

Esistono vari strumenti, che, gestiti dal microcontrollore, permettono di interagire con il mondo esterno come sonde, sensori, led, relè, etc. Per esempio, per questo progetto, sono stati usati due relè della ditta *HONGFA* modello *HF3FF*, con tensione nominale di bobina pari a 5-48Vdc.

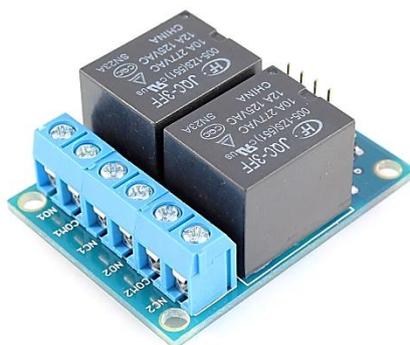


Fig. 6-2 Due relè della ditta HONGFA modello HF3FF

In questi apparecchi, il circuito che alimenta la bobina è completamente isolato dalla parte che commuta (ON/OFF), fornendo così l'isolamento elettrico.

Il programma scritto in C (Appendice A), salvato sulla memoria del microcontrollore, viene eseguito premendo il pulsante START, il quale, essendo una periferica digitale può assumere due valori: "premuto" (HIGH) e "non premuto" (LOW).

Come si può vedere dalla Fig.6-3, questo pulsante ha 3 pin, uno collegato ai 12V della batteria, uno collegato a terra (GND) ed il terzo, che è un pin di segnale, collegato al pin 3 del microcontrollore. La resistenza di valore elevato (15k Ω), serve ad evitare che, quando viene premuto il pulsante, si crei un corto circuito.

I due relè, K_{1R} e K_{2R} , sono anch'essi alimentati a 12V e sono collegati:

- K_{1R} al pin 5 del microcontrollore;
- K_{1R} al pin 7 del microcontrollore.

I pin di uscita usati per i due relè, sono NO1 e NO2 (Normally Open), quindi, comandando la chiusura dei relè (HIGH), viene anche chiuso il rispettivo circuito elettrico dei contatti ausiliari di ciascun contattore (S1 ed S2), permettendo la carica e la scarica dei condensatori. Viceversa, al comando di apertura (LOW) le bobine dei relè vengono diseccitate tornando alla condizione di riposo “normalmente aperto”.

In Fig.6-3 è riportato lo schema di funzionamento riferito alla modalità “Automatic”.

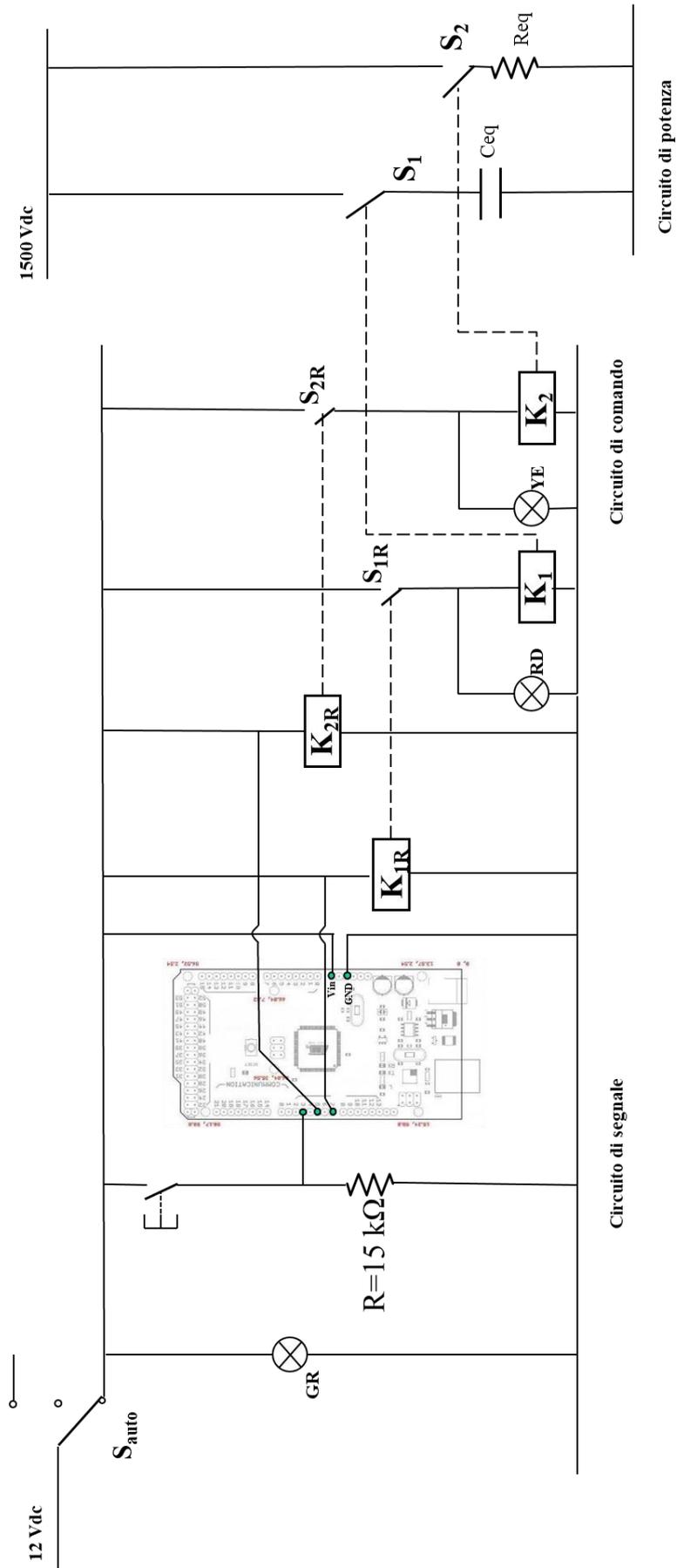


Fig. 6-3 Circuito elettrico della modalità "Automatico"

Per avere una rappresentazione grafica delle operazioni che sono state implementate nel microcontrollore, in Fig.6-4 è riportato il diagramma di flusso che le sintetizza:

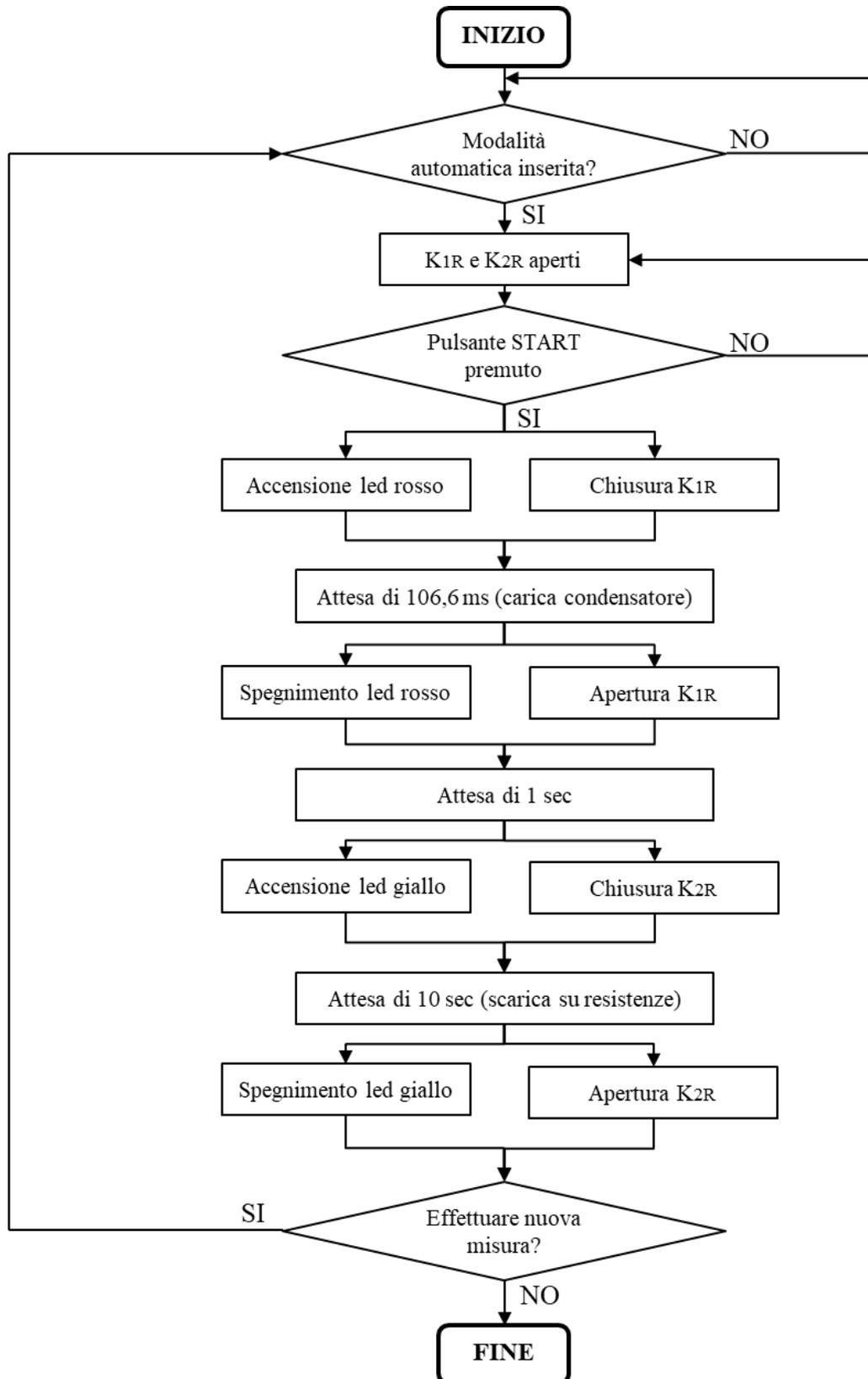


Fig. 6-4 Flow-chart della modalità "Automatico"

In appendice A si riporta per intero il codice implementato nel microcontrollore Arduino.

6.2 Interfaccia grafica GUI (*Graphical User Interface*)

6.2.1 Definizione generale di GUI

L'interfaccia grafica GUI, è uno strumento messo a disposizione dal programma di calcolo Matlab. Essa consente la creazione di applicazioni software, che facilitano l'utente all'interazione con il programma attraverso un controllo di tipo “punta e clicca”. Ciò, rende non necessaria la conoscenza, da parte dell'utente, dei dettagli di programmazione implementati o delle funzioni usate per interagire con il software.

Nei paragrafi successivi verranno descritte le fasi principali della creazione e della gestione dell'interfaccia grafica creata, al fine di fornire una panoramica generale.

Per facilitarne l'utilizzo, rendendo l'interfaccia la più intuitiva possibile, è necessario fare delle scelte di design appropriate. Per questo, la GUI di Matlab, mette a disposizione alcuni componenti necessari all'iterazione con l'utente. Infatti, ciascuno di questi componenti, viene creato con lo scopo di consentire l'inserimento di dati di input, di effettuare modifiche o visualizzare dei risultati. Di seguito vengono descritti brevemente i principali componenti utilizzati per la realizzazione di questo progetto.

- *Push Button*: Quando viene premuto esegue una determinata azione definita dal programmatore nell'editor di Matlab;



Fig. 6-5 Esempio di un Push Button inserito nella GUI

- *Axes*: crea un sistema di assi cartesiani di default e consente quindi di visualizzare i grafici necessari desiderati. È compito del programmatore definire il layout del grafico ed inizializzare etichette ed assi.

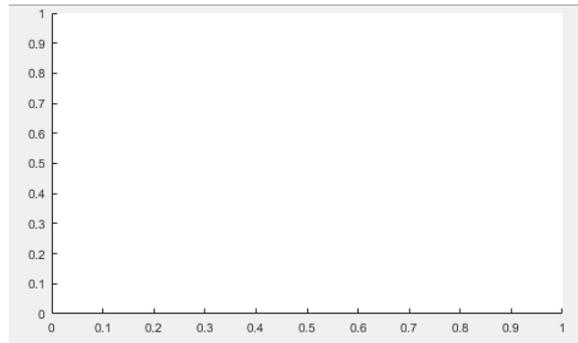


Fig. 6-6 Esempio di un Axes inserito nella GUI prima della procedura di elaborazione

- *Panel*: permette una suddivisione grafica dei vari elementi inseriti, fornendo loro una maggiore gestibilità ed organizzazione.

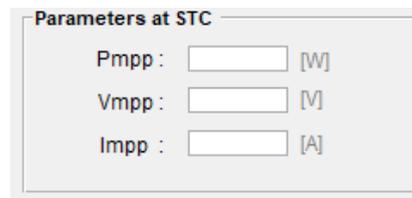


Fig. 6-7 Esempio di un Panel inserito nella GUI

- *Pop-up Menu*: menu a tendina che permette la scelta di un elemento tra quelli inseriti in lista.

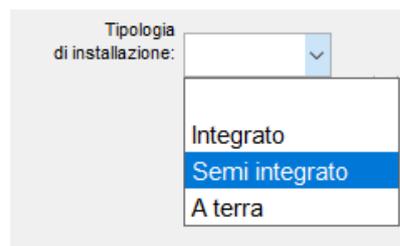


Fig. 6-8 Esempio di un Pop-up Menu inserito nell'interfaccia

- *Edit Text*: casella di testo che consente all'utente di inserire al suo interno dati di input necessari all'elaborazione. Questa casella eseguirà la funzione che gli è stata assegnata dal programmatore, quando l'utente, dopo aver inserito il valore, premerà invio.



