



Ricerca di Sistema elettrico

## Realizzazione e implementazione della piattaforma software di progettazione di convertitori SMPPT

G. Adinolfi, R. Ciavarella, G. Graditi, A. Merola, V. Palladino

REALIZZAZIONE E IMPLEMENTAZIONE DELLA PIATTAFORMA SOFTWARE DI PROGETTAZIONE DI  
CONVERTITORI SMPPT

G. Adinolfi, R. Ciavarella, G. Graditi, A. Merola, V. Palladino  
ENEA

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: B.1.2 ricerca su tecnologie fotovoltaiche innovative

Obiettivo: Sviluppo di tool di progettazione e studio di dispositivi attivi innovativi per CONVERTITORI SMPPT

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA



## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE (STILE TITOLO 1).....	5
1.1 BACKGROUND .....	5
1.2 LA PIATTAFORMA DI PROGETTAZIONE “PI.CON-RET” .....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
3 PIATTAFORMA DI PROGETTAZIONE PI.CON-RET .....	8
3.1 SCENARIO FV .....	9
3.2 SCENARIO NZEB.....	9
3.2.1 <i>Strategia di controllo</i> .....	24
3.3 SCENARIO DC.....	26
4 SOLUZIONI TECNOLOGICHE DI COMUNICAZIONE .....	31
4.1 TRASMISSIONE E RICEZIONE DATI MEDIANTE TECNOLOGIE DI TIPO “WIRED” .....	31
4.2 TECNOLOGIE WIRELESS PER LA TRASMISSIONE E RICEZIONE DATI.....	33
4.3 TRASFERIMENTO DATI DEL CONVERTITORE SMPPT MASTER.....	35
5 MANUALE UTENTE DELLA PIATTAFORMA .....	37
6 PICON-RET: ESEMPI APPLICATIVI .....	38
7 CONCLUSIONI.....	40
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	41
9 INDICE DELLE FIGURE .....	42
10 INDICE DELLE TABELLE .....	43

## Sommario

Il presente documento "Realizzazione e implementazione della piattaforma software di progettazione di convertitori SMPPT" descrive le attività di ricerca svolte nell'ambito del PAR 2017 per la "Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio", e, in particolare, del progetto di Ricerca su "Tecnologie Fotovoltaiche Innovative". Esso prevede, al termine del triennio delle attività, la realizzazione di una piattaforma informatica per la progettazione di convertitori Smart Maximum Power Point Converter (SMPPT) da utilizzare in contesti energetici di ultima generazione. Nelle annualità precedenti, le attività di ricerca erano state focalizzate sull'implementazione di un tool di ausilio al progettista di SMPPT.

Negli ultimi anni, la generazione distribuita da fonte rinnovabile ha assunto un ruolo sempre più significativo nel panorama energetico nazionale; infatti, l'applicazione e l'utilizzo delle Tecnologie Fotovoltaiche si collocano in uno scenario più ampio del singolo impianto connesso alla rete elettrica. Nell'ottica di una maggiore prospettiva di impiego è necessario concepire la generazione fotovoltaica come parte integrante di architetture multi-DER che cooperano per il perseguimento di un unico obiettivo energetico/economico. Le Tecnologie Fotovoltaiche, equipaggiate con sistemi "intelligenti" di gestione e controllo dell'energia prodotta, ben si adattano ai nuovi contesti applicativi, quali quelli relativi alla realizzazione di microreti energetiche in presenza di poligenerazione da FER e accumulo energetico.

Nasce, quindi, l'esigenza di supportare il processo di integrazione e gestione ottimizzata della generazione fotovoltaica sia in microreti AC e DC, attraverso lo sviluppo di una piattaforma informatica intesa come una base software e hardware per l'introduzione del sistema "generatore fotovoltaico + SMPPT" (denominato "FV") in microreti di tipo DC ed in contesti di Nearly Zero Energy Building (NZEB).

Nel corso della terza annualità l'attenzione è stata concentrata anche sull'introduzione nella piattaforma di progettazione di dispositivi switching realizzati in carburo di Silicio (SiC) e nitruro di Gallio (GaN). L'analisi di componenti commerciali e dei relativi parametri ha permesso la creazione di appositi database utilizzabili, su richiesta dell'utente progettista, per la selezione dei dispositivi switching da utilizzare a bordo dei convertitori SMPPT.

Sulla base dei risultati forniti dalla piattaforma sviluppata, il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, delle Infrastrutture e dell'Energia Sostenibile dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria ha realizzato tre prototipi di convertitori SMPPT utilizzando, rispettivamente, dispositivi switching con tecnologie differenti, Silicio, SiC e GaN.

A completamento delle attività di ricerca, durante il PAR 2017, sono state, inoltre, studiate alcune soluzioni di comunicazione per la trasmissione e la ricezione di dati tra diversi convertitori SMPPT.

Sono state, in dettaglio, analizzate possibili alternative in termini di standard di comunicazione e piattaforme hardware per lo scambio di informazioni tra convertitori in architetture "SMPPT Master-SMPPT Slave".

A valle dello studio delle possibili soluzioni adottabili, i prototipi SMPPT sono stati dotati di sistema di comunicazione di tipo wireless.

Il presente report è articolato in 6 capitoli.

Nei capitoli 1 e 2 viene proposta una sintesi delle diverse fasi di lavoro della terza annualità di progetto. Nel capitolo 3 sono descritte le fasi operative di progettazione relative ai tre scenari energetici considerati.

Nel capitolo 4 sono presentate le tecnologie e gli standard implementabili a livello di SMPPT per la comunicazione in architetture Master-Slave. Nel capitolo 5 viene presentato il materiale ed il manuale utente a corredo della piattaforma sviluppata. Infine, nel capitolo 6 vengono descritti tre casi studio analizzati ed i relativi risultati.

## 1 Introduzione

### 1.1 Background

La generazione di energia da fonte solare fotovoltaica rappresenta una risorsa fondamentale per il soddisfacimento del fabbisogno energetico di un Paese impegnato nel processo di decarbonizzazione del settore energetico e nel rispetto dei target previsti dal pacchetto “energia-clima”.

Fattori come il crollo dei costi di produzione e vendita e il grado di maturità raggiunto dalle Tecnologie Fotovoltaiche hanno certamente favorito l’ampia e capillare diffusione di tali sistemi.

Attualmente lo scenario è caratterizzato da una “web-produzione” di energia elettrica ad opera dei tanti impianti distribuiti sul territorio del nostro Paese. La maggior parte di essi sono connessi alla rete elettrica nazionale anche se la disponibilità di sistemi di accumulo “agganciabili” alle fonti energetiche variabili sta contribuendo alla nascita di nuovi contesti di “autogenerazione-autoproduzione”

Appare, pertanto, evidente che si passa ad una concezione del fotovoltaico inteso come risorsa “integrata” di un sistema energetico di tipo poligenerativo, dotato di sistemi di accumulo e di logiche evolute di gestione e controllo al fine di assicurare servizi ancillari di rete e garantire, allo stesso tempo, adeguati indici di affidabilità e qualità del servizio erogato all’utente finale.

A favorire l’integrazione delle tecnologie fotovoltaiche nei contesti energetici di ultima generazione contribuiscono anche la digitalizzazione di tali sistemi mediante l’impiego di opportune logiche di controllo e di comunicazione. D’altra parte, la variabilità, caratteristica intrinseca della fonte solare, pone problematiche che devono essere adeguatamente affrontate e gestite nell’ambito dei nuovi paradigmi energetici.

### 1.2 La piattaforma di progettazione “Pi.Con-RET”

Il panorama energetico attuale impone un’azione di “rivisitazione” nella concezione, gestione e controllo del dominio fonte-produzione ai fini dell’attuazione del processo di transizione verso la decarbonizzazione energetica. Si ritiene, quindi, utile lo sviluppo di uno strumento informatico orientato a rendere più “agevole” la progettazione di sistemi FV<sup>+</sup> negli scenari energetici precedentemente descritti, ma anche di contesti in cui la generazione fotovoltaica contribuisce, insieme ad altri fonti energetiche, all’autoproduzione dell’energia elettrica necessaria al soddisfacimento del fabbisogno di energia. La criticità insita in simili contesti consiste nell’individuazione di diversi e complessi sistemi e dispositivi “accoppiabili tra loro”. Numerosi sono, infatti, i componenti disponibili sul mercato, i parametri da valutare e confrontare, le specifiche di progetto da soddisfare e diversi sono anche i livelli prestazionali che tali dispositivi possono garantire.

La piattaforma di progettazione convertitori “Pi.Con-RET” consente di far fronte a tale criticità guidando, passo per passo, il progettista, valutando il livello di adeguatezza dei sistemi utilizzabili e fornendo, all’utente direttamente la Lista Parti Elettriche dei componenti e convertitori necessari per lo scenario di interesse. “Pi.Con-RET” si compone, inoltre, di una sezione dedicata alle strategie di controllo degli scenari energetici considerati per la verifica delle prestazioni ottenibili.

Un’ulteriore sezione della piattaforma è stata predisposta per la fase di collaudo e validazione sperimentale delle modalità di funzionamento dei convertitori SMPPT realizzati e delle relative performance in reali condizioni di funzionamento.

I tre prototipi di convertitori SMPPT realizzati dal Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione, delle Infrastrutture e dell’Energia Sostenibile dell’Università Mediterranea di Reggio Calabria sono dotati di interfaccia di comunicazione di tipo Wi-Fi. “Pi.Con-RET” si avvale della tecnologia montata a bordo dei convertitori e della flessibilità implementativa del tool sviluppato per l’attivazione e disattivazione di

particolari condizioni di funzionamento e la relativa verifica sperimentale delle prestazioni del SMPPT in diverse condizioni di esercizio. Infine, l'interfaccia grafica realizzata per questa specifica sezione di "Pi.Con-RET" consente una rapida visualizzazione dei principali parametri funzionali che sono caratteristici del convertitore.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

A valle della descrizione delle caratteristiche e funzionalità principali della piattaforma “Pi.Con-RET” sviluppata, si procederà con una dettagliata descrizione delle diverse sezioni e sub-sezioni che la compongono con particolare attenzione all’integrazione di sistemi FV<sup>+</sup> nei contesti energetici di interesse. Nel dettaglio, l’attività è stata organizzata in tre fasi, di seguito, brevemente descritte.

*Prima fase:* descrizione dei diversi scenari energetici in cui l’integrazione di sistemi FV<sub>+</sub> opportunamente progettati possa contribuire alla generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio. Mediante un processo passo-passo vengono fornite le linee guida per l’utilizzo della piattaforma descrivendone interfacce, comandi e procedure. Particolare attenzione è stata dedicata anche alla rappresentazione delle soluzioni di progetto e all’elaborazione e produzione della relativa documentazione.

*Seconda fase:* introduzione di dispositivi switching nella piattaforma Pi.Con-RET. In dettaglio, l’utente progettista può indicare la tecnologia (Si, SiC o GaN) da adottare per i dispositivi switching del convertitore SMPPT del sistema FV<sup>+</sup>. Appositi database di componenti switching di tipo MOSFET sono stati realizzati per le tre tecnologie al fine di pervenire alla progettazione di convertitori SMPPT anche basati su nuovi materiali. L’analisi delle prestazioni, così come dei limiti, delle diverse soluzioni ottenibili, mediante l’impiego delle tre diverse tecnologie, rappresenta un interesse della ricerca con significative ricadute in ambito industriale, come verificato con la caratterizzazione sperimentale dei prototipi nelle tre diverse tecnologie, realizzata in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione, delle Infrastrutture e dell’Energia Sostenibile (DIIES) dell’Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria.

*Terza fase:* analisi e studio di soluzioni tecnologiche di comunicazione per la trasmissione e la ricezione di dati tra convertitori SMPPT. L’attenzione è stata, in questa fase, dedicata all’individuazione di una tecnologia idonea al trasferimento dei dati operativi tra convertitori in architetture “SMPPT Master- SMPPT Slave” e alla modalità di interazione tra la piattaforma e i convertitori SMPPT ai fini della trasmissione dei dati operativi.

### 3 Piattaforma di progettazione Pi.Con-RET

La piattaforma di progettazione Pi.Con-RET(Fig.1) è stata sviluppata secondo un approccio grafico di tipo “multi-tab” in grado di guidare, passo-passo, l’utente-progettista dalla fase di definizione delle specifiche all’individuazione delle soluzioni progettuali fino all’elaborazione della relativa documentazione. La presenza di un’interfaccia grafica sviluppata per ogni scenario energetico considerato mediante pulsanti, menu e procedure di verifica dei dati inseriti consente di attivare le diverse routine e subroutine di progettazione.



Figura 1. Interfaccia iniziale piattaforma Pi.Con\_RET-RET

In Fig. 2 viene mostrata l’interfaccia grafica che consente la scelta dello scenario energetico di interesse. Come riportato precedentemente, l’attenzione è concentrata sulla progettazione di sistemi FV<sup>+</sup> da utilizzare in architetture di tipo Master-Slave e in impianti fotovoltaici integrati in architettura, realizzati su pensiline, facciate, superfici disponibili di edifici (nearby surfaces), etc.. La piattaforma consente anche la progettazione di sistemi FV<sup>+</sup> per l’integrazione delle tecnologie fotovoltaiche in impianti fotovoltaici connessi alla rete AC e in contesti energetici più complessi, quali NZEB e micro reti di tipo AC. La piattaforma Pi.Con-RET è stata sviluppata in ambiente MATLAB-MathWorks ed è resa disponibile mediante l’esecuzione di appositi file. Durante l’installazione vengono copiati sul PC file e librerie necessari per l’esecuzione corretta della piattaforma. Al termine del processo d’installazione è disponibile il file eseguibile della piattaforma da mandare in esecuzione per avviare la progettazione.

Nel seguito di questo documento sono esplicitate, nel dettaglio, caratteristiche e funzionalità implementate per ciascuno degli scenari considerati.

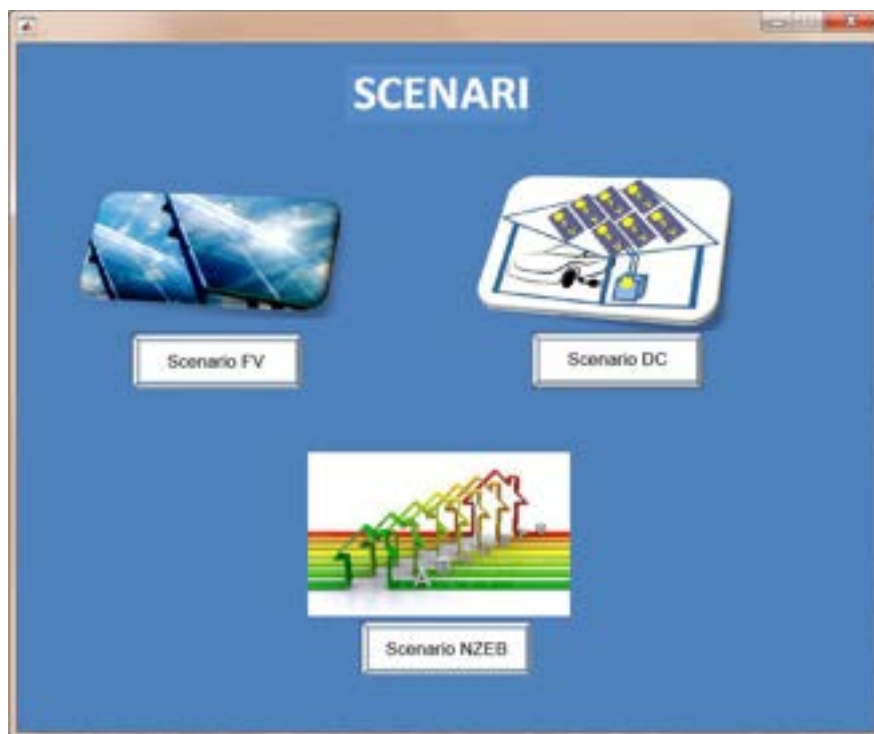


Figura 2. Interfaccia scelta scenari energetici

### 3.1 Scenario FV

La piattaforma Pi.Con-RET dedica la sezione "Scenario FV" alla progettazione di sistemi FV<sup>+</sup>. Nelle annualità precedenti è stato, in dettaglio, sviluppato un apposito tool, denominato "RET"- Reliable Electro-Thermal design- dedicato alla progettazione di sistemi FV<sup>+</sup> in architetture di tipo SMPPT Master-SMPPT Slave.

L'utente- progettista seleziona il generatore fotovoltaico d'interesse in un set di moduli commerciali. Il tool mette a disposizione diversi profili di irraggiamento e di temperatura tra i quali è possibile selezionare le condizioni operative della zona geografica d'installazione dello specifico generatore scelto. A partire da tali informazioni il software effettua la progettazione del convertitore SMPPT con cui equipaggiare il modulo al fine di massimizzare l'energia estratta.

I dettagli di sviluppo, le metodologie adottate e le funzionalità implementate nell'ambito del software sono state descritte dettagliatamente nei documenti relativi al PAR 2105 e al PAR 2016.

### 3.2 Scenario NZEB

La piattaforma Pi.Con-RET dedica una sezione alla progettazione di sistemi FV<sup>+</sup> per l'integrazione delle tecnologie fotovoltaiche in contesti energetici quali impianti fotovoltaici dotati di sistemi di accumulo e connessi alla rete elettrica, NZEB e micro reti di tipo AC.



Figura 3. Interfaccia delle configurazioni dello Scenario AC

I contesti considerati per lo Scenario AC sono mostrati in Fig.3.

In dettaglio, la configurazione di tipo “FC-BESS-AC” guida l’utente nella progettazione di un’architettura caratterizzata dalla presenza di un impianto fotovoltaico connesso in rete e dalla presenza di un sistema di accumulo. L’accurato design dei sistemi e dispositivi di tale configurazione energetica, insieme con l’adozione di un’adeguata strategia di controllo, ben si adatta ad applicazioni in NZEB e micro-reti AC di tipo residenziale.

Lo sviluppo dei programmi e delle sub-routine di questa specifica sezione della piattaforma è stato eseguito nell’ottica di fornire uno strumento di ausilio per la diffusione di tali tipologie applicative. Gli edifici a consumo quasi zero e le micro-reti AC di tipo residenziale rappresentano, infatti, esempi di integrazione delle tecnologie fotovoltaiche nell’ambito dei nuovi contesti energetici e risultano anche i “nodi” basilari da cui partire per favorire approcci orientati allo sviluppo delle reti e microreti energetiche. La piattaforma si propone di contribuire a tale processo fornendo uno strumento per rendere più agevole la fase di individuazione e dimensionamento dei diversi dispositivi e sistemi che caratterizzano le micro-reti residenziali e i NZEB. Disporre di uno strumento per l’attuazione di prassi e metodologie per il conseguimento dei risultati potrebbe determinare una migliore diffusione e applicazione dei paradigmi energetici considerati con una maggiore valorizzazione delle tecnologie fotovoltaiche.

In particolare, i NZEB rappresentano edifici che provvedono autonomamente al loro fabbisogno energetico mediante l’impiego di sistemi performanti basati su fonti rinnovabili, quali fotovoltaico, celle a combustibile, geotermico, etc. A contesti multi-DER di questo tipo è dedicata la sezione “FV-FC-BESS-AC” della piattaforma, che prende in considerazione una configurazione multi-DER con la presenza di generazione fotovoltaica e di cella a combustibile per il “bilanciamento” tra consumo e produzione di energia, anche mediante l’azione di un sistema di accumulo elettrico.

In Fig.4 viene riportata una rappresentazione schematica delle connessioni logiche nel contesto considerato. Uno schema delle diverse fasi che caratterizzano la progettazione dello scenario “FV-FC-BESS-AC” implementato viene, invece, mostrato in Fig.5.

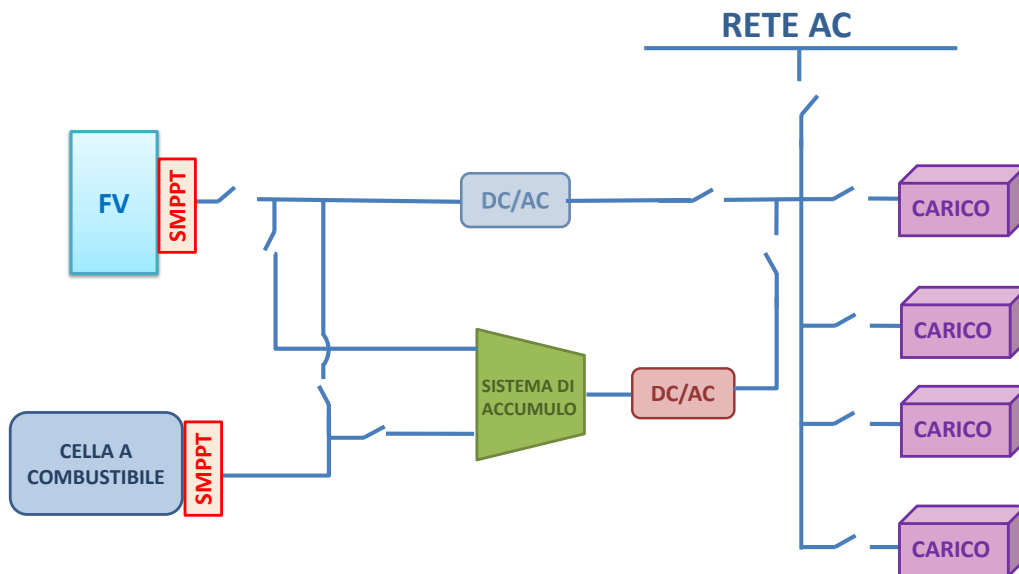


Figura 4. Rappresentazione schematica dello scenario “FV-FC-BESS-AC”

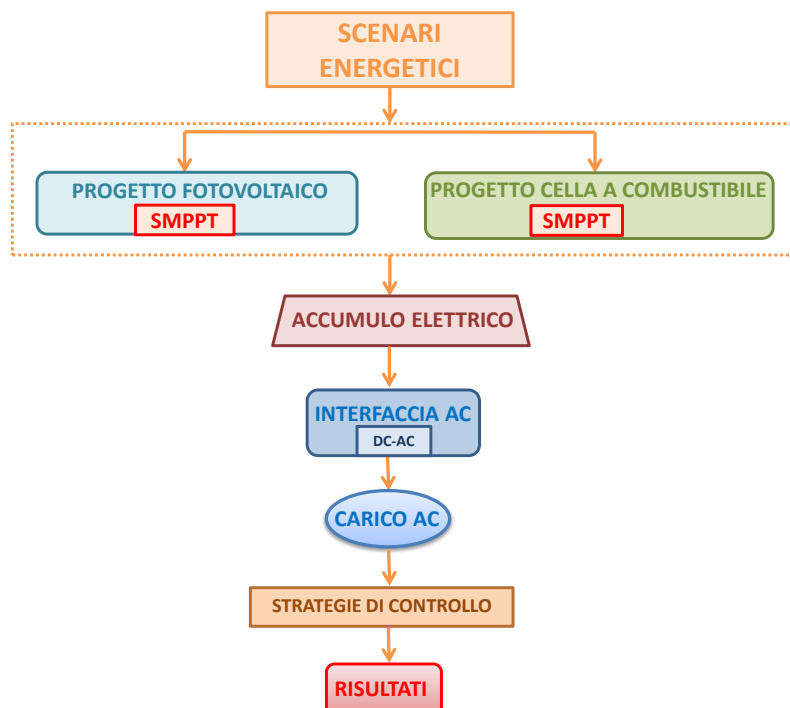


Figura 5. Schema fasi di progettazione dello scenario “FV-FC-BESS-AC”

L’integrazione delle tecnologie fotovoltaiche e la massimizzazione della loro produzione mediante l’utilizzo di SMPPT in contesti di tipo NZEB e micro-reti, anche in presenza di altre DER, richiede un’attenta valutazione di diversi fattori e variabili. A tal scopo, le sezioni “FV-BESS-AC” e “FV-FC-BESS-AC” della piattaforma Pi.Con-RET sono organizzate mediante interfacce multi-tab in cui è possibile selezionare o inserire dati e/o caricare profili, come mostrato nelle seguenti figure.