Fig. 6-9 Esempio di Edit text (cerchiato in rosso) inserito nella GUI

- *Static Text*: Casella di testo precompilata dal programmatore per poter essere utilizzata come etichetta e quindi non modificabile dall'utente.

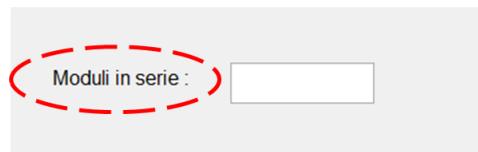


Fig. 6-10 Esempio di Static text (cerchiato in rosso) inserito nella GUI

Tutti i componenti inseribili in una GUI, hanno un set di proprietà che possono essere modificate in fase di programmazione per ottenere l'aspetto desiderato.

Dunque, inseriti uno o più di questi elementi, si procede a fornire a ciascuno di loro delle istruzioni attraverso lo script di Matlab. Questa operazione è possibile poiché ciascun componente viene univocamente identificato da uno specifico Tag.

6.2.2 Logica di funzionamento per l'elaborazione

In questo paragrafo viene brevemente descritta la logica di funzionamento pensata, che porta l'interfaccia GUI ad elaborare correttamente le misure, di tensione e corrente, del generatore fotovoltaico in prova.

Il software, dà la possibilità all'utente di elaborare e vedere a monitor i risultati di massimo tre misure effettuate sullo stesso modulo o impianto fotovoltaico. Il primo passo consiste nell'importare in ambiente Matlab i valori di tempo corrente e tensione, acquisiti durante il transitorio di carica del sistema di condensatori. Infatti, prima di procedere con l'elaborazione, l'utente avrà per ciascuna delle tre misure, un file di testo *.txt* denominato rispettivamente *misura1.txt*, *misura2.txt* e *misura3.txt* contenenti le misure come in Fig.6-21.

Grazie a questa prima operazione, sarà possibile visualizzare graficamente il transitorio di carica, permettendo di specificare sia il tempo di inizio e fine offset, necessari per poter calcolare la V_{OC} e

l'eventuale disturbo sul segnale di corrente, come descritto nel paragrafo (4.3), sia il tempo di inizio e fine transitorio. Infatti, dal grafico generato, si potrà anche individuare facilmente la fine delle oscillazioni, dovute all'uso della capacità esterna come descritto nel paragrafo (4.2), potendo escluderle dalla misura.

A questo punto bisognerà inserire i dati di input necessari all'elaborazione e cioè, i valori dichiarati dal costruttore sul datasheet, le caratteristiche dell'impianto ed i parametri ambientali registrati durante la misura (irraggiamento e temperatura dell'aria).

Dopo che l'utente ha selezionato quale valore di irraggiamento usare (cioè quello misurato con il piranometro, con la cella solare o facendo la media tra le due misure) ed avendo scelto con quale metodo di calcolo desidera ricavare la temperatura di cella (cioè con NOCT o con la formula proposta dalla normativa), il software sarà in grado di riportare i dati alle condizioni normalizzate STC, usando le formule viste nel paragrafo (4.2) e generare i rispettivi grafici di I-V e P-V sia nelle condizioni di misura che in quelle standardizzate STC.

In Fig.6-11 è riportato un diagramma di flusso che riassume i passaggi appena descritti.

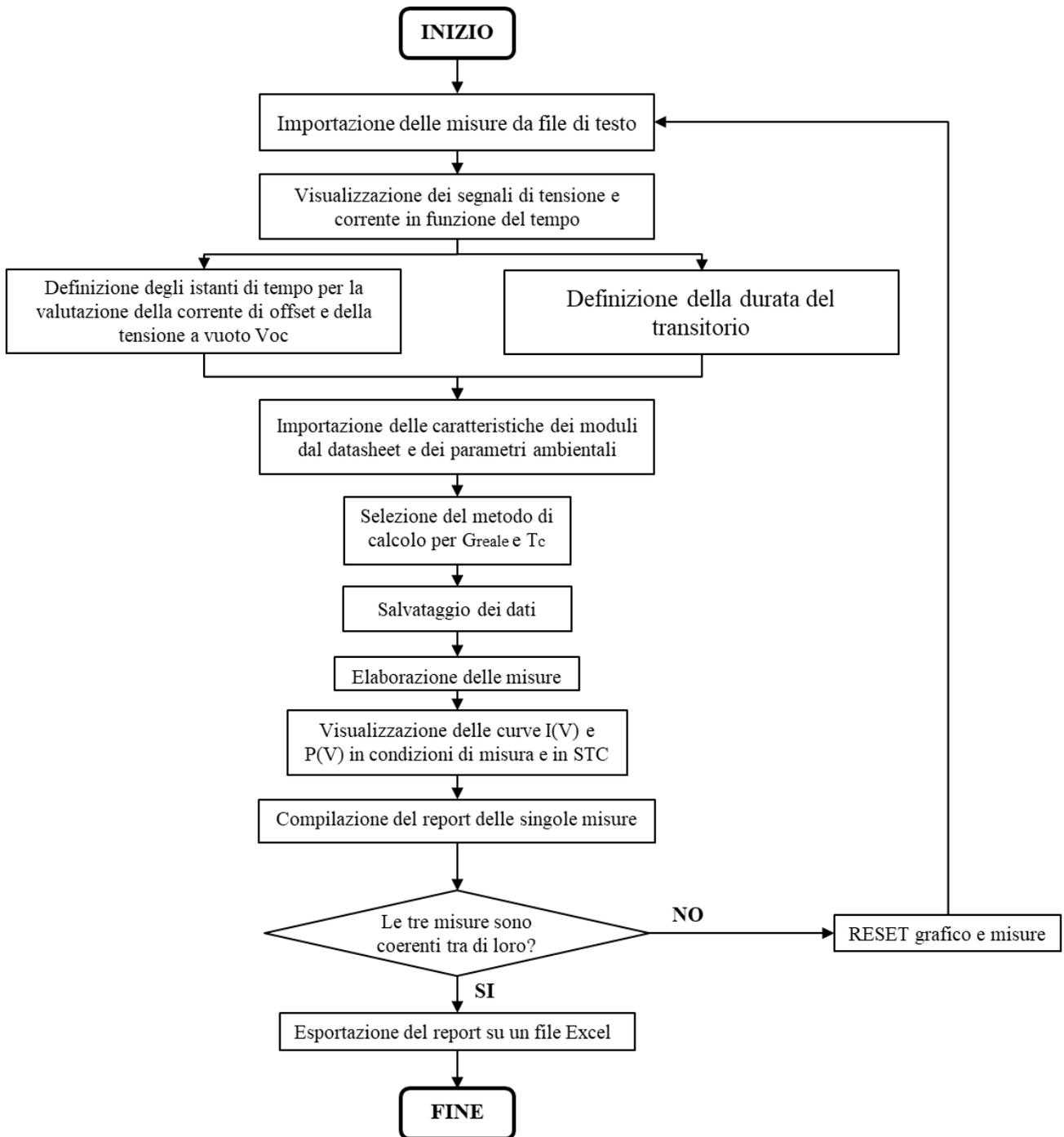


Fig. 6-11 Flow-chart della logica studiata per l'elaborazione delle misure

6.2.3 Design ed implementazione

Sono ora illustrate le scelte di design che presenta l'interfaccia grafica e le principali istruzioni che eseguono alcuni dei componenti inseriti al suo interno. Essendo necessari vari passaggi per arrivare al risultato finale, come discusso nel capitolo precedente, sono state create delle sotto interfacce grafiche che si avviano premendo dei determinati *Push-Button*.

Le macro azioni che l'utente deve eseguire possono essere suddivise in:

- Importazione misure e definizione inputs;
- elaborazione dati con riporto in condizioni STC e compilazione del report;
- verifica risultati;
- esportazione risultati in Excel;

Per rispettare questa sequenza logica che porta ai risultati finali, anche i vari componenti della GUI sono stati inseriti nell'ordine in cui dovranno essere eseguiti o compilati. Nelle diverse interfacce compariranno vari *Edit Text* e sarà compito dell'utente compilare solo quelli con sfondo bianco. Gli *Edit Text* con sfondo giallo, invece, non dovranno essere compilati dall'utente poiché o riporteranno un risultato in automatico, oppure perché contengono delle costanti necessarie ai fini dei calcoli.

Il software prevede la possibilità di elaborare al massimo tre misure per uno stesso campione di prova. Quindi, ognuna delle tre misure avrà una sezione dell'interfaccia grafica dedicata. Infatti, avviando il programma, la schermata iniziale che si troverà l'utente si presenta come in Fig.6-12 dov'è possibile notare i tre diversi *Axes*, nei quali saranno riportate le curve ricercate (I-V e P-V) ed i rispettivi tre report.

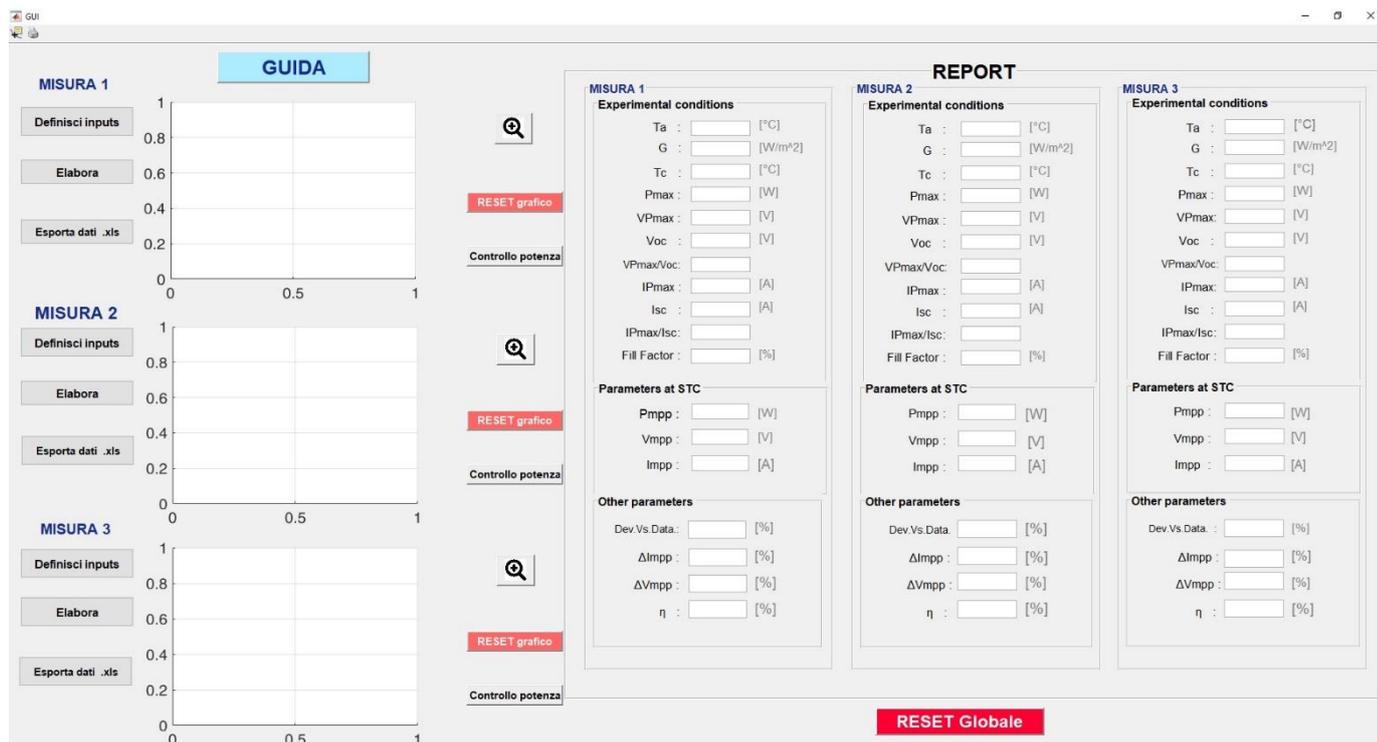


Fig. 6-12 Schermata principale del software

Il primo pulsante in alto, denominato GUIDA, se premuto, apre un file .pdf con le istruzioni dettagliate che deve eseguire l'operatore per un corretto uso del programma e che saranno riportate nel prossimo paragrafo.

Per poter effettuare la verifica dei tempi sul transitorio ed inserire i parametri caratteristici dell'impianto, i valori di datasheet (che saranno uguali per le tre misure) ed i parametri ambientali, è stato creato il pulsante denominato "Definisci input". Premendolo si aprirà una seconda interfaccia, che si presenta come in Fig.6-13.