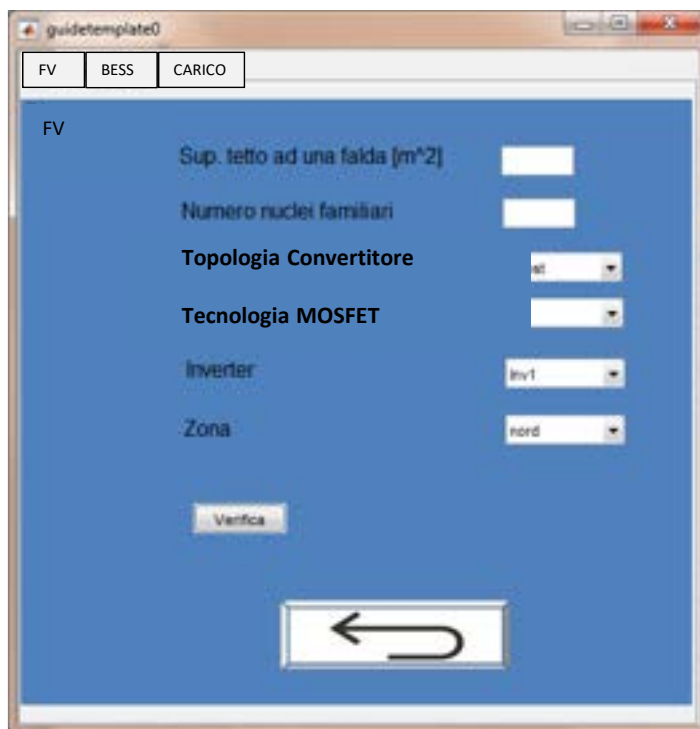


Figura 6. Interfaccia multi-tab della sezione “FV-BESS-AC”

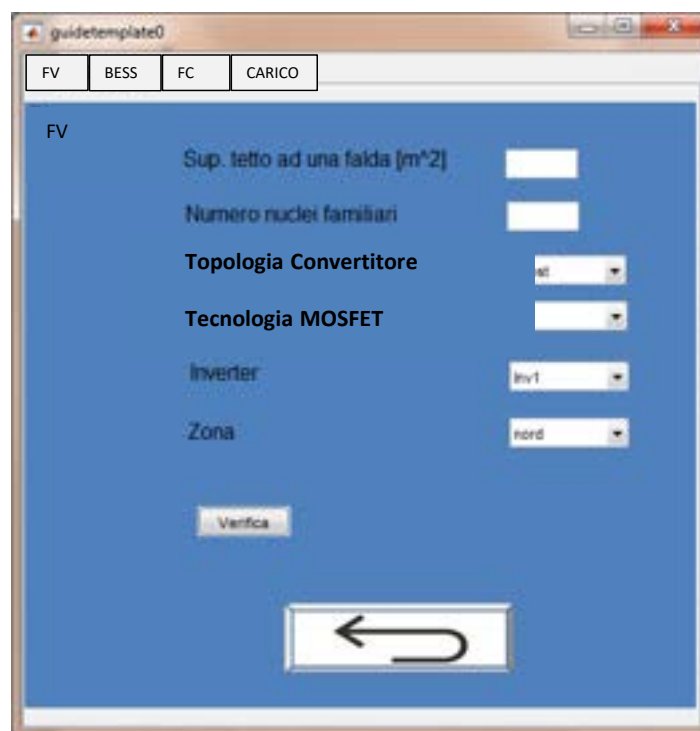


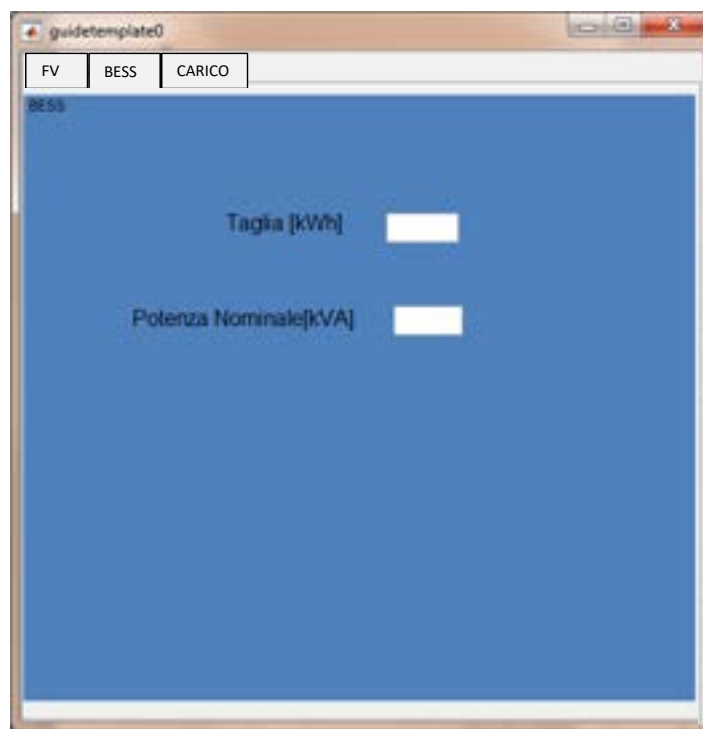
Figura 7. Interfaccia multi-tab della sezione “FV-FC-BESS-AC”

Il design di tali sezioni ha inizio con la scheda dedicata alle tecnologie fotovoltaiche. Si richiede all’utente di indicare la superficie del tetto del NZEB a disposizione per l’installazione dell’impianto fotovoltaico e il numero di nuclei familiari che risiedono nell’edificio.

Mediante appositi menu a tendina il progettista può selezionare la topologia e la tecnologia da adottare per i dispositivi switching del convertitore. In questa interfaccia deve essere selezionato anche il tipo di inverter e la posizione geografica (Nord, Centro, Sud Italia) dell’installazione.

Come riportato in precedenza, sono stati popolati, e introdotti nella piattaforma, database di MOSFET commerciali in SiC e GaN in aggiunta al database di MOSFET in Si, già realizzato nel tool RET.

La procedura continua, poi, con i dati relativi al sistema di accumulo elettrico; dovrà, nello specifico, essere introdotta la taglia e la potenza nominale del sistema di accumulo, come indicato in Fig.8. Nel caso della sezione “FV-FC-BESS-AC” è presente anche il tab FC relativo alla presenza della cella a combustibile. Come mostrato in Fig.9 la potenza nominale della cella a combustibile e la topologia del relativo convertitore SMPPT devono essere selezionati dai menu a tendina. Al fine di progettare un NZEB o una micro-rete residenziale è necessario massimizzare la produzione delle diverse fonti di produzione di energia presenti. Viene, a tal scopo, progettato un SMPPT ad hoc per la cella a combustibile selezionata al fine di riuscire a bilanciare i consumi mediante l’energia prodotta dai sistemi di generazione prescelti.



**Figura 8. Tab dedicato all’accumulo elettrico**

Sia nella sezione “FV-BESS-AC” sia in quella “FV-FC-BESS-AC”, l’ultimo tab è dedicato al caricamento del profilo di carico tipico per l’edificio NZEB o per la micro-rete che si sta considerando (Fig.10).



Figura 9. Tab dedicato alla cella a combustibile

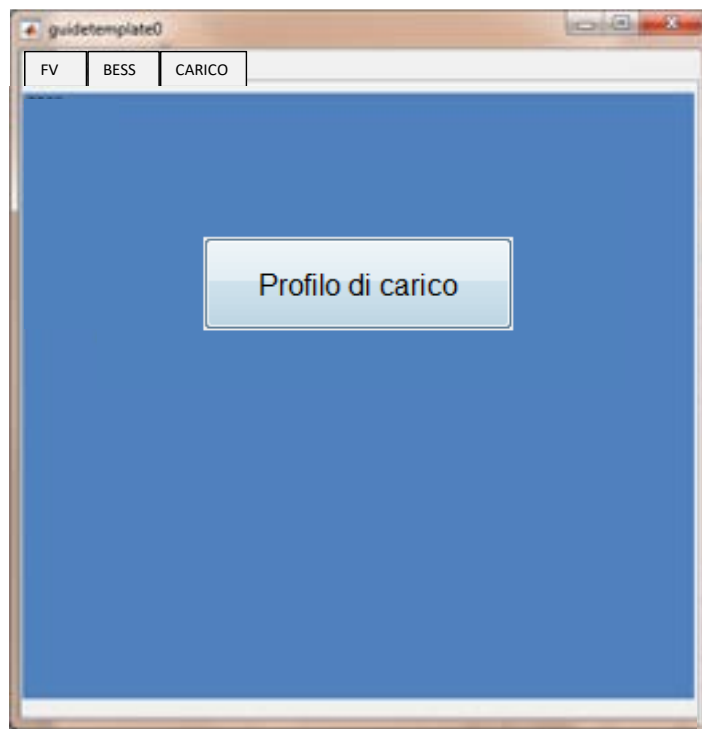


Figura 10. Tab dedicato al profilo di carico

Nella piattaforma risultano precaricati alcuni profili di assorbimento (Fig.11) per utenze di tipo residenziale e viene anche messo a disposizione dell'utente progettista un "file template" per la generazione di un profilo di carico personalizzato.