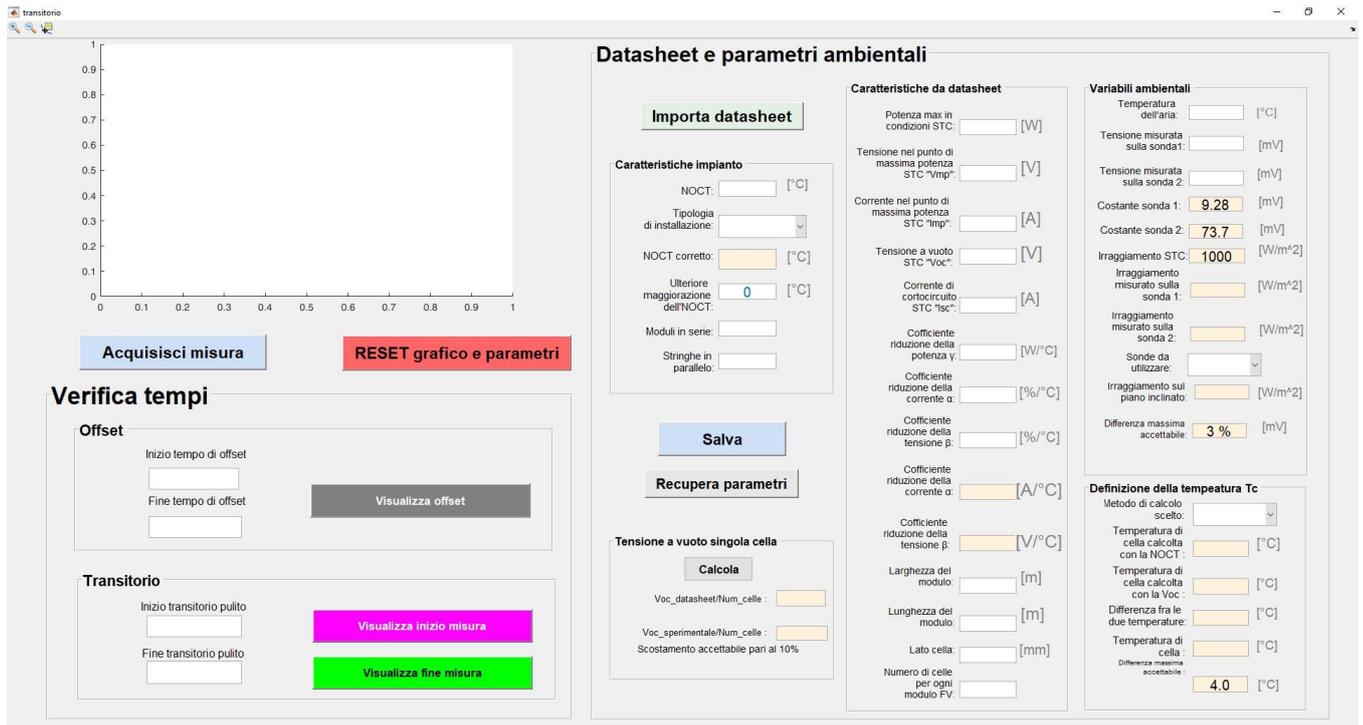
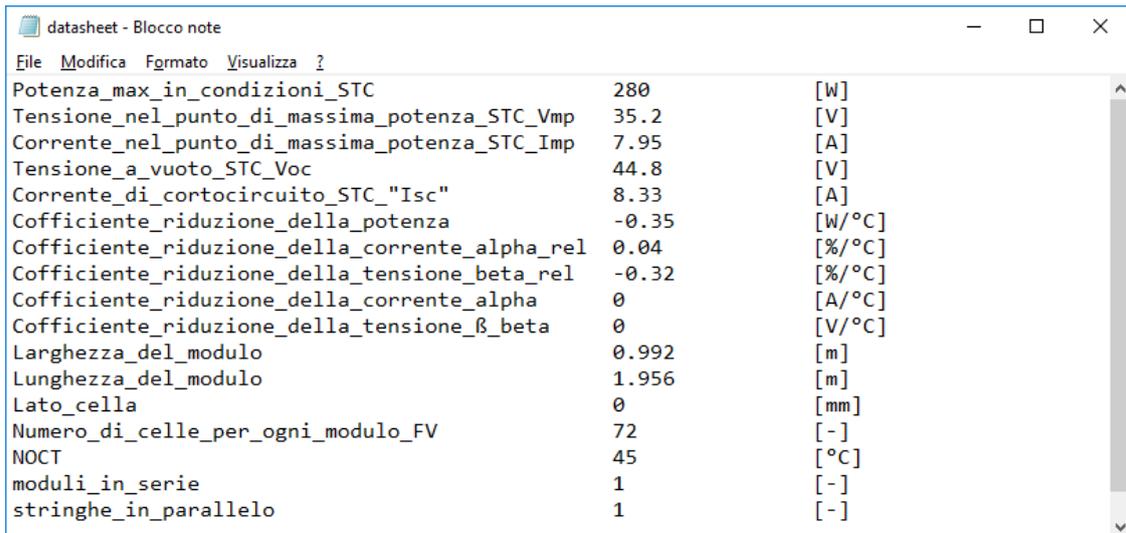


Fig. 6-13 Interfaccia creata per definire inputs

In questa schermata, il pulsante **Acquisisci misura**, importa, in Matlab, le misure salvate dal file di testo come detto precedentemente. Inoltre questo pulsante, oltre a generare il transitorio del segnale di corrente e del segnale di tensione che compariranno nel grafico in alto, propone, in base alla misura, anche il tempo di inizio e fine offset ed il tempo di inizio e fine transitorio che comunque potranno essere modificati dall'utente.

Le istruzioni implementate, nell'editor di Matlab, per questo pulsante riferito alla prima misura, sono riportate in appendice B.

Definiti i tempi, si procede ora a compilare gli *Edit Text* presenti nella parte destra dell'interfaccia (Fig.6-13). Qualora le informazioni relative all'impianto fotovoltaico in esame, fossero conosciute già prima delle misure, è possibile compilare e salvare anticipatamente il file di testo (Fig. 6-14), denominato "datasheet.txt", con queste informazioni.



Parametro	Valore	Unità
Potenza_max_in_condizioni_STC	280	[W]
Tensione_nel_punto_di_massima_potenza_STC_Vmp	35.2	[V]
Corrente_nel_punto_di_massima_potenza_STC_Imp	7.95	[A]
Tensione_a_vuoto_STC_Voc	44.8	[V]
Corrente_di_cortocircuito_STC_"Isc"	8.33	[A]
Coefficiente_riduzione_della_potenza	-0.35	[W/°C]
Coefficiente_riduzione_della_corrente_alpha_rel	0.04	[%/°C]
Coefficiente_riduzione_della_tensione_beta_rel	-0.32	[%/°C]
Coefficiente_riduzione_della_corrente_alpha	0	[A/°C]
Coefficiente_riduzione_della_tensione_beta_beta	0	[V/°C]
Larghezza_del_modulo	0.992	[m]
Lunghezza_del_modulo	1.956	[m]
Lato_cellula	0	[mm]
Numero_di_celle_per_ogni_modulo_FV	72	[-]
NOCT	45	[°C]
moduli_in_serie	1	[-]
stringhe_in_parallelo	1	[-]

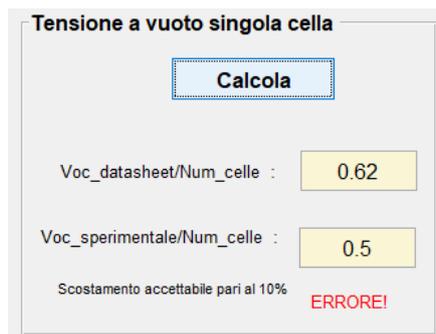
Fig. 6-14 Esempio di compilazione del file di testo *datasheet.txt* conoscendo le informazioni del costruttore e delle caratteristiche dell'impianto prima della misura

In questo modo invece di compilare una ad una le caselle di testo, riferite alle caratteristiche dell'impianto, premendo il pulsante “*Importa datasheet*” nella schermata in Fig.6-13, queste caselle saranno compilate in automatico con i dati salvati anticipatamente nel file di testo, ottimizzando così tempi per l'inserimento degli input.

Le istruzioni implementate per questo pulsante sono riportate in appendice C.

I dati che non possono essere conosciuti a priori, quindi i parametri ambientali registrati durante le misure, dovranno essere inseriti dall'utente nei rispettivi *Edit Text*. Inoltre l'utente dovrà anche scegliere, con i due appositi *Pop-up Menu*, il valore di irraggiamento ed il metodo di calcolo per la temperatura di cella da usare per l'elaborazione.

È stato inserito anche un *Panel*, intitolato “Tensione a vuoto singola cella”, dov'è possibile verificare, appunto, il valore della tensione a vuoto sulle singole celle di un modulo, ottenute sia von la V_{OC} dichiarata dal costruttore che con la V_{OC} ricavata sperimentalmente dal transitorio (tipicamente una singola cella ha $V_{OC}=0,6-0,65V$). In questo modo, se la V_{OC} sperimentale risultasse avere uno scostamento superiore al 10% rispetto a quella dichiarata dal costruttore, comparirà un messaggio di errore.



Tensione a vuoto singola cella

Calcola

Voc_datasheet/Num_celle : 0.62

Voc_sperimentale/Num_celle : 0.5

Scostamento accettabile pari al 10% **ERRORE!**

Fig. 6-15 Esempio di elaborazione per la tensione a vuoto della singola cella, con messaggio di errore

Le istruzioni implementate per il calcolo della V_{OC} sperimentale sono riportate in appendice D.

L'ultimo pulsante da premere, per questa interfaccia, è il pulsante "Salva", grazie al quale verranno salvati appunto, tutti i dati appena inseriti, necessari per l'elaborazione successiva. Questi dati saranno salvati come variabili *globali* per poter essere utilizzati, sia dall'interfaccia principale che dalle altre interfacce di verifica che verranno discusse nel seguito (zoom e verifica potenza massima).

Quindi, sarà ora possibile tornare alla schermata principale (Fig.58) per procedere con l'elaborazione dei dati. Questa operazione dura pochi secondi e viene eseguita premendo il pulsante "Elabora". Durante l'elaborazione, sotto il pulsante "Elabora", comparirà un messaggio di caricamento "Loading..." in rosso e se l'elaborazione va a buon fine, questo messaggio cambierà in "Completato!" in verde.



Fig. 6-16 Stesso pulsante "Elabora" a sinistra durante l'elaborazione a destra ad elaborazione conclusa

Questo tipo di messaggio è stato anche inserito per il pulsante "Esporta dati .xls" e cioè, se si desidera procedere con l'esportazione dei risultati ottenuti sul file Excel "output.xls", durante l'esportazione, che comincia premendo appunto "Esporta dati .xls", comparirà il messaggio di caricamento "Loading..." ed a esportazione terminata il messaggio cambierà in "Completato!".

Il pulsante “Elabora” consente di generare i grafici I-V e P-V sia nelle condizioni ambientali di misura che nelle condizioni normalizzate STC. Queste curve caratteristiche saranno riportate nell’apposito “Axes” predisposto per la misura in esame. Per esempio, in Fig.63 è mostrata l’elaborazione completa della *Misura 1* che ha portato alla definizione di queste caratteristiche. È importante notare inoltre, come, ad elaborazione conclusa, viene anche compilato il report con i parametri caratteristici ricavati dalle misure sul campione di prova.

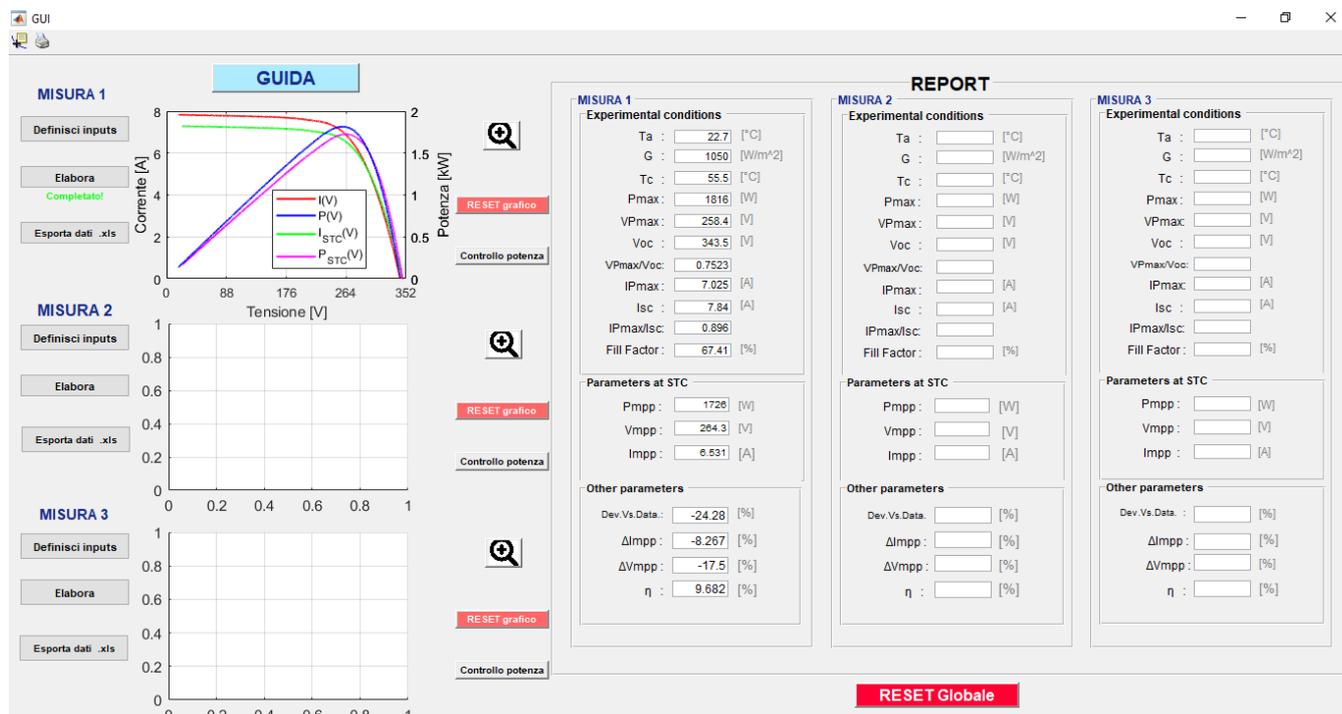


Fig. 6-17 Esempio di elaborazione completa per la sola Misura 1

In appendice E sono riportate le principali istruzioni implementate nel pulsante “Elabora”:

Nella schermata principale, di fianco a ciascun grafico delle tre misure, sono stati inseriti tre pulsanti. Nel dettaglio:

- Il primo, che ha come icona una lente d’ingrandimento, apre un’interfaccia dov’è riportato lo stesso grafico che si è appena generato con l’elaborazione, ma ingrandito per consentire una migliore leggibilità. La schermata che si aprirà è riportata in Fig.64.

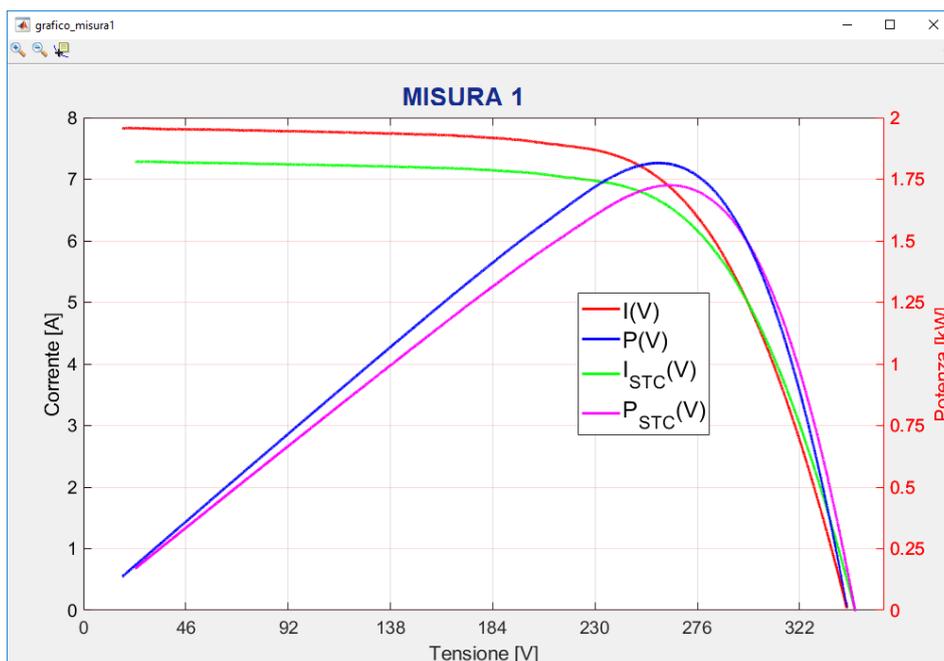


Fig. 6-18 Schermata visualizzata premendo il pulsante con la lente d'ingrandimento nella schermata principale

- Il secondo pulsante, colorato in rosso, è denominato “RESET grafico”. Com'è intuibile, premendolo, verrà cancellato il grafico generato a seguito dell'elaborazione ed insieme ad esso saranno cancellati tutti i parametri inseriti nel report finale dell'interfaccia. Inoltre verranno anche cancellate tutte le variabili globali salvate nella memoria di Matlab, quindi gli inputs inseriti inizialmente. Dunque, se si volessero rielaborare le misure, sarà necessario ridefinire e salvare gli inputs dalla schermata “Definisci inputs”.
- Il terzo pulsante, “Controllo potenza”, se premuto dopo l'elaborazione, apre un'ulteriore interfaccia dov'è riportato il grafico P-V nelle condizioni di prova ed il valore di massima potenza ricavato facendo l'operazione della media mobile sui valori di potenza nelle condizioni di misura. Questo grafico serve quindi a verificare che il valore di massima potenza trovato con la media mobile sia effettivamente sulla curva P-V. Oltre al grafico, vi è una tabella che riporta i valori massimi di potenza e di tensione ricavati direttamente dalle misure e quelli ricavati con la media mobile e la loro rispettiva differenza.

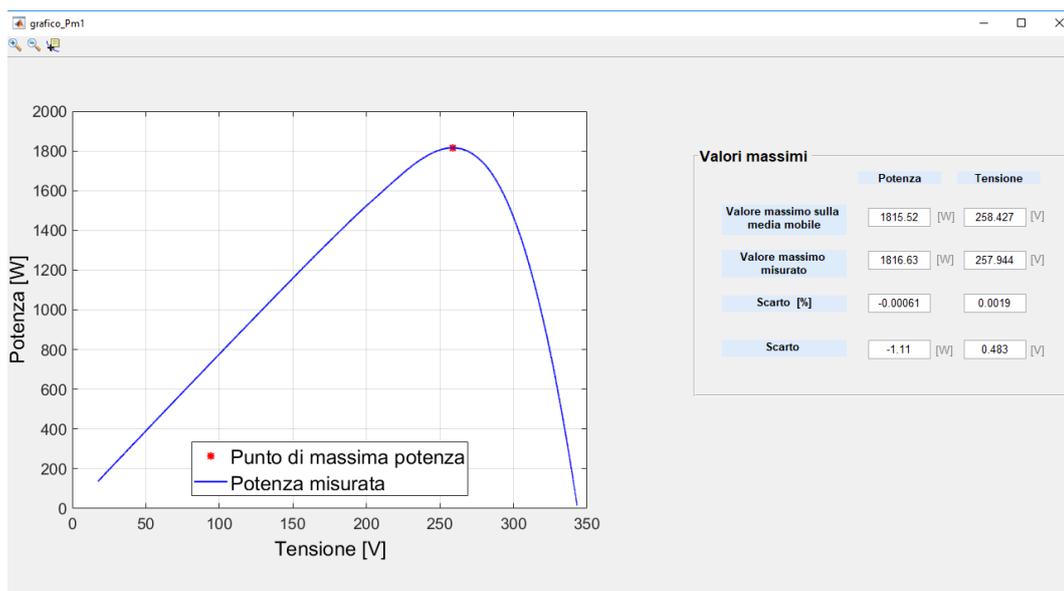
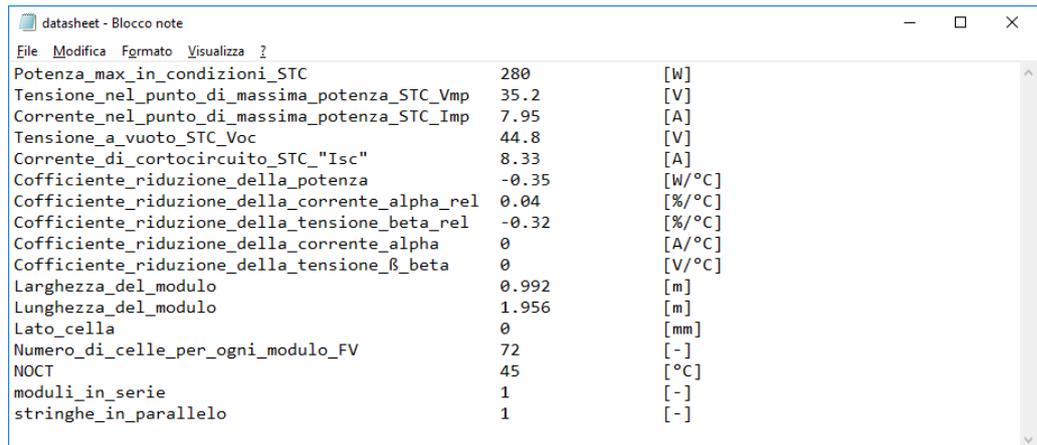


Fig. 6-19 Schermata visualizzata premendo il pulsante "Controllo potenza" della misura 1

6.2.4 Guida all'uso della GUI

Di seguito sono riportate le istruzioni che deve seguire l'utente per poter arrivare a ricavare i grafici caratteristici I-V e P-V e per poter completare il report finale. L'utente può accedere ad un file .pdf con queste istruzioni cliccando su pulsante "GUIDA" in alto nella schermata principale del software.

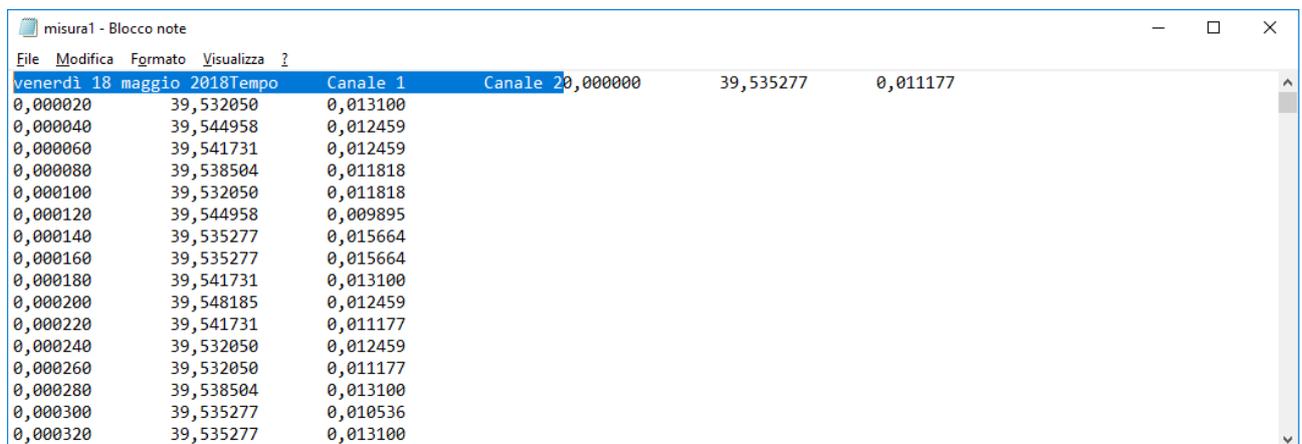
1. Se prima delle misure sono già noti i parametri da datasheet dell'impianto e/o la configurazione del generatore FV da analizzare (moduli in serie e stringhe in parallelo), aprire il file "*datasheet.txt*" presente nella cartella GUI e modificare il valore dei parametri. Nel caso non fossero noti alcuni parametri, inserire il numero 0 come nell'esempio sottostante, dove alpha, beta e il lato di cella non erano conosciuti. Completato l'inserimento dei parametri premere su "File" → "Salva" e chiudere il file di testo.



Parametro	Valore	Unità
Potenza_max_in_condizioni_STC	280	[W]
Tensione_nel_punto_di_massima_potenza_STC_Vmp	35.2	[V]
Corrente_nel_punto_di_massima_potenza_STC_Imp	7.95	[A]
Tensione_a_vuoto_STC_Voc	44.8	[V]
Corrente_di_cortocircuito_STC_"Isc"	8.33	[A]
Coefficiente_riduzione_della_potenza	-0.35	[W/°C]
Coefficiente_riduzione_della_corrente_alpha_rel	0.04	[%/°C]
Coefficiente_riduzione_della_tensione_beta_rel	-0.32	[%/°C]
Coefficiente_riduzione_della_corrente_alpha	0	[A/°C]
Coefficiente_riduzione_della_tensione_B_beta	0	[V/°C]
Larghezza_del_modulo	0.992	[m]
Lunghezza_del_modulo	1.956	[m]
Lato_cellula	0	[mm]
Numero_di_celle_per_ogni_modulo_FV	72	[-]
NOCT	45	[°C]
moduli_in_serie	1	[-]
stringhe_in_parallelo	1	[-]

Fig. 6-20 File di testo “datasheet.txt” da modificare con parametri dichiarati dal costruttore

- Rinominare i tre file .txt, relativi alle tre misure, rispettivamente come “misura1.txt”, “misura2.txt”, “misura3.txt” e inserirli nella cartella GUI.
- Per ciascuno dei file “misura#.txt” appena inseriti, cancellare dalla prima riga “Data” “Tempo” “Canale 1” e “Canale 2” come nell’esempio:



Tempo	Canale 1	Canale 2
0,000020	39,532050	0,013100
0,000040	39,544958	0,012459
0,000060	39,541731	0,012459
0,000080	39,538504	0,011818
0,000100	39,532050	0,011818
0,000120	39,544958	0,009895
0,000140	39,535277	0,015664
0,000160	39,535277	0,015664
0,000180	39,541731	0,013100
0,000200	39,548185	0,012459
0,000220	39,541731	0,011177
0,000240	39,532050	0,012459
0,000260	39,532050	0,011177
0,000280	39,538504	0,013100
0,000300	39,535277	0,010536
0,000320	39,535277	0,013100

Fig. 6-21 File di testo “misura1.txt” da modificare

- Sostituire le virgole con il punto passando quindi alla numerazione anglosassone. Per far ciò cliccare sui pulsanti “Modifica” → “Sostituisci”. Nell’opzione “Trova” inserire la virgola, nell’opzione “Sostituisci con” inserire il punto e premere il pulsante “Sostituisci tutto”.
- I files di testo modificati avranno, quindi, il seguente formato:

File	Modifica	Formato	Visualizza
0.000000	39.535277	0.011177	
0.000020	39.532050	0.013100	
0.000040	39.544958	0.012459	
0.000060	39.541731	0.012459	
0.000080	39.538504	0.011818	
0.000100	39.532050	0.011818	
0.000120	39.544958	0.009895	
0.000140	39.535277	0.015664	
0.000160	39.535277	0.015664	
0.000180	39.541731	0.013100	
0.000200	39.548185	0.012459	
0.000220	39.541731	0.011177	
0.000240	39.532050	0.012459	
0.000260	39.532050	0.011177	
0.000280	39.538504	0.013100	
0.000300	39.535277	0.010536	
0.000320	39.535277	0.013100	

Fig. 6-22 File di testo "misura1.txt" modificato

6. Se non è stato ancora eseguito, avviare il programma GUI.m dall'editor di Matlab.

Cliccare sul pulsante "Definisci inputs" per aprire la schermata di acquisizione dei dati di input della prima misura. Questi sono necessari per ottenere la curva I-V e la caratteristica potenza-tensione (P-V), nelle condizioni di misura ed in condizioni STC.