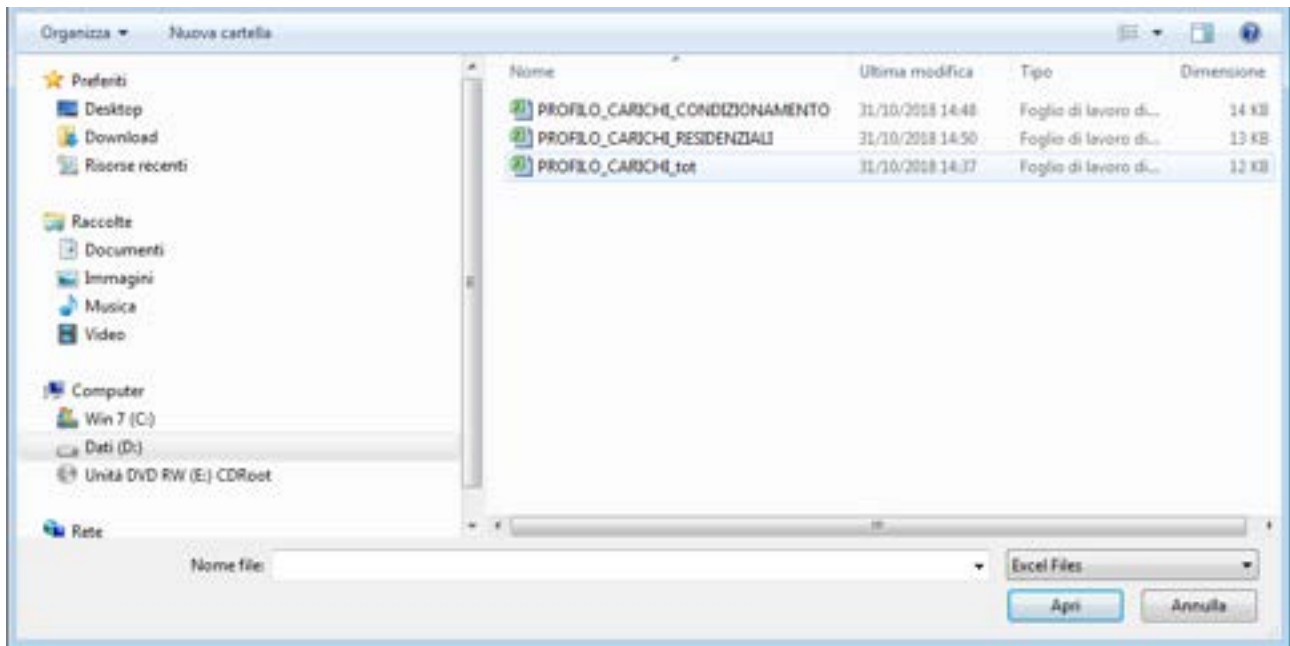


Figura 11. Profili di carico mediante file xls

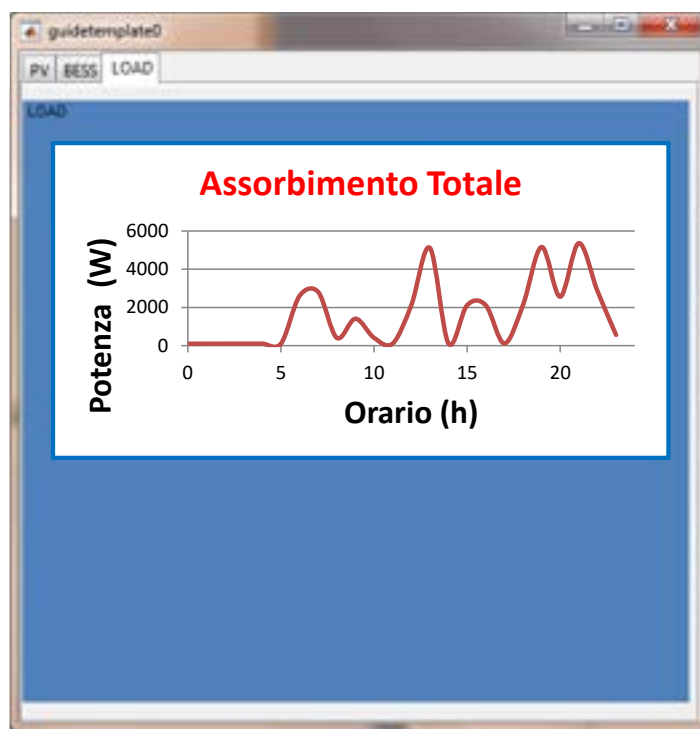


Figura 12. Grafico di un profilo di carico precaricato nella piattaforma

Figura 13. File template per la preparazione di un profilo personalizzato di carico residenziale

A valle dell’inserimento di tutti i dati necessari, il software procede con la verifica della congruità dei valori immessi. In caso di criticità, Pi.Con-RET segnala la presenza di errori mediante pop-up menu a video; in alternativa segnala la correttezza dei dati e procede con le fasi di design relative a ciascun tab. Viene, in primis, focalizzata l’attenzione sulla scheda del sistema FV+. In dettaglio, come riportato in Fig.13 è possibile selezionare la configurazione del generatore fotovoltaico nell’ambito di una lista di moduli commerciali.

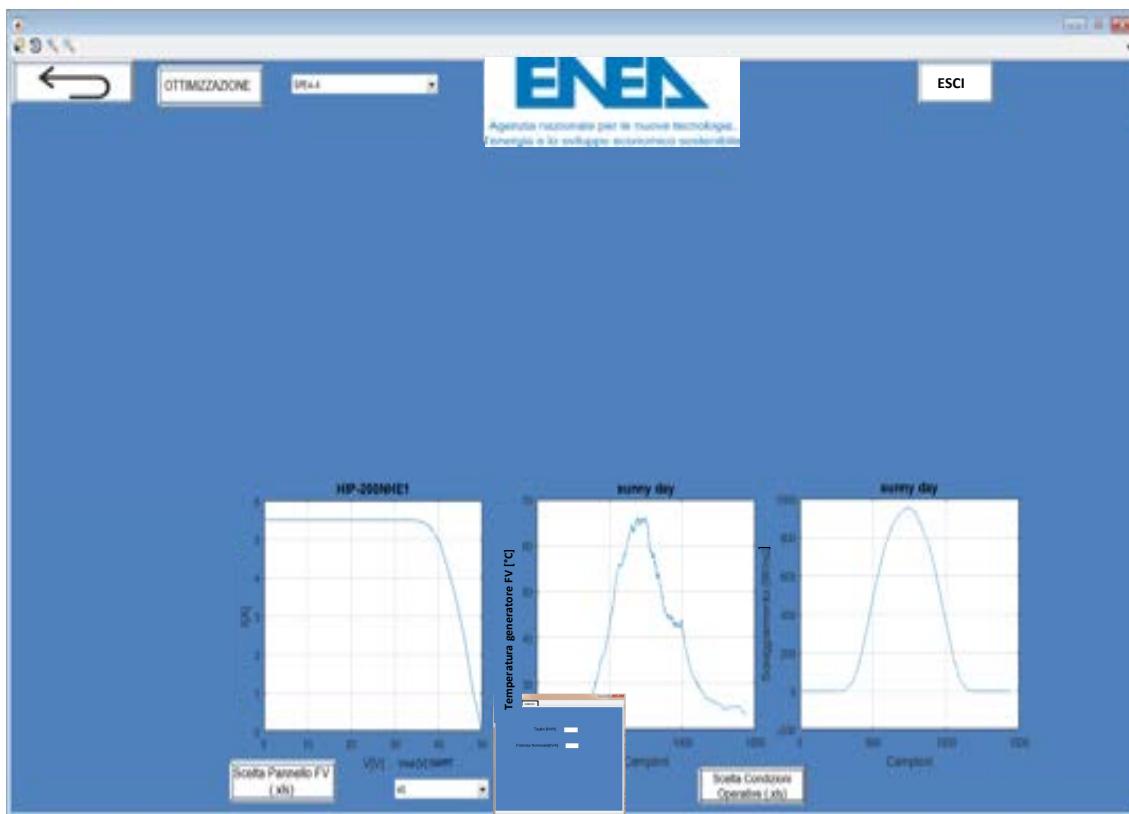


Figura 14. Tab dedicato alla generazione fotovoltaica

Nell’interfaccia grafica viene caricata la caratteristica I-V in condizioni standard del pannello fotovoltaico selezionato. In secondo luogo vengono selezionate le condizioni operative del generatore fotovoltaico in relazione alla zona geografica di installazione scelta precedentemente e vengono visualizzati i relativi grafici “orari” di temperatura e irraggiamento.

In dettaglio, la temperatura considerata è quella sul retro del modulo fotovoltaico. Tale temperatura rappresenta un parametro di progetto significativo, in quanto capace di portare congiuntamente in conto l’effetto della temperatura ambiente e del soleggiamento sui parametri caratteristici del convertitore. Come riportato nel documento relativo al PAR 2015, l’efficienza e l’affidabilità delle soluzioni SMPPT

individuare mediante la piattaforma vengono valutate mediante la formula "ponderata" delle seguenti equazioni.

$$\eta_{SMPPT} = \alpha_1\eta_1 + \alpha_2\eta_2 + \dots + \alpha_N\eta_N \quad (1)$$

$$MTBF_{SMPPT} = \beta_1MTBF_1 + \beta_2MTBF_2 + \dots + \beta_NMTBF_N \quad (2)$$

Dove:

- $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N$  sono i valori di efficienza del convertitore SMPPT calcolati in corrispondenza delle N condizioni operative significative
- i coefficienti  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$  indicano la frequenza con cui ciascuna delle condizioni di funzionamento considerate si verifica in un periodo annuale
- $MTBF_1, MTBF_2, \dots, MTBF_N$  sono i valori di affidabilità del convertitore SMPPT calcolati in corrispondenza delle N condizioni operative significative
- i coefficienti  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$  indicano la frequenza con cui ciascuna delle condizioni di funzionamento considerate si verifica in un periodo annuale.

Lo studio della distribuzione dei valori della temperatura sul retro del generatore fotovoltaico  $T_{retroFV}$  nelle diverse zone geografiche di interesse ha consentito la determinazione dei coefficienti delle equazioni precedentemente riportate.

In Fig. 15 e in Fig. 16 vengono riportati gli istogrammi rappresentativi della distribuzione dei valori di temperatura sul retro del modulo fotovoltaico e irraggiamento misurati e acquisiti rispettivamente a Portici presso il Centro Ricerche ENEA (Sud Italia) e a Cinisello Balsamo (Nord Italia). Analoghe analisi e valutazioni sono state effettuate per il Centro Italia.

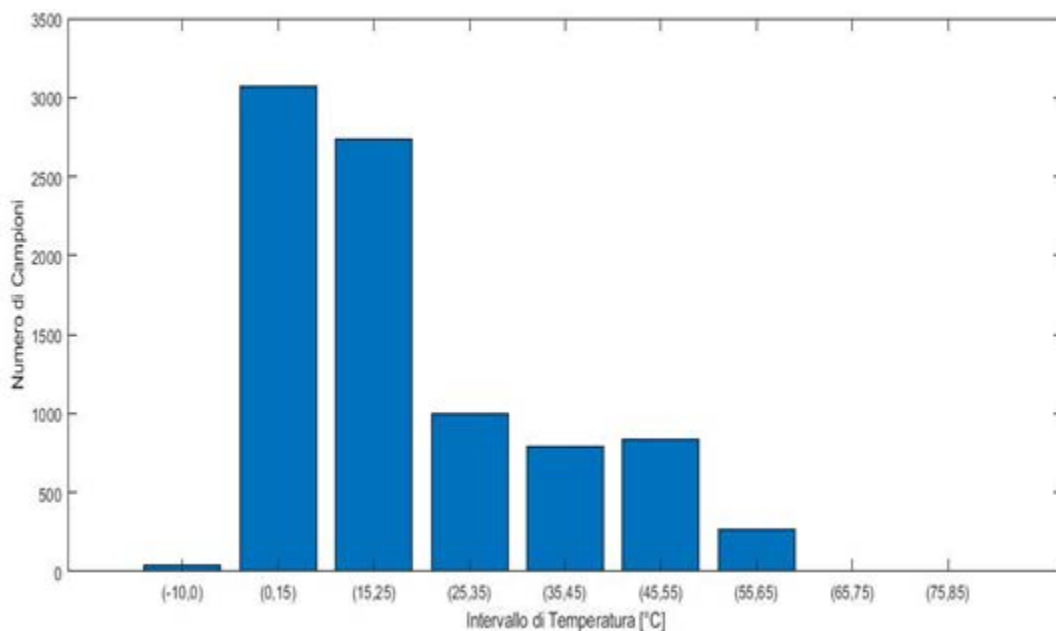


Figura 15. Istogramma dei valori della  $T_{retroFV}$  (Sud Italia)