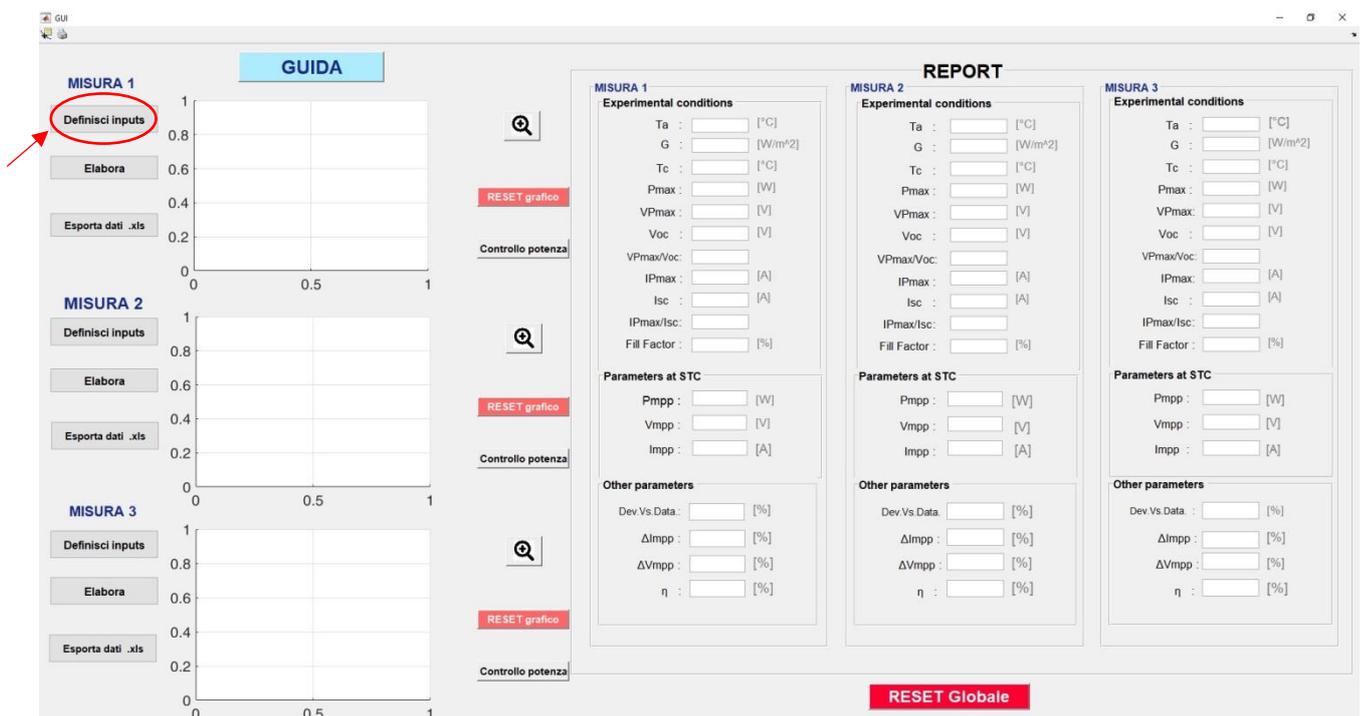


Fig. 6-23 Schermata principale del software

7. Nella schermata aperta (Fig. 6-24), cliccando su "Acquisisci misura", si otterrà il grafico relativo alle misure di tensione e corrente nel tempo. Inoltre il software proporrà dei valori per la verifica tempi che potranno comunque essere modificati. Per poter visualizzare questi

tempi sul grafico generato, premere i rispettivi pulsanti: “*Visualizza offset*” “*Visualizza inizio transitorio*” “*Visualizza fine transitorio*”.

Per inserire valori corretti, utilizzare i pulsanti di zoom presenti in alto a sinistra della schermata.

N.B.

È necessario che il valore iniziale di offset sia diverso da zero e che il valore di fine transitorio non sia uguale all’ultimo valore di tempo registrato.

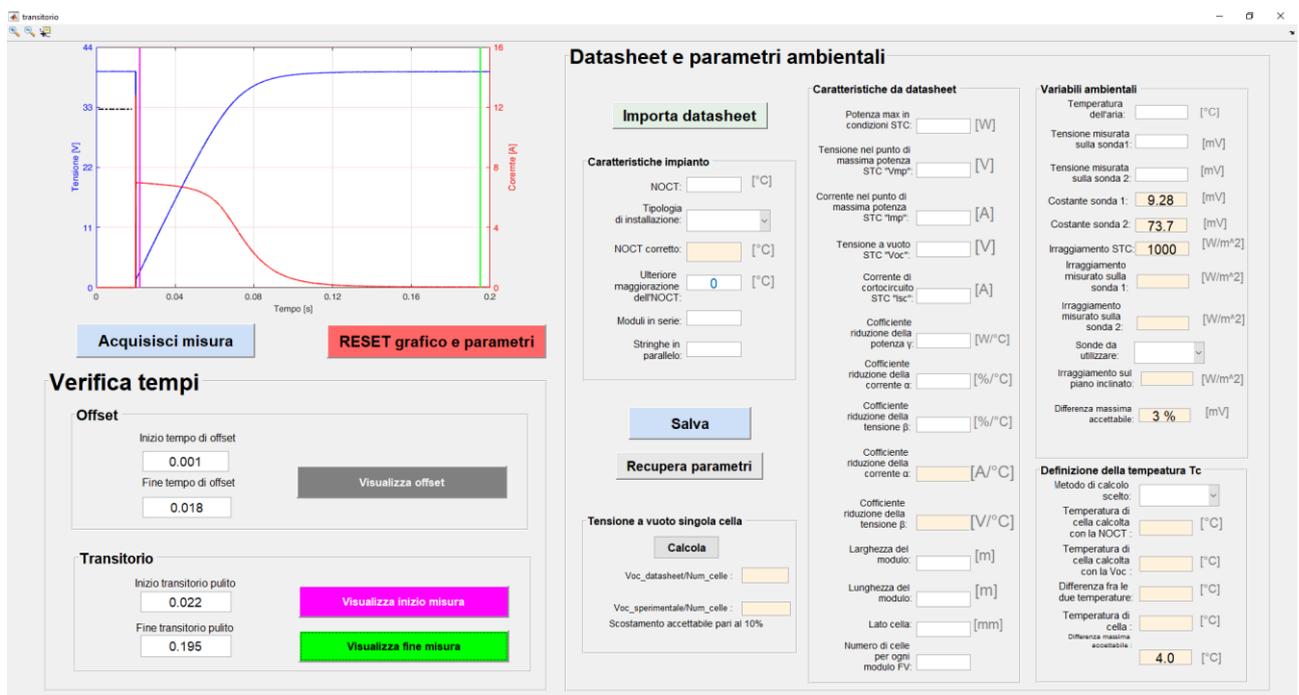


Fig. 6-24 Schermata aperta cliccando su "Definisci input" con verifica del transitorio effettuata

8. Se non è stato eseguito il punto 1, saltare questo passaggio.

Premere il pulsante “*Importa datasheet*”. Verranno così compilate le caselle di questa interfaccia con i rispettivi parametri salvati sul file di testo “*datasheet.txt*”. Questi valori possono comunque essere modificati dall’interfaccia. Completare il pannello relativo ai parametri ambientali. La caselle colorate in giallo non vanno compilate poiché, o daranno dei risultati automaticamente oppure perché, al loro interno, sono state salvate delle costanti necessarie ai fini dei calcoli.

9. Se non è stato eseguito il punto 1, compilare il pannello di destra relativo ai parametri del datasheet ed alle variabili ambientali.

La caselle colorate in giallo non vanno compilate poiché, o daranno dei risultati automaticamente oppure perché, al loro interno, sono state salvate delle costanti necessarie ai fini dei calcoli.

10. Effettuare le scelte nei tre *Pop-up menu* (menu a tendina) riferiti rispettivamente alla tipologia di installazione, al valore di irraggiamento da usare e al tipo di calcolo che il programma deve adoperare per il calcolo della temperatura di cella T_C .

Eventuali messaggi di errore, non precludono il proseguo dell'elaborazione.

11. Se si desidera, visualizzare il valore della tensione a vuoto sulla singola cella sia con la V_{oc} dichiarata dal costruttore, che con la V_{oc} ottenuta dalla misura. Per far ciò premere su “Calcola”.

Se lo scostamento tra questi due valori è maggiore del 10% comparirà un messaggio di errore.

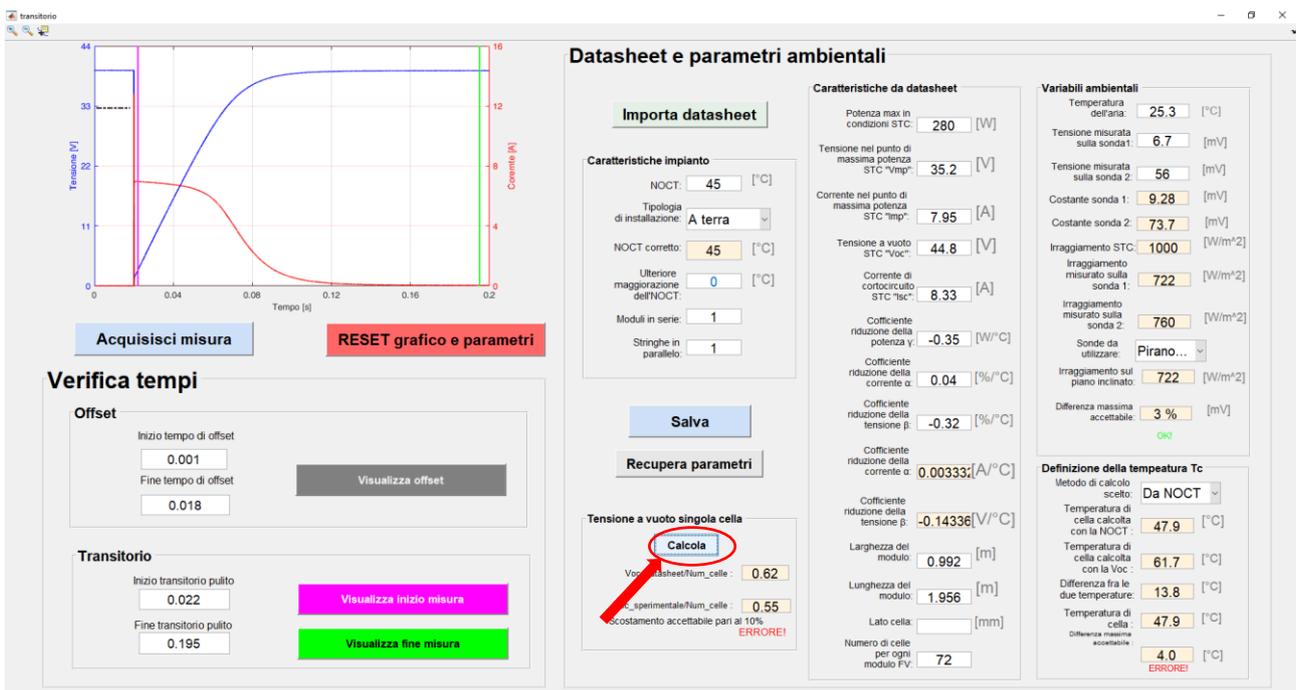


Fig. 6-25 Schermata degli input con tutti i parametri inseriti e pronti per l'elaborazione