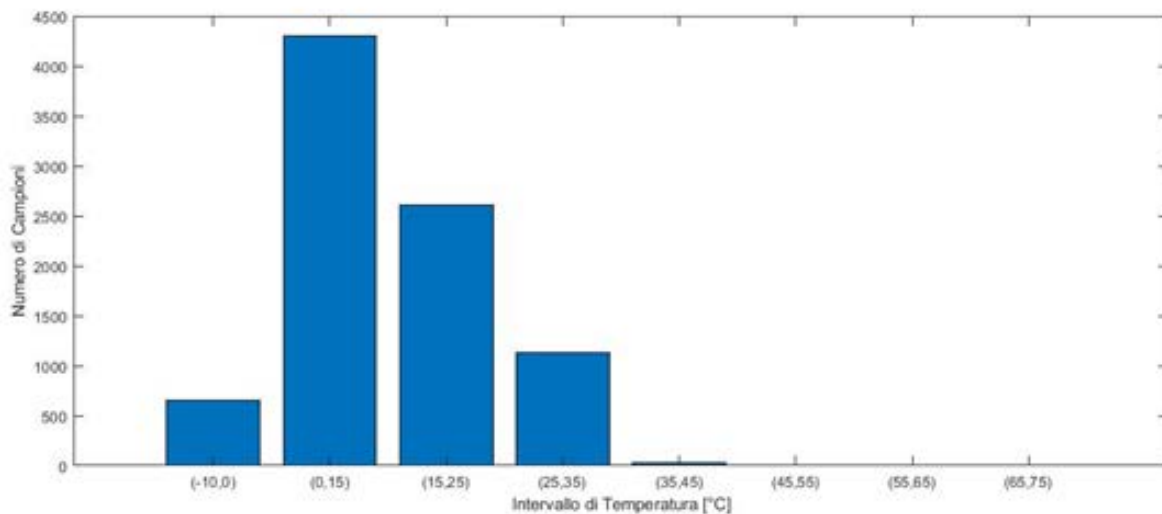


Figura 16. Istogramma dei valori della  $T_{\text{retroFV}}$  (Nord Italia)

Bisogna tener presente che i convertitori SMPPT lavorano in condizioni di stress termico in quanto sono collocati sul retro de generatori fotovoltaici all'interno delle scatole di giunzione. Come riportato, in dettaglio, nella documentazione delle attività di progetto del PAR 2016, lo stress termico incide significativamente sull'affidabilità e sulle prestazioni del convertitore; è necessario, quindi, considerare gli aspetti termici ed i relativi parametri caratteristici nei modelli dei convertitori SMPPT implementati nella piattaforma. Numerose di queste informazioni sono correlate tra di loro e molte altre devono essere accuratamente "accoppiate" per ottenere modelli adeguati dei dispositivi/sistemi di interesse.

In dettaglio, è stata implementata una fase di pre-elaborazione nella quale l'esecuzione di un modello Matlab del generatore fotovoltaico calcola le reali condizioni operative in relazione ai profili di temperatura e di irraggiamento selezionati.

Nello specifico scenario considerato, l'utente inserisce la superficie a disposizione per l'installazione e il numero dei nuclei familiari abitanti nell'edificio per il calcolo del fabbisogno di energia. Noto il modello, le caratteristiche elettriche e le dimensioni del modulo fotovoltaico, il software considera una possibile configurazione d'impianto, nell'ottica di far fronte al fabbisogno delle utenze mediante la generazione fotovoltaica.

Nel caso di superficie del tetto insufficiente, il software chiede all'utente di continuare la progettazione o di optare per la sezione "FV-FC-BESS-AC". In tal caso il fabbisogno energetico dell'edificio viene soddisfatto mediante la cella a combustibile.

Avendo a disposizione tali informazioni il software è in grado di procedere con la progettazione dei convertitori SMPPT secondo la metodologia basata sulla selezione dei generatori commerciali e delle condizioni operative, come descritto dal punto di vista teorico e implementativo nei documenti dei PAR precedenti.

La piattaforma è stata sviluppata in maniera tale che, qualora l'utente decidesse di utilizzare profili operativi diversi da quelli presenti, potrebbe seguire la procedura riportata:

1. Verificare la compatibilità dei profili custom di temperatura e irraggiamento con quelli "orari" accettati dalla piattaforma. In dettaglio, il tool richiede che sia presente, tra i dati iniziali del programma, il profilo orario della temperatura misurabile sul retro del generatore fotovoltaico in relazione a quelli che sono le condizioni di irraggiamento e temperatura. Il software non accetta un dato NULLO in ingresso, i valori di irraggiamento e temperatura pari a zero, devono essere riportati pari a 0.001.
2. Predisporre un apposito file Excel caratterizzato dalla formattazione mostrata in Tab.1.

Tabella 1. Template del file Excel per profili operativi personalizzati

	IRRAGGIAMENTO [W/mq]	T_RETRO_GENERATORE_FV [°C]
1	0.001	24.453
2	0.001	24.006
3	0.001	25.319
4	0.001	24.078
5	0.001	23.358
6	2.432	23.548
7	50.259	25.028
8	193.918	31.748
9	414.292	38.917
10	627.933	51.544
11	797.427	57.835
12	898.736	63.229
13	946.727	65.277
14	934.255	58.856
15	835.741	53.325
16	703.674	44.686
17	495.164	42.862
18	286.010	37.748
19	95.968	31.117
20	10.337	27.930
21	0.001	25.979
22	0.001	25.132
23	0.001	24.709
24	0.001	25.019

3. Come accennato in precedenza, i dati relativi alla temperatura misurabile sul retro del generatore fotovoltaico, qualora disponibili all'utente, devono essere inseriti nella seconda colonna del file Excel. In alternativa, l'utente può calcolare tali valori a partire dai dati di temperatura ambiente mediante il modello elaborato dal Sandia National Laboratories [1] e la formula riportata nell'Eq.2.

$$T_{retro\_FV} = T_{amb} - \frac{G}{G_0} \Delta T \quad (3)$$

dove:

$T_{retro\_FV}$  = temperatura sul retro del generatore fotovoltaico in °C

$T_a$  = temperatura ambiente in °C

$G$  = irraggiamento sul modulo in  $W/m^2$

$G_0$  = irraggiamento di riferimento pari a  $1000 W/m^2$

$\Delta T$  è un parametro che dipende dal tipo di generatore fotovoltaico, come riportato nella seguente tabella.

**Tabella 2. Valori del parametro  $\Delta T$**

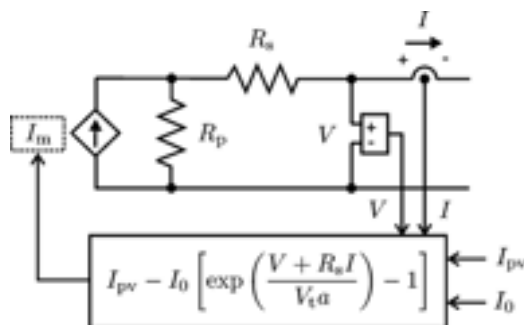
Tipo	$\Delta T$ (°C)
Vetro/cella FV /vetro	2
Vetro/cella FV /Tedlar	3

4. A valle della predisposizione del file, il profilo desiderato deve essere salvato nella cartella "Condizioni\_operative" il cui percorso risulta il seguente: ".....\C:\Pi.Con-RET\Profili\Condizioni\_operative".

In questo modo, la piattaforma potrà caricare e utilizzare il profilo desiderato per lo scenario di interesse.

La flessibilità, che caratterizza Pi.Con-RET, consente anche di caricare i dati e le caratteristiche di un modulo fotovoltaico diverso da quelli presenti nella piattaforma. In particolare, l'utente avanzato dovrebbe attuare la specifica procedura di seguito riportata.

Tale procedura necessita della conoscenza di parametri e curve caratteristiche in Standard Test Conditions (STC) presenti nel datasheet del generatore fotovoltaico fornito dal costruttore, ma anche di parametri calcolati in condizioni operative non standard. Durante la prima fase vengono estrapolati dati e curve da introdurre nel modello Simulink del generatore fotovoltaico. L'approccio base considerato è quello presentato in [2] da Marcelo Gradella Villalva et alii e riportato in Fig.17. Tale modello è stato reso disponibile mediante script Matlab-Simulink che sono stati modificati per l'inserimento di una specifica condizione operativa in termini di temperatura ambiente e irraggiamento.



**Figura 17. Modello base Simulink adottato per il generatore FV [2]**

Sono, state, inoltre, introdotte le opportune procedure per la valutazione della temperatura misurabile sul retro del generatore fotovoltaico, dato cruciale per la valutazione del comportamento elettro-termico del convertitore SMPPT. La validazione del modello ottenuto viene effettuata digitalizzando la caratteristica I-V fornita dal costruttore nel datasheet in Standard Test Condition con quella elaborata dal modello Simulink del generatore fotovoltaico di interesse. A valle della fase di validazione del modello, lo Script viene usato per calcolare i valori di tensione e corrente nel Punto di Massima Potenza per le condizioni operative selezionate e/o caricate dall'utente.

In questo modo l'utente otterrà i dati rappresentativi del comportamento del generatore fotovoltaico di interesse, nella condizione di funzionamento considerata. Tali dati devono essere inseriti in un apposito file Excel. La formattazione di tale file viene riportata in Tab.3.

**Tabella 3. Template del file Excel per un generatore fotovoltaico personalizzato**

	<b>Vmp [V]</b>	<b>Imp [I]</b>
1	0.00	9.41
2	0.59	9.41
3	1.13	9.41
4	2.64	9.41
5	3.81	9.41
6	4.56	9.41
7	5.32	9.41
8	6.03	9.41
9	7.87	9.41
10	9.04	9.41
11	10.09	9.41
12	13.65	9.41
13	15.49	9.41
14	19.05	9.41
15	20.56	9.41
16	24.12	9.41
17	26.76	9.41
18	29.94	9.24
19	31.57	8.90
20	32.83	8.55
21	33.83	8.02
22	34.46	7.56
23	35.38	6.64
24	35.92	5.91

La scheda dedicata alla generazione fotovoltaica restituisce, mediante un'apposita interfaccia, informazioni sulle possibili soluzioni adottabili per il convertitore SMPPT. Dati e specifiche del relativo contesto energetico sono, invece, riportati nella documentazione di progetto generabile dalla suddetta interfaccia. In particolare, il tool RET integrato nella piattaforma consente di individuare un set di possibili soluzioni progettuali adottabile per il convertitore. La famiglia di soluzioni totali viene analizzata al fine di "estrapolare" dal set le soluzioni dominanti, ossia quelle che rappresentano un buon compromesso in termini di efficienza-affidabilità e costo. Come riportato, in precedenza, tali soluzioni di progetto sono ottenute mediante l'applicazione congiunta di un algoritmo di tipo evolutivo, quale lo "Strength Pareto Evolutionary Algorithm-II", e di un algoritmo di progettazione. La rappresentazione delle soluzioni FV+ per lo scenario considerato riprende quella del tool RET (Fig. 18), sia per la presenza dei grafici tridimensionali e bidimensionali delle soluzioni ottenute, sia per la forma tabellare in cui vengono riportati i parametri e i fattori di merito delle soluzioni dominanti. In Fig.18 vengono mostrate le soluzioni SMPPT fornite dal tool per il caso studio rappresentato da una configurazione "FV-BESS" asservita ad un NZEB. Tale edificio è collocato nel Sud Italia, ha un tetto di superficie pari a 60 m<sup>2</sup>. Le prestazioni delle soluzioni ottenute sono state valutate a partire dal comportamento del generatore fotovoltaico selezionato e alle caratteristiche del sito d'installazione. Tali dati iniziali hanno permesso al tool l'esecuzione di modelli elettro-termici sviluppati per l'individuazione e il calcolo di parametri accurati del convertitore SMPPT e per la successiva valutazione delle prestazioni. A valle dell'individuazione delle soluzioni dominate e dominanti di progetto, l'utente può

selezionare la soluzione SMPPT dominante che meglio risponde ai requisiti tecnici e/o economici di progetto (Fig. 18).

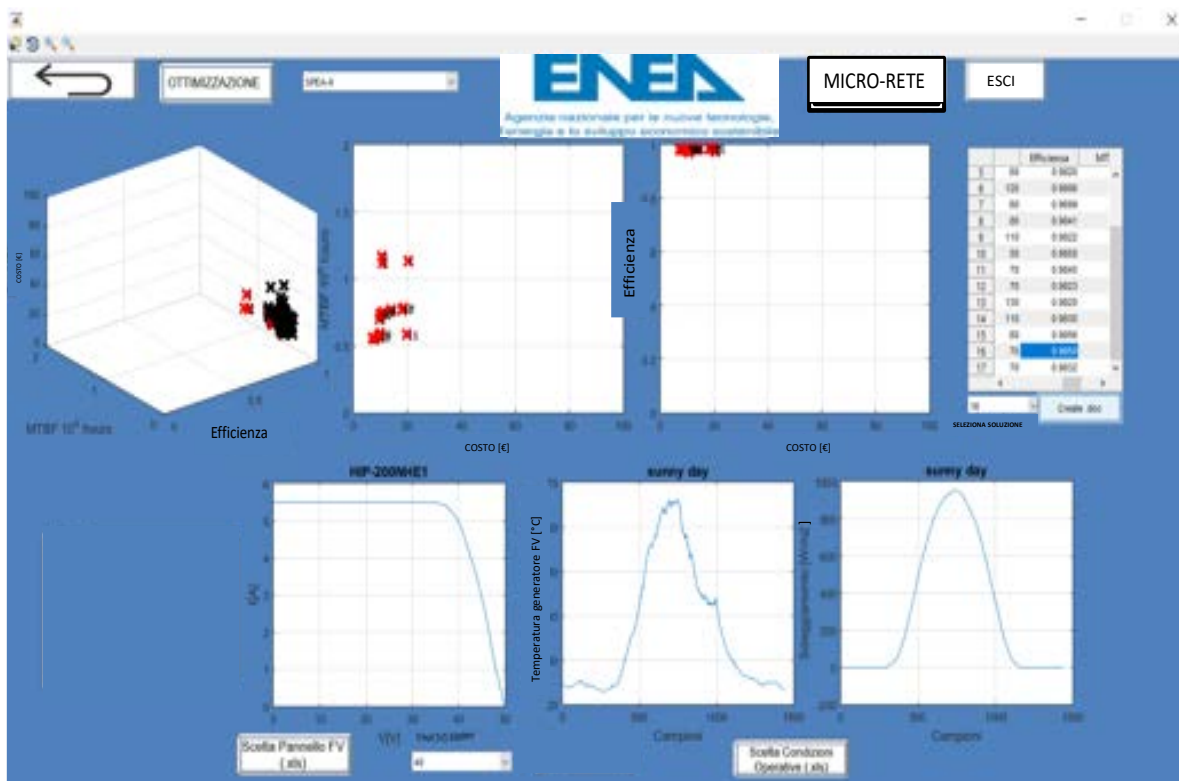


Figura 18. Rappresentazione grafica delle soluzioni FV\*

Nel momento in cui il progettista opta per una delle possibili soluzioni ha la possibilità di generare un report comprensivo dei dati sia del sistema FV+ sia dell’impianto e del contesto considerato, come mostrato in Fig. 19.

SCENARIO ENERGETICO					
Sup. Sella [m <sup>2</sup> ]	Sup. area inna disponibile [m <sup>2</sup> ]	Nome. Moduli familiari	Topologia Converter	Tecnologia Inverter	
60		3	Buck	SI	
Inverter	Zona	Taglia Barre Ia [V/m]	Potenza nominale FC [kW]	Topologia Converter FC	
Inv1	sud	3			

CONVERTER							
Soluzione SMPPT		Efficienza (%)	MTBF [10 <sup>3</sup> h]	Costo [Euro]			
Profilo_3	sunny day	0,961219147	0,748528633	11,09			
Profilo_1	sunny day						
Generatore FV	HP-2009HE1						
Vout[V]	40						
Isolatore[Vdc]	MSLA						
Z1	PCV-2-225-DE						
C <sub>in</sub> [µF]	MSLA Gls	C <sub>in</sub> [µF]	Tipo	PACK/MOUNT	tempe_in 6,800	C serie	C parallelo
E2	UPM2(A628AP0)		ELETTROLITO	TH		0	0
C <sub>out</sub> [µF]	MSLA Covt	C <sub>out</sub> [µF]	Tipo	PACK/MOUNT	tempe_out 6,800	C serie	C
890	ETUFC1000		ELETTROLITO	TH		1	1
Q1	Rds	Qg					
SRM20P	6,00E7	34,5					
Q2	Rds	Qg					
34H20EY	6,0E3	35					
Q3	NO						
Q4	NO						
C <sub>out</sub> [µF]	110						

Figura 19. Documentazione di progetto per la Scheda FV dello scenario “FV-BESS”

In maniera analoga documenti simili vengono generati anche per le sezioni del software dedicate alle configurazioni degli scenari “FV-BESS” e “FV-FC-BESS”. A valle della progettazione dei convertitori SMPPT dello scenario di interesse, la piattaforma procede con la sezione dedicata all’individuazione della strategia di controllo da adottare.

3.2.1 Strategia di controllo

Nel caso di micro-rete AC l'obiettivo del controllo consiste nella minimizzazione dell'assorbimento di energia della rete mediante l'attuazione di strategie opportune a seconda delle condizioni operative selezionate. In particolare, al termine del processo di progettazione dei diversi sottosistemi della micro-rete viene reso disponibile il pulsante "MICRO-RETE", mediante il quale è possibile avviare un algoritmo che minimizza la potenza scambiata tra la micro-rete - la cui configurazione e i profili di assorbimento dipendono dalle specifiche selezionate dal progettista - e la rete esterna. L'algoritmo tiene conto delle seguenti scelte operate dal progettista:

- Taglia della batteria
- Potenza nominale
- Profilo di carico

Il diagramma di flusso dell'algoritmo di controllo implementato è riportato in Fig. 20 dove:

- $P_n$  è la potenza nominale della Batteria
- $P_{max}$  è la potenza massima erogata che, nei 60 minuti, non scarica totalmente l'accumulo
- $P_{min}$  è la potenza minima assorbita che, nei 60 minuti, non carica totalmente il BESS
- $P_{FV}$  è la potenza dell'impianto fotovoltaico

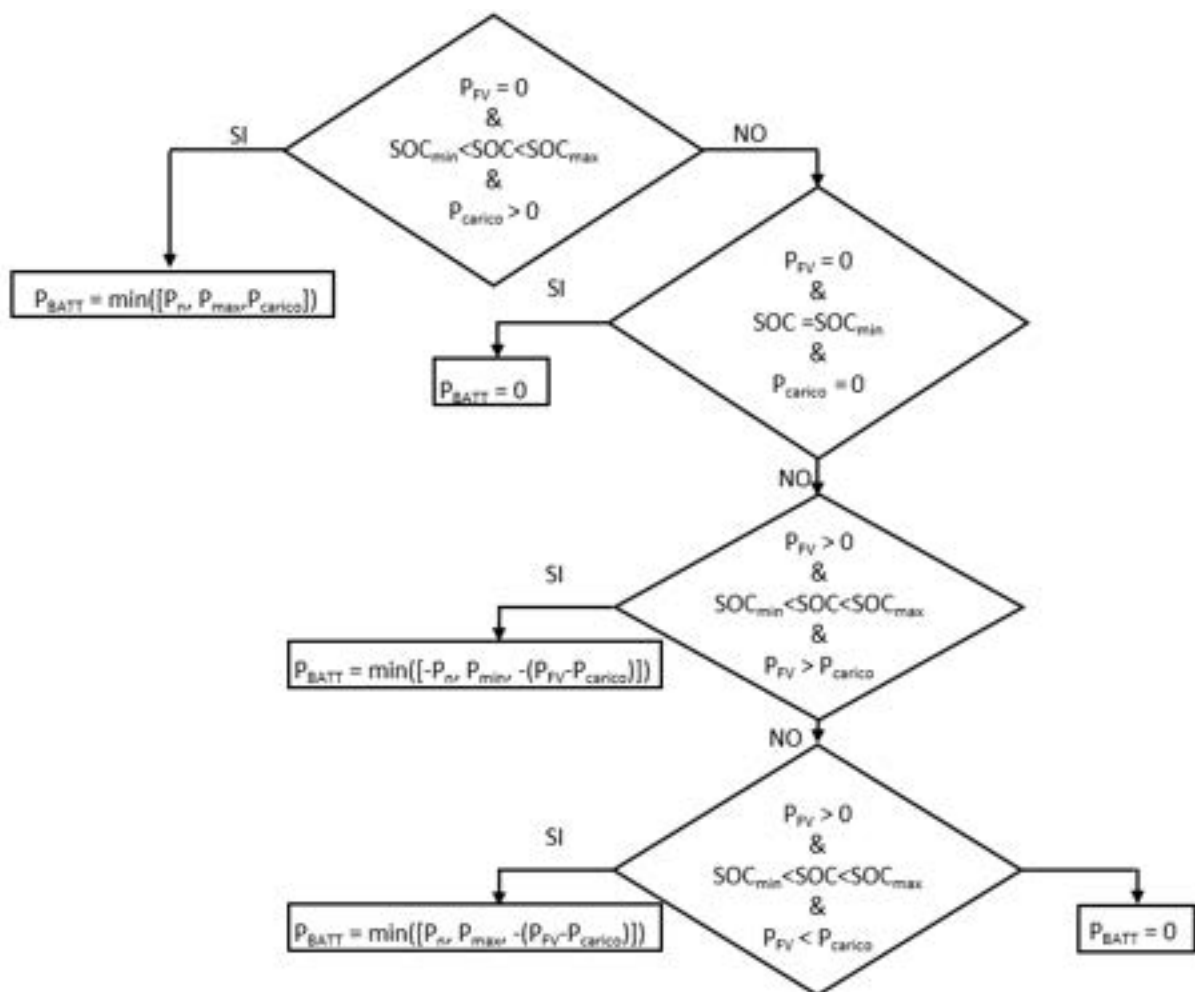


Figura 20. Strategia di controllo implementata

Di default vengono impostati dall'algoritmo un rendimento di scarica e carica pari al 90%, un valore di SOC massimo pari al 90% e un SOC minimo del 20%. Nelle seguenti figure vengono riportati i risultati ottenuti nel caso studio considerato.