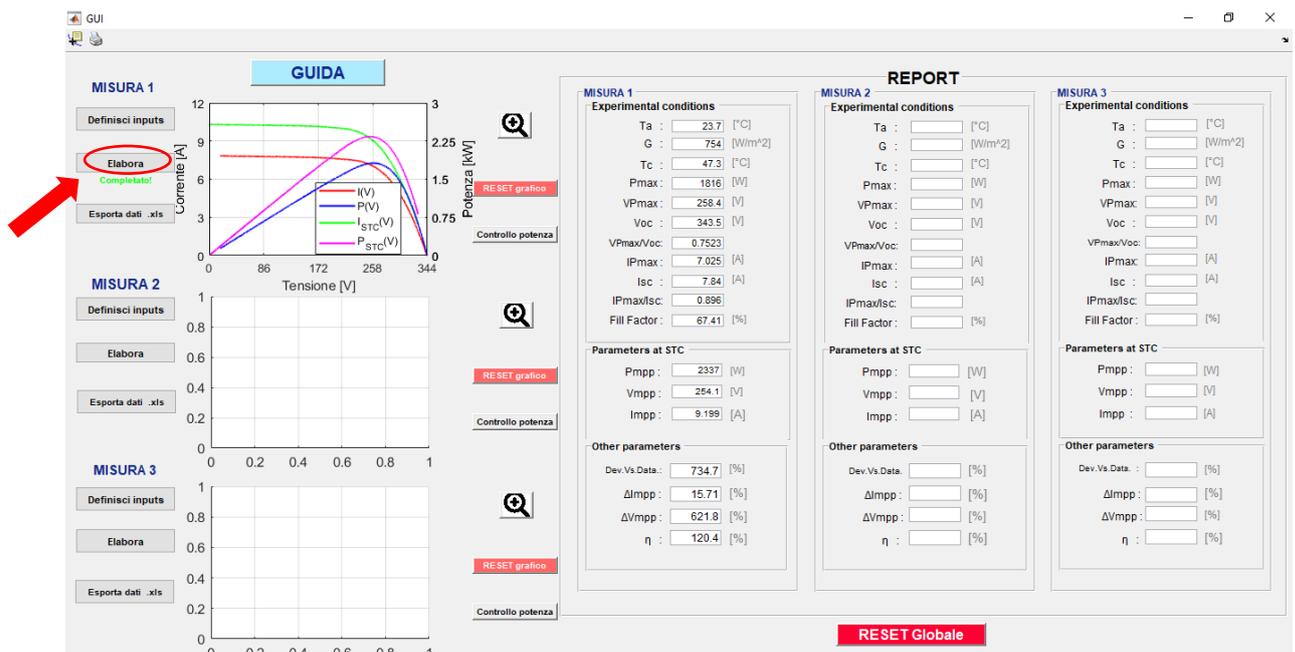
12. Inseriti tutti i parametri, cliccare su “Salva” e ridurre la schermata ad icona.



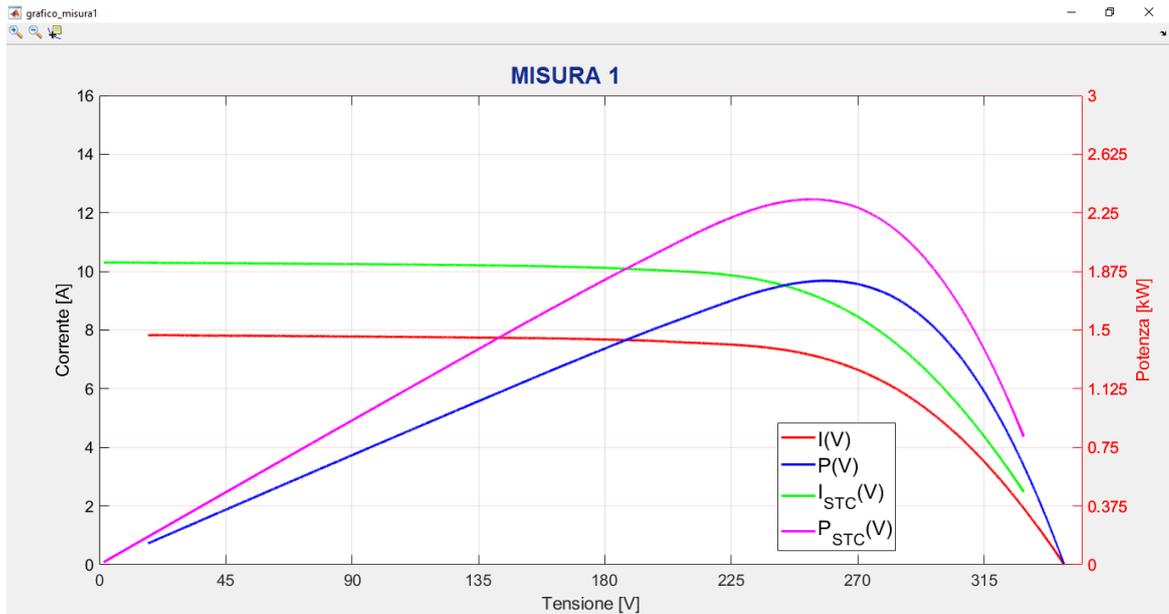
13. Qualora questa schermata venisse accidentalmente chiusa, riaprendola, cliccando su “Definisci inputs” della schermata principale, i parametri prima inseriti risulteranno essere cancellati. Per recuperare i parametri inseriti manualmente cliccare su “Recupera parametri”

14. Tornare alla schermata iniziale, cliccare sul pulsante “Elabora” relativo alla MISURA 1. A questo punto saranno generate le caratteristiche tensione-corrente e tensione-potenza in condizioni normali ed in condizioni STC come mostrato nell’esempio.

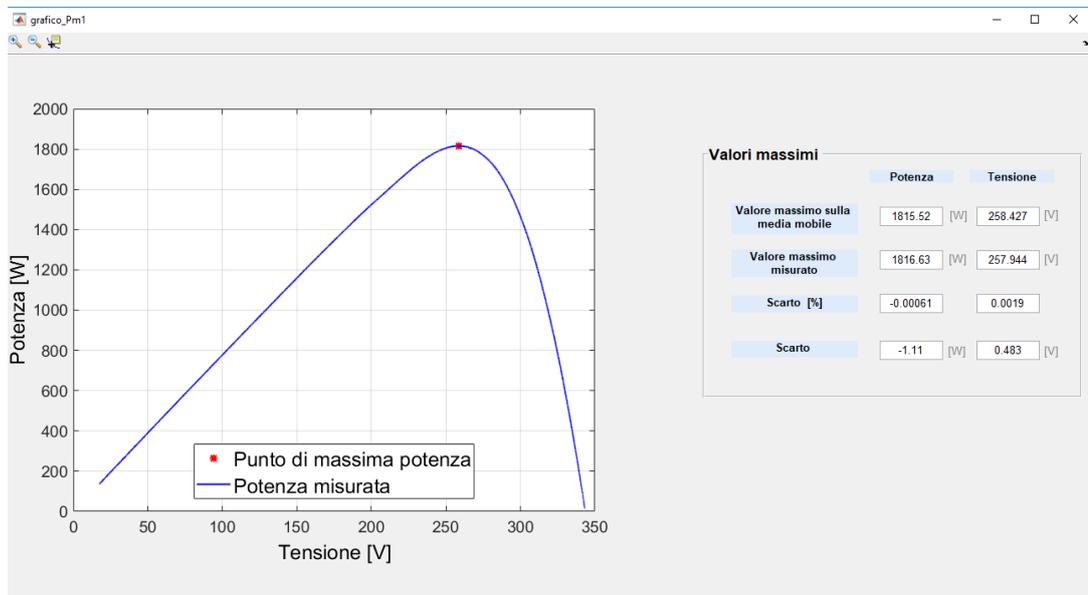
Inoltre, sulla destra, verrà anche compilato il report relativo alla MISURA 1.



15. Premendo sul pulsante di zoom (🔍) è possibile ingrandire il grafico per una migliore leggibilità, ottenendo questa schermata:



16. Cliccando su “Controllo potenza” si può verificare se il valore di massima potenza, trovato con la media mobile, sia effettivamente sulla curva P-V nelle condizioni di misura. . Oltre al grafico, vi è una tabella che riporta i valori massimi di potenza e di tensione ricavati direttamente dalle misure e quelli ricavati con la media mobile e la loro rispettiva differenza.



17. Tornando alla schermata principale “GUI” premere su “Esporta dati .xls” per compilare il file outputs.xlsx. Siccome questa procedura richiede alcuni minuti, si consiglia di effettuarla una volta acquisite ed elaborate tutte e tre le misure.

18. Ripetere i passaggi dal punto 6 al punto 17 per la Misura 2 e Misura 3.

19. Nel caso sia necessario modificare dei dati di input relativi ad una misura, premere il rispettivo pulsante “*RESET grafico*”.
Cliccare quindi su “*Definisci inputs*” per modificare i dati

20. Il pulsante rosso “*RESET grafico*”, come è intuibile, cancella il grafico ed il report relativo alla singola misura a cui è riferito. Inoltre cancella dalla memoria del programma tutte le variabili salvate precedentemente riferite alla misura selezionata. Quindi, una volta premuto tornare in “*Definisci inputs*” → “*RESET grafico e parametri*” e ripetere i passaggi dal punto 7 al punto 17

21. Per elaborare delle nuove misure riferite ad un altro generatore FV, premere “*RESET Globale*” in fondo alla schermata principale.

6 ESPERIENZA DI MISURA SU UN MODULO DI PROVA

In questo capitolo è descritta un'esperienza di misura effettuata nel mese di maggio (2018) su un modulo FV. Le misure ottenute sono state elaborate con l'interfaccia grafica per valutare se vi era, o no, un calo di prestazioni rispetto a quanto dichiarato dal costruttore. Infine le misure sono state anche elaborate con un foglio di calcolo Excel utilizzato per le misurazioni fotovoltaiche ufficiali del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino in modo da poter verificare l'accuratezza dell'elaborazione dell'interfaccia grafica.

7.1 Modulo in prova

L'acquisizione delle misure è avvenuta con lo stesso principio discusso nel capitolo 3, quindi sempre durante la carica di un sistema di condensatori ma da 10 mF e con $V_n=800V$, già in possesso del Dipartimento di Energia.

Il modulo in prova è della ditta *GEOSOLAR* modello *GES-P280*. Si tratta di un modulo fotovoltaico policristallino costituito da celle solari ad alta efficienza con buone prestazioni anche in condizioni ad alta temperatura o bassa irradianza.



Fig. 6-1 Modulo testato della ditta GEOSOLAR modello GES-P280

In Tabella 5 sono riportati i valori di datasheet implementati nell'interfaccia

Caratteristiche modulo in prova		
Potenza_max_in_condizioni_STC	280	[W]
Tensione_nel_punto_di_massima_potenza_STC_Vmp	35.2	[V]
Corrente_nel_punto_di_massima_potenza_STC_Imp	7.95	[A]
Tensione_a_vuoto_STC_Voc	44.8	[V]
Corrente_di_cortocircuito_STC_"Isc"	8.33	[A]
Coefficiente_riduzione_della_potenza	-0.35	[W/°C]
Coefficiente_riduzione_della_corrente_alpha_rel	0.04	[%/°C]
Coefficiente_riduzione_della_tensione_beta_rel	-0.32	[%/°C]
Coefficiente_riduzione_della_corrente_alpha	0	[A/°C]
Coefficiente_riduzione_della_tensione_β_beta	0	[V/°C]
Larghezza_del_modulo	0.992	[m]
Lunghezza_del_modulo	1.956	[m]
Lato_cell	0	[mm]
Numero_di_celle_per_ogni_modulo_FV	72	[-]
NOCT	45	[°C]

Tabella 5 Caratteristiche da datasheet del modulo in prova

7.2 Elaborazione e risultati da interfaccia grafica

Salvate le tre misure, fatte nel più breve tempo possibile l'una dall'altra, evitando così un'eccessiva variazione dei parametri ambientali, è stato possibile procedere con l'elaborazione tramite l'interfaccia, seguendo i passaggi discussi nel capitolo precedente.

Ad elaborazione terminata, l'interfaccia si presenta come in Fig.