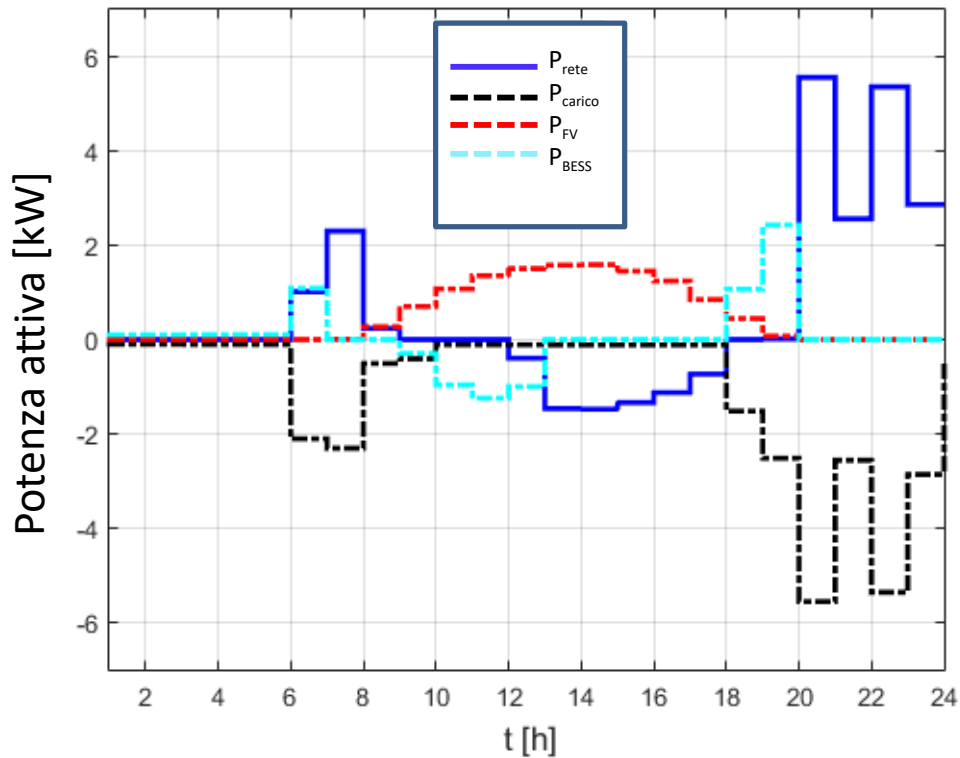


Figura 21. Grafico della strategia di controllo per la configurazione "FV-BESS"

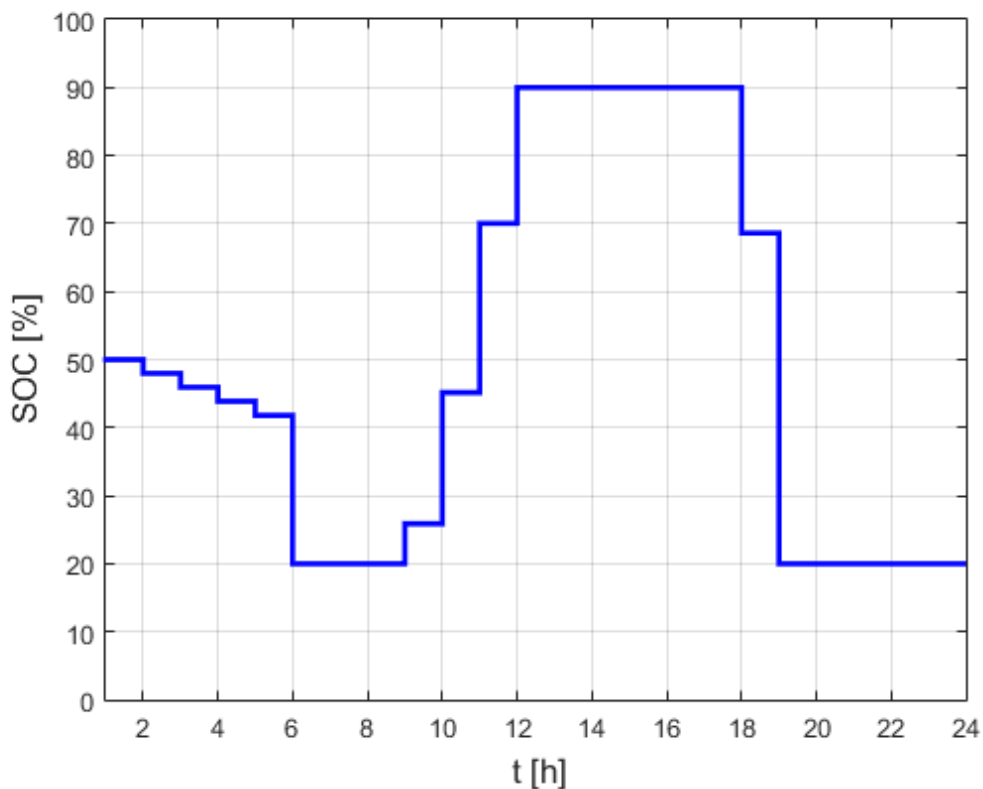


Figura 22. SOC sistema di accumulo nella configurazione "FV-BESS"

### 3.3 Scenario DC

Nel caso in cui l'utente voglia progettare sistemi FV<sup>+</sup> per la generazione da fonte rinnovabile fotovoltaica sfruttando le superfici di pensiline, facciate e ulteriori aree a disposizione (nearby surface) ed intenda utilizzare l'energia prodotta per l'alimentazione di carichi di tipo DC o per sistemi di accumulo elettrico deve selezionare lo scenario DC.

La scelta dei dispositivi, il metodo progettuale e le strategie di controllo sono, in tal caso, mirati alla realizzazione di una micro-rete di tipo DC. L'interfaccia si presenta, in questo caso, come riportato in Fig.23. E' stato implementato il software e le relative interfacce grafiche per una configurazione di tipo "FV-BESS-CARICO". Si comincia, quindi, dalla progettazione relativa alla generazione fotovoltaica. L'interfaccia utente, mostrata in Fig. 23, consente di inserire il numero di metri quadri di superficie utilizzabili in riferimento ad aree libere e disponibili, pensiline o facciate. Il progettista può selezionare la topologia di convertitore adottabile, la tecnologia switching utilizzabile e deve anche indicare l'area geografica in cui sarà collocato l'impianto fotovoltaico di interesse.



Figura 23. Interfaccia Scenario DC: generazione fotovoltaica

L'utente deve, poi, fornire informazioni relative alla taglia della batteria e la sua potenza nominale, come riportato in Fig. 24.

E' necessario, infine, caricare il profilo di carico desiderato (Fig.25). La piattaforma consente di selezionare il profilo di assorbimento di carichi residenziali DC tipici oppure di introdurre uno "customizzato" mediante un file Excel. In Fig. 26 viene mostrato il file "template" per la generazione di un profilo di carico DC personalizzato. I carichi DC considerati spaziano dalla batteria di veicoli elettrici (auto e biciclette) a quelle dei dispositivi elettronici portatili di ultima generazione (cellulari, tablet, etc). A questi bisogna aggiungere gli assorbimenti legati a robot per la pulizia e accessori per la cura della persona, nonché la ricarica di batterie per l'alimentazione di giocattoli.

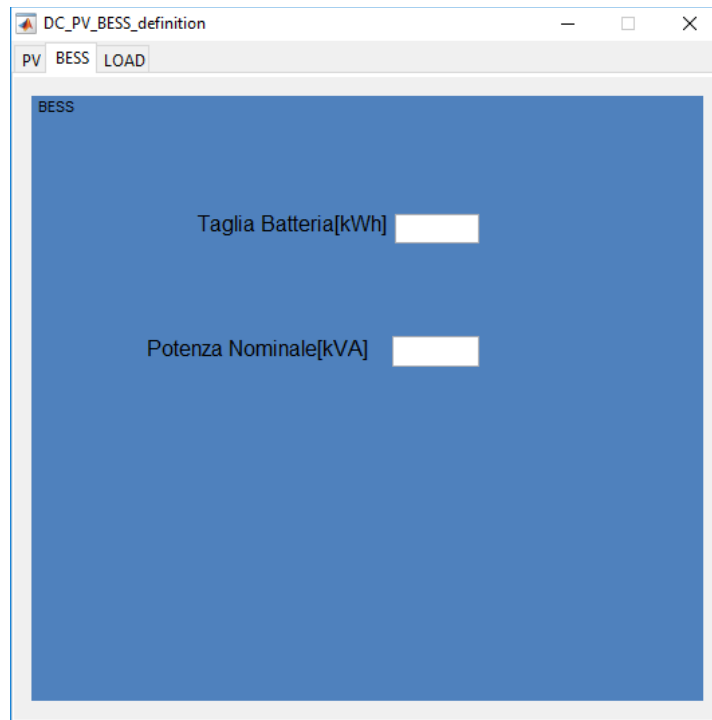


Figura 24. Interfaccia scenario DC: sistema di accumulo

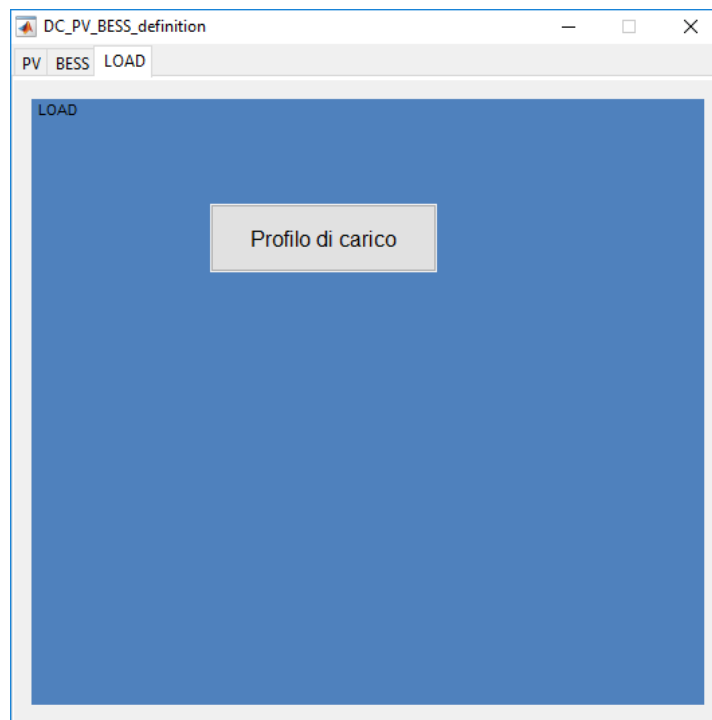


Figura 25. Interfaccia scenario DC: profilo di assorbimento DC

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	
1	ORA	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23			
2	EVC																											
3	BICI ELETTRICA																											
4	CELLULARI																											
5	CORDLESS																											
6	ROBOT PULIZIA																											
7	ACCESSORI PULIZIA PERSONALE																											
8	LUCI EMERGENZA																											
9	PC PORTATILI																											
10	TABLET																											
11	BATTERIE RICARICABILI X GIOCATTOLE																											
12																												
13																												
14																												
15																												
16																												
17	TOT ASSORBIMENTO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23			

Figura 26. File template per la personalizzazione dei profili di carico DC

In riferimento allo scenario di tipo DC si è pensato di sfruttare la generazione DC da fonte solare fotovoltaica per alimentare carichi di tipo DC mediante un bus DC (Fig. 27) e con l’ausilio di un sistema di accumulo.

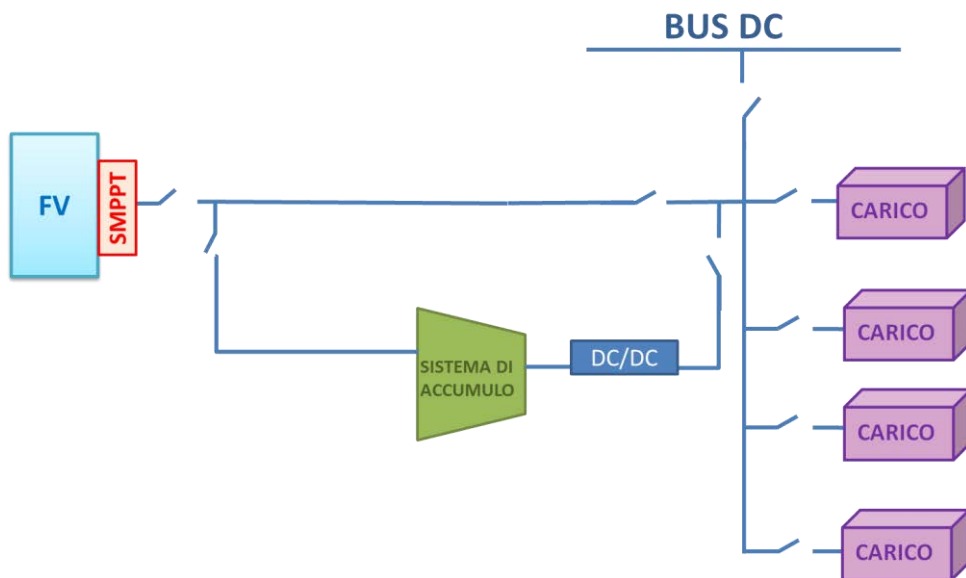


Figura 27. Scenario DC considerato

E’ bene sottolineare che il software effettua una verifica dei dati inseriti, prima di procedere con le fasi successive di progettazione e controllo.