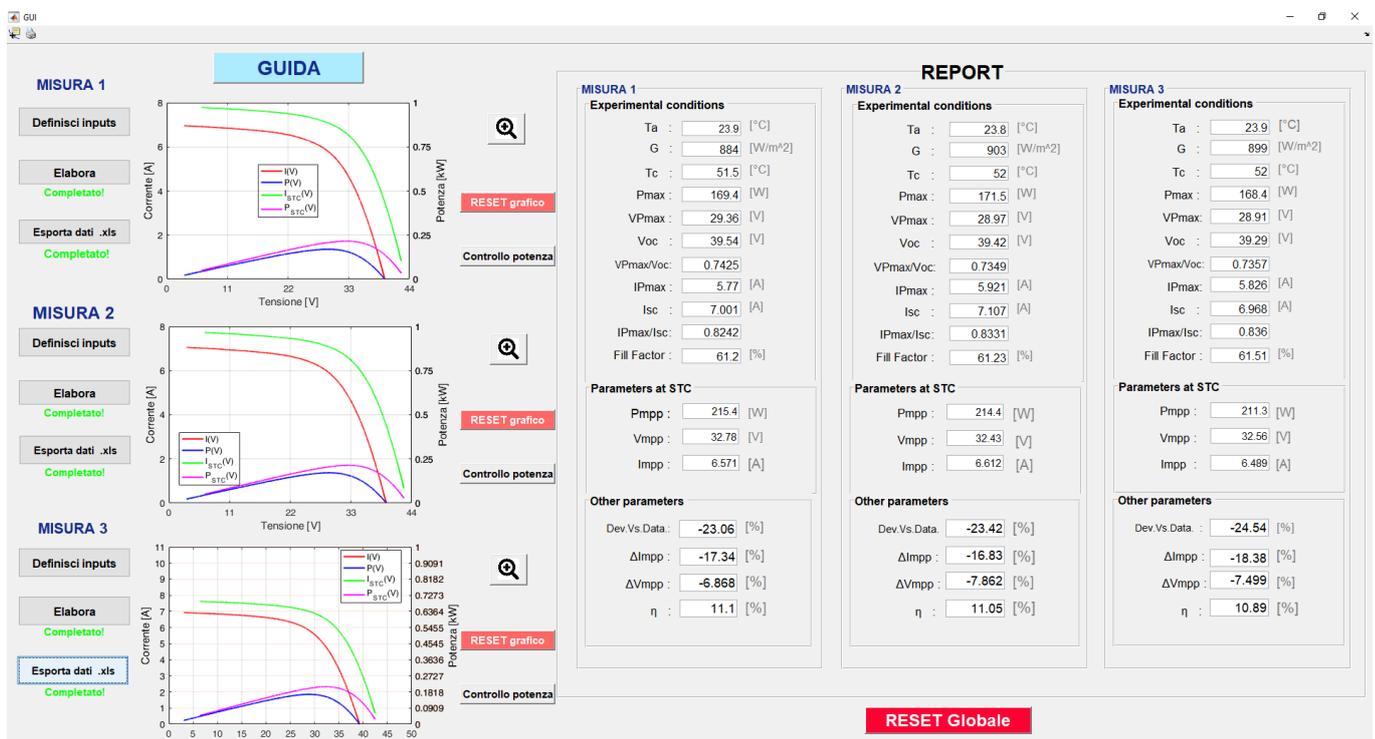


Fig. 6-2 Risultati ottenuti dalle elaborazioni delle tre misure

Dal report emerge come, per questo modulo, ci sia molto scostamento tra la potenza dichiarata dal costruttore in condizioni STC e quella ottenuta dall'elaborazione. Infatti il valore *Dev.VsData* presente nel report, che indica la differenza relativa fra la potenza dichiarata dal costruttore in condizioni STC e la potenza ottenuta dalle misure riportata in condizioni STC, risulta con un valore medio di -23.67%. Questo valore indica quindi un drastico calo di prestazioni del modulo dovuto ad un possibile degrado delle celle solari.

Per avere conferma dei risultati ottenuti, successivamente si è deciso di effettuare un test di elettroluminescenza, per poter osservare gli eventuali difetti nel modulo.

Il test di elettroluminescenza, sostanzialmente, consiste nel far funzionare il modulo non da generatore ma da carico. Alimentando dunque il modulo con un alimentatore da banco in una camera oscura, si è fotografato il modulo con un'apposita fotocamera ad infrarossi. Con questa tecnica si riesce ad individuare immediatamente quali sono le celle difettose, poiché, a differenza di quelle "sane" non risulteranno illuminate. L'analisi sul modulo in esame, ha prodotto l'immagine in Fig.

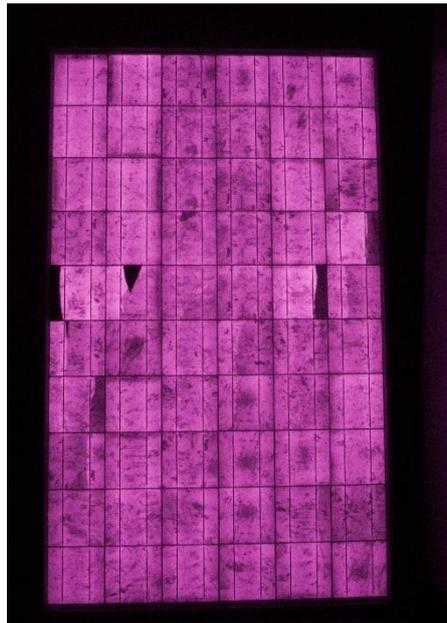


Fig. 6-3 Modulo esaminato con la tecnica dell'elettroluminescenza

Come ci si aspettava, sono stati riscontrati dei danni su alcune celle che giustificano il calo di prestazione trovato con l'elaborazione dei dati tramite interfaccia GUI.

7.3 Verifica dell'accuratezza dei risultati da interfaccia

Per valutare l'accuratezza dell'interfaccia, i risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti effettuando l'elaborazione dei segnali di corrente e tensione tramite il foglio di calcolo Excel, già in uso, dal dipartimento di Energia del Politecnico, per le misurazioni fotovoltaiche.

Siccome nel report dell'interfaccia, sono visualizzati i valori arrotondati, per poterli vedere con tutte le cifre significative, è stata effettuata l'esportazione premendo il pulsante "Esporta dati .xls" per tutte e tre le misure. I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 7:

Condizioni sperimentali	MISURA 1	MISURA 2	MISURA 3	Average	
Ta	23.9	23.8	23.900	23.86667	°C
G	884.4828	902.9095	899.138	895.5101	W/m2
Tc	51.525	52.01875	51.994	51.84583	°C
Pmax	169.3851	171.5237	168.408	169.7723	W
VPmax	29.35706	28.96981	28.908	29.07846	V
Voc	39.53691	39.41875	39.293	39.41634	V
VPmax/Voc	0.742523	0.734925	0.736	0.737719	
IPmax	5.769825	5.920773	5.826	5.838718	A
Isc	7.000576	7.106982	6.968	7.025177	A
IPmax/Isc	0.824193	0.833092	0.836	0.831111	
Fill Factor	0.611982	0.61226	0.615	0.61311	
Parametri in STC					
Pmpp	215.419	214.4362	211.286	213.7138	W
Vmpp	32.78239	32.4327	32.560	32.59176	V
Impp	6.571181	6.61173	6.489	6.557335	A
Altri parametri					
Deviation vs. datasheet	-0.23065	-0.23416	-0.245	-0.23674	
DImp	-0.17344	-0.16834	-0.184	-0.17518	
DVmp	-0.06868	-0.07862	-0.075	-0.0741	
η	0.111021	0.110514	0.109	0.110142	

Tabella 6 Risultati con più cifre significative ottenuti dall'interfaccia

L'elaborazione tramite il programma in Excel, ha prodotto i risultati in Tabella 7:

Condizioni sperimentali	MISURA 1	MISURA 2	MISURA 3	Average	
Ta	23.9	23.8	23.900	23.86667	°C
G	884.4828	902.9095	899.138	895.5101	W/m2
Tc	51.54009	52.01592	51.998	51.85136	°C
Pmax	169.3851	171.5237	168.408	169.7723	W
VPmax	29.35706	28.96981	28.908	29.07846	V
Voc	39.53691	39.41875	39.293	39.41634	V
VPmax/Voc	0.742523	0.734925	0.736	0.737719	
IPmax	5.769825	5.920773	5.826	5.838718	A
Isc	6.999377	7.10507	6.967	7.023933	A
IPmax/Isc	0.824334	0.833317	0.836	0.831258	
Fill Factor	0.612087	0.612425	0.615	0.613218	
Parametri in STC					
Pmpp	215.4293	214.4283	211.288	213.7152	W
Vmpp	32.78499	32.43246	32.561	32.59278	V
Impp	6.570974	6.611534	6.489	6.557172	A
Altri parametri					
Deviation vs. datasheet	-0.23061	-0.23418	-0.245	-0.23673	
DImp	-0.17346	-0.16836	-0.184	-0.1752	
DVmp	-0.06861	-0.07862	-0.075	-0.07407	
η	0.111026	0.11051	0.109	0.110142	

Tabella 7 Risultati ottenuti dal foglio di calcolo Excel

Dal confronto dei risultati si può notare come i valori ottenuti siano pressoché identici. In particolare, per quanto riguarda gli scostamenti dei valori di V_{mpp} , I_{mpp} e P_{mpp} in condizioni STC dai parametri forniti dal costruttore, sono state ottenute deviazioni tra i due modelli, rispettivamente, pari a 0,0074%, 0,0026% e 0,0005%.

CONCLUSIONI

Nella prima parte del lavoro è stato svolto il dimensionamento dei componenti di un sistema di misura per il rilevamento della curva I-V di generatori FV operanti fino a 1500 V_{DC}. In particolare, allo scopo di dimensionare i condensatori e le resistenze necessari per lo svolgimento delle misurazioni, è stato scelto come riferimento un impianto con potenza installata di 250kW.

La ricerca del sistema capacitivo adeguato è stata svolta cercando sul mercato condensatori con tempi di carica compresi tra 80 ms e 110 ms, corrispondenti ad una taglia equivalente compresa tra 6,98 mF e 9,60 mF. È stata, dunque, scelta la soluzione che prevede il minor numero di unità capacitive da installare: tre condensatori connessi in parallelo della ditta *AVX* modello *DFHHV013A3107*, con $C_{eq}=9,3$ mF, $V_n=1900$ V_{DC} e tempo di carica pari a 107 ms.

Inoltre, è stato dimensionato il sistema di resistenze necessario per la scarica dei carichi capacitivi. In particolare, è stato cercato un carico resistivo che permettesse la scarica in un tempo compreso tra 0,5 s e 10 s. La configurazione scelta comprende tre resistenze connesse in serie della ditta *TE Connectivity* modello *TE750B47RJ*, con $R_{eq}=141$ Ω, $V_n=1500$ V_{DC} e tempo di scarica del sistema capacitivo pari a circa 6,55 s. Sono stati anche acquistati due contattori normalmente aperti della ditta *GICAVAC* modello *HX22* ($V_n=1500$ V_{DC}, $I_n=300$ A), che consentono le manovre di carica e scarica del circuito di misura.

Nella seconda parte dell'elaborato, è stato automatizzato il sistema di misura, sia nella parte di acquisizione dei dati sia in quella di elaborazione della caratteristica I-V.

Innanzitutto, è stato realizzato un circuito di controllo che gestisce i processi di carica/scarica del sistema capacitivo e a tal proposito, il circuito è composto da due contattori, due moduli relè di Arduino e tre led comandati dal microcontrollore Arduino. Inoltre, sono state previste due modalità di svolgimento delle misurazioni: manuale e automatica.

Per quanto riguarda la prima modalità, l'operatore gestisce la carica e la scarica in maniera manuale attraverso un commutatore a tre posizioni: questo, partendo dalla posizione aperta di riposo, consente di chiudere il circuito di carica e poi, successivamente, quello di scarica, evitando in questo modo la chiusura simultanea dei due dispositivi.

Nella modalità automatica, invece, la gestione dei processi di carica/scarica è affidata al microcontrollore Arduino, il quale deve essere comunque avviato con un pulsante manuale. In particolare, il microcontrollore comanda due relè normalmente aperti, uno posizionato sui contatti

ausiliari del contattore che consente la carica e l'altro sui contatti ausiliari del contattore che consente la scarica.

Inoltre, nel microcontrollore sono stati implementati i tempi di carica e scarica definiti in precedenza e sono stati inseriti nel circuito tre led: due segnalano l'alimentazione del circuito ausiliario dei contattori e un altro segnala il tipo di modalità di misura scelta (manuale/automatica).

Inoltre, è stata realizzata un'interfaccia grafica GUI (*Graphical User Interface*) in ambiente Matlab, grazie alla quale è possibile elaborare in maniera semi-automatica i segnali di corrente e tensione acquisiti. In particolare, il software prevede la possibilità di elaborare fino a tre misure di un generatore FV, ottenendo le curve I-V e P-V sia nelle condizioni di misura sia in STC (si utilizza la CEI 82-5 per il riporto nelle condizioni standard di misura).

Infine, per verificare l'accuratezza dell'interfaccia creata, uno stesso modulo (in particolare un modulo policristallino da 280 W, modello *GES-P280*) è stato sottoposto a misura e si è proceduto all'elaborazione dei segnali di corrente e tensione sia con il sistema utilizzato dal Dipartimento Energia del Politecnico di Torino sia con l'interfaccia proposta nel presente lavoro. Sono stati ottenuti scarti trascurabili tra i due metodi per tutti i parametri elaborati. In particolare, per quanto riguarda gli scostamenti dei valori di U_{mpp} , I_{mpp} e P_{mpp} in condizioni STC dai parametri forniti dal costruttore, sono state ottenute deviazioni tra i due modelli pari, rispettivamente, a 0,0074%, 0,0026% e 0,0005%. Questa esperienza ha inoltre dimostrato come l'interfaccia creata, oltre ad essere più intuitiva, consente di ottenere i risultati in tempo reale, riducendo notevolmente i tempi di elaborazione che portano alla definizione della caratteristica I-V.

APPENDICE A

Codice Arduino per gestione automatica dei contattori

```
int RELE1 = 5;
int RELE2 = 7;
int INTERRUTTORE = 3;
int val=0;
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(RELE1, OUTPUT);
  pinMode(RELE2, OUTPUT);
  pinMode(INTERRUTTORE, INPUT);
  digitalWrite(RELE1, LOW); //Turn off relay
  digitalWrite(RELE2, LOW);
  delay(1000);
}

void loop() {
  val = digitalRead(INTERRUTTORE); // legge il valore dell'input e lo conserva

  // controlla che l'input sia HIGH (pulsante premuto)
  if (val == HIGH) {

    delay(1000);           // attende un secondo
    digitalWrite(RELE1, LOW); //apre S1
    delay(1000);
    digitalWrite(RELE1, HIGH); //chiude S1 e si accende LED rosso
    delay(106,6);         // tiene chiuso S1 per 106,6 ms (carica condensatore)
    digitalWrite(RELE1, LOW); //apre S1

    delay(1000);
    digitalWrite(RELE2, LOW); //apre S2
    delay(1000);
    digitalWrite(RELE2, HIGH); //chiude S2 e si accende LED giallo
    delay(10000); //      tiene chiuso S2 per 10 sec (scarica su resistenze) anche se per la scarica bastano
                        7sec
    digitalWrite(RELE2, LOW); //apro S2
  }
}
```

APPENDICE B

Istruzioni implementate nel pulsante “Acquisisci misura”

```

function acquisisci_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to acquisisci (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

misural=load('misural.txt');
tempo_misurato=misural(:,1);
tensione_misurata=misural(:,2);
corrente_misurata=misural(:,3);
passo_misura_tempo=misural(2,1)-misural(1,1);
global passo_misura_tempo;

tempo_misurato_massimo=max(tempo_misurato);
tensione_misurata_massima=max(tensione_misurata);
corrente_misurata_massima=max(corrente_misurata);

tempo_sicurezza=1/100*round(tempo_misurato(end),3);
posizione_sicurezza=tempo_sicurezza/passo_misura_tempo;

tempo_massimo=round(tempo_misurato(end),1,'significant');

passo_tempo=tempo_massimo/5;

%% tempo_arrotondato=passo_tempo*10;
ascisse_tempo=0:passo_tempo:tempo_massimo;
dimensione_ordinate=4;
tensione_massima_grafico=ceil(tensione_misurata_massima*1.1);

contatore_tensione=0;

while contatore_tensione==0

    if
ceil(tensione_massima_grafico/dimensione_ordinate)==tensione_massima_grafico/dim
ensione_ordinate

        contatore_tensione=1;
    else
        tensione_massima_grafico=tensione_massima_grafico+1;
    end
end

passo_tensione=tensione_massima_grafico/dimensione_ordinate;
ordinata_sinistra=0:passo_tensione:tensione_massima_grafico;

corrente_massima_grafico=ceil(corrente_misurata_massima*1.1);

contatore_corrente=0;

while contatore_corrente==0
    if
ceil(corrente_massima_grafico/dimensione_ordinate)==corrente_massima_grafico/dim
ensione_ordinate

```

```

        contatore_corrente=1;

    else
        corrente_massima_grafico=corrente_massima_grafico+1;
    end
end

passo_corrente=corrente_massima_grafico/dimensione_ordinate;
ordinata_destra=0:passo_corrente:corrente_massima_grafico;

assignin('base','dati',corrente_misurata_massima*1.1);

axes(handles.grafico_transitorio)

[haxes1,hline1,hline2]=plotyy(tempo_misurato,tensione_misurata,tempo_misurato
,corrente_misurata);
axes(haxes1(1))
ylabel('Tensione [V]','FontSize',10)
set(haxes1,{ 'ycolor'},{ 'b';'r'}) %cambio colore assi y
ylim([0 tensione_massima_grafico]) %il limite dell'ordinata sinistra è il 10%
del valore massimo
axes(haxes1(2))
ylabel('Corrente [A]','FontSize',10)
ylim([0 corrente_massima_grafico])

set(hline1,'Color','b','LineWidth',1.5)
set(hline2,'Color','r','LineWidth',1.5)

axes(haxes1(1))
%set(gca,'XTick',ascisse_tempo)
xlim([0 tempo_massimo])
xlabel('Tempo [s]','FontSize',10)
set(gca,'YTick',ordinata_sinistra)
set(gca,'XTick',ascisse_tempo)

axes(haxes1(2))
%set(gca,'XTick',ascisse_tempo)
xlim([0 tempo_massimo])
set(gca,'YTick',ordinata_destra)
set(gca,'XTick',ascisse_tempo)

grid on
%%inizializzo le rette per identificare l'offset e l'inizio e la fine del
%%transitorio
range=[-5e3, -5e3];
retta_inizio=line(range,range);
retta_fine=line(range,range);
retta_offset=line(range,range);

set(handles.inizio_offset,
'string',0.5/100*round(tempo_misurato(end),1,'significant'));

fine_offset=0;
contatore_offset=1;
while fine_offset==0
    if abs(tensione_misurata(contatore_offset)-
tensione_misurata(contatore_offset+1))/tensione_misurata(contatore_offset)<0.5
        contatore_offset=contatore_offset+1;
    else
        fine_offset=1;
    end
end

```

```
    end
end

set(handles.fine_offset, 'string', round(tempo_misurato(contatore_offset-
posizione_sicurezza),2,'significant'));

contatore_transitorio=contatore_offset;

inizio_transitorio=0;
while inizio_transitorio==0
    if abs(corrente_misurata(contatore_transitorio)-
corrente_misurata(contatore_transitorio+1))/...
        corrente_misurata(contatore_transitorio)>1/100
        contatore_transitorio=contatore_transitorio+1;
    else
        inizio_transitorio=1;
    end
end
set(handles.inizio_transitorio, 'string', round(tempo_misurato(contatore_transitor
io+posizione_sicurezza),2,'significant'));

set(handles.fine_transitorio, 'string', round(tempo_misurato(end-
posizione_sicurezza),3,'significant'));

global retta_inizio retta_fine retta_offset corrente_misurata_massima
tempo_misurato corrente_misurata tensione_misurata tensione_misurata_massima
```

APPENDICE C

Istruzioni implementate nel pulsante “*Importa datasheet*”

```
dati_costruttore=fileread('datasheet.txt');

valori=textscan(dati_costruttore,'%s%f%s');
matrice_valori=valori{1,2};

set(handles.potenza_max_STC_da_GUI,'string',matrice_valori(1));
set(handles.Vmp_STC_da_GUI,'string',matrice_valori(2));
set(handles.Imp_STC_da_GUI,'string',matrice_valori(3));
set(handles.Voc_STC_da_GUI,'string',matrice_valori(4));
set(handles.Isc_STC_da_GUI,'string',matrice_valori(5));
set(handles.coefficiente_riduzione_potenza_da_GUI,'string',matrice_valori(6));
if matrice_valori(7)==0
    alpha_relativo=matrice_valori(9)*100/matrice_valori(5);
    set(handles.alpha_relativo_da_GUI,'string',alpha_relativo);
else
    set(handles.alpha_relativo_da_GUI,'string',matrice_valori(7));
end

if matrice_valori(8)==0
    beta_relativo=matrice_valori(10)*100/matrice_valori(4);
    set(handles.beta_relativo_da_GUI,'string',beta_relativo);
else
    set(handles.beta_relativo_da_GUI,'string',matrice_valori(8));
end

if matrice_valori(9)==0 %alpha_da_GUI
    alpha=matrice_valori(7)/100*matrice_valori(5);
    set(handles.alpha_da_GUI,'string',alpha);
else
    set(handles.alpha_da_GUI,'string',matrice_valori(9));
end

if matrice_valori(10)==0 %beta_da_GUI
    beta=matrice_valori(8)/100*matrice_valori(4);
    set(handles.beta_da_GUI,'string',beta);
else
    set(handles.beta_da_GUI,'string',matrice_valori(10));
end

set(handles.larghezza_modulo_da_GUI,'string',matrice_valori(11));
set(handles.lunghezza_modulo_da_GUI,'string',matrice_valori(12));
if matrice_valori(13)==0
else
    set(handles.lato_cellula_da_GUI,'string',matrice_valori(13));
end

set(handles.numero_celle_da_GUI,'string',matrice_valori(14));
set(handles.NOCT_datasheet,'string',matrice_valori(15));
set(handles.moduli_in_serie_da_GUI,'string',matrice_valori(16));
set(handles.stringhe_in_parallelo_da_GUI,'string',matrice_valori(17));
```

APPENDICE D

Istruzioni per il calcolo della V_{OC} sperimentale

```
posizione_iniziale_valutazione_offset=find(tempo_misurato<tempo_iniziale_valutazione_offset,1,'last');

posizione_finale_valutazione_offset=find(tempo_misurato<tempo_finale_valutazione_offset,1,'last');

indice_tempo_iniziale_valutazione_offset=posizione_iniziale_valutazione_offset+1;

indice_tempo_finale_valutazione_offset=posizione_finale_valutazione_offset+1;

offset=mean(corrente_misurata(indice_tempo_iniziale_valutazione_offset:indice_tempo_finale_valutazione_offset)); %valore medio di offset

Voc=mean(tensione_misurata(indice_tempo_iniziale_valutazione_offset:indice_tempo_finale_valutazione_offset));

global tempo_iniziale_valutazione_offset tempo_finale_valutazione_offset Voc
```

APPENDICE E

Principali istruzioni implementate nel pulsante “*Elabora*”

```

function elaborazione_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to elaborazione (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

tensione_max_per_valutazione_Isc=0.3*Voc;
indice_tensione_max_per_valutazione_Isc=find(tensione_pulita-
tensione_max_per_valutazione_Isc<0,1,'last'); %prendo gli indici fino al primo
        valore superiore a tensione_max_per_valutazione_Isc

indice_tensione_min_per_valutazione_Isc=1;
tensioni_valutazione_Isc=tensione_pulita(indice_tensione_min_per_valutazione_Isc
:indice_tensione_max_per_valutazione_Isc); %ricavo il range di tensione
        necessario per valutare la Isc
correnti_valutazione_Isc=corrente_pulita(indice_tensione_min_per_valutazione_Isc
:indice_tensione_max_per_valutazione_Isc); %ricavo il range di corrente
        necessario per valutare la Isc
contatore_valutazione_Rsh=0;

while contatore_valutazione_Rsh==0
    retta_Isc=polyfit(tensioni_valutazione_Isc,correnti_valutazione_Isc, 1);

    Isc=retta_Isc(2);

    Rsh=-1/retta_Isc(1);
    if Rsh>=0
        contatore_valutazione_Rsh=1;
    else

indice_tensione_max_per_valutazione_Isc=indice_tensione_max_per_valutazione_Isc+
10;

indice_tensione_min_per_valutazione_Isc=indice_tensione_min_per_valutazione_Isc+
10;

tensioni_valutazione_Isc=tensione_pulita(indice_tensione_min_per_valutazione_Isc
:indice_tensione_max_per_valutazione_Isc);

correnti_valutazione_Isc=corrente_pulita(indice_tensione_min_per_valutazione_Isc
:indice_tensione_max_per_valutazione_Isc);
    end
end

global Isc Rsh

contatore_inizio_valutazione_Rs=0;
contatoreI=1;
while contatore_inizio_valutazione Rs==0;

```

```
if tensione_pulita(contatore1)>.99*Voc
    contatore_inizio_valutazione_Rs=1;      % if verificato ed esco dal ciclo
else
    contatore1=contatore1+1;
end
end

indice_inizio_Rs=contatore1;      %Primo indice necessario per calcolare Rs

%ricerca ultimo indice per la valutazione di Rs
indice_fine_Rs=size(corrente_pulita,1);

%Valutazione Rs
tensioni_valutazione_Rs=tensione_pulita(indice_inizio_Rs:indice_fine_Rs);

correnti_valutazione_Rs=corrente_pulita(indice_inizio_Rs:indice_fine_Rs);

retta_Rs=polyfit(tensioni_valutazione_Rs,correnti_valutazione_Rs, 1);

Rs=-1/retta_Rs(1);      %resistenza serie di tutti i moduli in serie
global Rs

corrente_corretta_STC=corrente_pulita+Isc*((1000/G_reale)-1)+alpha*(25-
temperatura_cella);

k=0.002;

tensione_corretta_STC=tensione_pulita-Rs*(corrente_corretta_STC-
corrente_pulita)-k*corrente_corretta_STC*(25-temperatura_cella)+beta*(25-
temperatura_cella);
```

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Di Leo, Lezioni di "Progettazione di impianti elettrici" - Politecnico di Torino, A.A. 2016/2017;
- [2] Ciocia, Tesi di Laurea Specialistica - "Sistema fotovoltaico ad alte prestazioni integrato in barriere acustiche", 2012;
- [3] Malgaroli, Tesi di Laurea Specialistica "Testing and experimental results on the performance of photovoltaic modules and grid-connected inverters", 2017
- [4] F. Spertino, J. Ahmad, A. Ciocia, P. Di Leo, A. F. Murtaza, M. Chiaberge, "Capacitor charging method for I-V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems"
- [5] F. Spertino, J. Sumaili, H. Andrei, G. Chicco, "PV Module Parameter Characterization From the Transient Charge of an External Capacitor"
- [6] V. Muñoz Díez, "Obtaining the I-V curve of PV devices" corso di formazione di III livello A.A. 2017-2018, Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Politecnico di Torino
- [7] "Creating Graphical User Interfaces"-MATLAB, 2015
- [8] F. Campagnaro, Tesi di Laurea Magistrale - "Analisi sperimentale di problematiche tipiche in impianti fotovoltaici: mismatch nei moduli e distorsione armonica negli inverter", 2016;

WebSite

- [1] «GESOLAR,» [Online]. Available: www.gesolar-power.com;
- [2] «ELECTROYOU» [Online]. Available: www.electroyou.it;
- [3] «ST INGEGNERIA» [Online]. Available: www.studiotecnicost.it;
- [4] «ICAR» [Online]. Available: www.icar.com;
- [5] «KENDEIL» [Online]. Available: www.kendeil.com;
- [6] «AVX» [Online]. Available: www.avx.com;
- [7] «RS Component» [Online]. Available: it.rs-online.com;
- [8] «GIGAVAC» [Online]. Available: www.gigavac.com;
- [9] «GEOSOLAR» [Online]. Available: www.gesolar-power.com;