Nel caso in cui la verifica non avesse esito positivo, l’utente sarebbe allertato mediante un’opportuna schermata (Fig. 28). In caso di esito positivo, come mostrato in Fig. 29; l’interfaccia si correda con il pulsante “opt” che consente l’esecuzione delle fasi successive della procedura.

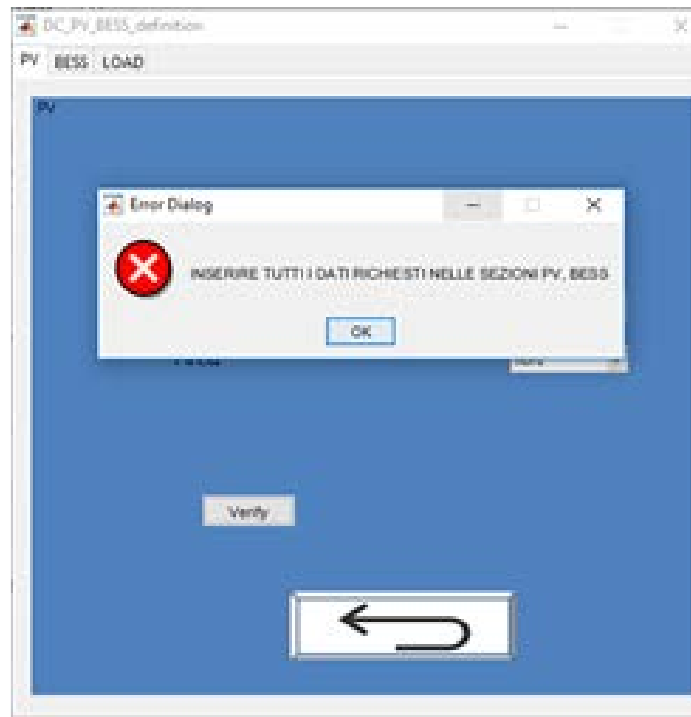


Figura 28. Verifica dati: esito negativo



Figura 29. Interfaccia di avvio della progettazione

A questo punto, come visto per lo scenario AC, il software guida l'utente nella progettazione dell'installazione fotovoltaica permettendo la scelta dei generatori e delle specifiche per il design del convertitore SMPPT da adottare. Il software esegue, quindi, la procedura riportata precedentemente per i sistemi FV<sup>+</sup> fino all'individuazione delle possibili soluzioni SMPPT di progetto. A valle della scelta del progettista della soluzione più idonea alla specifica applicazione tra tutte quelle individuate, la piattaforma è in grado di generare la relativa documentazione di progetto. Nel caso in cui l'utente, volontariamente o

involontariamente, chiudesse l'interfaccia senza alcuna selezione, il software segnalerebbe la mancata generazione del report contenente dati e informazioni relative allo scenario, al design ottenuto e alla Lista Parti Elettriche del convertitore scelto.

## 4 Soluzioni tecnologiche di comunicazione

I sistemi FV<sup>+</sup> concepiti, inizialmente, come dispositivi per l'inseguimento del Maximum Power Point (MPP) di generatori fotovoltaici stanno diventando, nell'ambito dei nuovi scenari energetici, "nodi" energetici, ma anche informativi. La diffusione della generazione distribuita e la capillare distribuzione sul territorio dei sistemi fotovoltaici ha senza dubbio contribuito a "rivisitare e ampliare" il ruolo richiesto ai sistemi FV<sup>+</sup> nel contesto dei sistemi energetici; in particolare è sempre più di maggiore interesse la possibilità del loro utilizzo anche come strumenti per la trasmissione e condivisione di misure e informazioni utili all'attuazione di logiche ottimizzate per la loro gestione. L'applicazione di tecnologie e protocolli che possano permettere lo scambio di dati tra convertitori SMPPT collocati a diverso livello gerarchico in architetture di tipo Master-Slave appare una soluzione promettente, non solo ai fini delle funzioni di diagnostica del singolo sistema FV<sup>+</sup> e dell'impianto nel suo complesso, ma anche ai fini dell'integrazione delle tecnologie fotovoltaiche in contesti energetici di tipo AC, DC o in NZEB e microgrid.

Ciascun SMPPT Slave può comunicare i dati relativi alle principali grandezze operative e può ricevere eventuali direttive da un "dispositivo SMPPT Master". Compito del convertitore SMPPT "Master" è, invece, quello di ricevere i dati provenienti dai diversi Slave, di elaborarli al fine dell'attuazione di procedure. Il convertitore SMPPT Master rappresenta, nei nuovi contesti energetici, il "nodo" di comunicazione da e verso dispositivi e sistemi di tipo "Smart Meter", collocati a livello gerarchico superiore.

Tali convertitori devono, quindi, essere dotati di apposite interfacce per la trasmissione di dati. L'individuazione delle tecnologie e dei protocolli di comunicazione più adeguati per tali applicazioni richiede attenzione; infatti, differenti sono le soluzioni a disposizione, ciascuna delle quali presenta determinate caratteristiche in termini di velocità, distanza, affidabilità, flessibilità, sicurezza dei dati e costo.

Bisogna, prima di tutto, concentrare l'attenzione sul tipo di mezzo fisico per la propagazione dei dati e delle informazioni.

Nel caso di trasmissione e ricezione dati di tipo "wired", la rete viene costruita mediante la posa di cavi elettrici tra i vari dispositivi interessati, mentre, per le reti wireless, la comunicazione avviene tramite le onde elettromagnetiche tra antenne disposte ad una certa distanza una dall'altra. Di seguito verranno analizzate e confrontate le varie tipologie di collegamento con i relativi protocolli.

### 4.1 Trasmissione e ricezione dati mediante tecnologie di tipo "wired"

La trasmissione di dati mediante cavi elettrici avviene mediante protocolli Ethernet o Power Line Communication (PLC). Il protocollo Ethernet è alla base delle reti informatiche di tipo Local Area Network (LAN). Questa tipologia di infrastruttura è in grado di connettere diversi dispositivi posti a una distanza nel raggio di un 1 km con velocità di trasmissione dai 10Mbit/s fino ai 10Gbit/s.

Dall'interconnessione di diverse reti LAN si ottiene una rete di tipo metropolitano o MAN (Metropolitan Area Network), in questo caso il mezzo trasmissivo può essere di diverso tipo e i punti di commutazione tra le reti sono collegati tramite dispositivi denominati "router". Essi veicolano i dati trasmessi in un'area geografica di estensione compresa tra i 10 e 100 km. L'insieme delle reti MAN costituisce una rete WAN (Wide Area Network), che copre aree dai 100 km fino a qualche migliaia di km. Gli svantaggi legati all'utilizzo della rete Ethernet riguardano, in primis, gli investimenti onerosi per il cablaggio della rete stessa. La connessione di nuovi dispositivi e l'individuazione dei guasti lungo la rete cablata, rappresentano anch'essi degli aspetti negativi. La latenza su rete dei pacchetti inviati crea, inoltre, un limite all'utilizzo della rete Ethernet, poiché non vi è un approccio di tipo deterministico per stabilire il tempo di arrivo dei pacchetti dati.

La trasmissione dei dati tramite il protocollo Ethernet può avvenire anche con un collegamento in fibra ottica, tramite la propagazione guidata della radiazione luminosa lungo le fibre vetrose (guide d'onda dielettriche). La diffusione degli impulsi può avvenire con la modalità monomodale o la multimodale, a seconda se la direzione di propagazione sia unica oppure esistono più modi di trasmissione. Nelle

telecomunicazioni, attualmente si sta diffondendo capillarmente l'utilizzo della fibra. La velocità raggiungibile attraverso l'impiego di una fibra multimodale varia dai 100Mbit/s fino ad un massimo di 100Gbit/s. Le perdite di segnale trasmesso e la conseguente limitazione della banda passante sono dovute principalmente a due fenomeni: l'attenuazione lungo la fibra e la dispersione di tipo modale e dovuta al materiale. Lo svantaggio di questo mezzo di propagazione è data principalmente al costo d'installazione e di manutenzione della rete in fibra. Per quanto riguarda l'utilizzo della tecnologia PLC, la linea preesistente adibita al trasporto dell'energia tra i dispositivi coinvolti viene adoperata anche come linea trasmissiva per le informazioni dati, lasciando invariata la tecnologia degli strati superiori. Il segnale dati viene trasmesso ad una frequenza maggiore rispetto a quella designata al collegamento elettrico; grazie ad un'operazione di filtraggio in frequenza, i due segnali non vengono sovrapposti.

Attualmente sono disponibili diversi protocolli di comunicazione tramite tecnologia PLC. Essi sono suddivisi in base alle frequenze utilizzate. Per la connessione a banda larga (BroadBand, BB), ci sono:

- IEEE 1901;
- HomePlug AV (con una velocità di 200-500 Mbit/s), HomePlug Green PHY (bit rate 10 Mbit/s);
- HomePlug 1.0 (con una velocità di 15 e 85 Mbit/s);
- UPA (Universal Powerline Association) (con una velocità di 200-500 Mbit/s).

Queste tipologie operano nel range di frequenze tra i 2-30 MHz, con un bit-rate fino a 200Mbit/s e si basano su una modulazione di tipo Orthogonal Frequency-Division Multiplexing-Fast Fourier Transform/Wavelet Transform (OFDM-FFT/WT).

Per il range di frequenze a banda stretta (NarrowBand-NB) i protocolli ratificati sono due: lo IEEE 1901.2 e la direttiva ITU-T G.9901 a 9904. Nello specifico, lo standard IEEE 1901.2 comprende:

- G3-PLC (basato su modulazione OFDM, con banda pari a 10-490 kHz e bit-rate di 33,4 kbps) nella banda 10-500 kHz;
- G3-PLC nella banda CENELEC-A (9-95 kHz);
- PRIME (Powerline Related Intelligent Metering Evolution) nella banda CENELEC-A.

## 4.2 Tecnologie wireless per la trasmissione e ricezione dati

Nell'ambito delle reti wireless vi sono varie metodologie di comunicazione; in particolare, le tecnologie più diffuse, nel mercato delle telecomunicazioni a distanza limitata, sono definite dai seguenti standard:

1. IEEE 802.11 a/b/g/n/ac (Wireless Fidelity);
  2. IEEE 802.15.1 (Bluetooth);
  3. IEEE 802.15.3 (Ultra Wide Band);
  4. IEEE 802.15.4 (ZigBee);
  5. EN13757-4 (Wireless M-Bus);
  6. Z-Wave.
- 1) Nel dettaglio, le comunicazioni di tipo Wi-Fi si suddividono nelle seguenti classi:
- a: velocità di trasmissione pari a 54 Mb/s (5 GHz);
  - b: velocità di trasmissione pari a 11 Mb/s (2,4 GHz);
  - g: velocità di trasmissione pari a 54 Mb/s (2,4 GHz);
  - n: velocità di trasmissione pari a 450 Mb/s (2,4 GHz e 5 GHz);
  - ac: velocità di trasmissione pari a 3 Gb/s (5 GHz).

Il protocollo IEEE 802.11 viene utilizzato all'interno delle reti Wireless Local Area Network (WLAN) e connette, attraverso degli Access Point (AP), gli utenti ad una velocità tipica delle BroadBand. L'architettura di base è organizzata come segue: il Basic Service Set (BSS) rappresenta la cella base dello standard, se una stazione migra all'esterno della sua cella base, interrompe la comunicazione diretta con le altre stazioni della BSS. Gli Extended Service Set (ESS) sono il risultato dell'unione di una o più BSS per ottenere una copertura d'area maggiore. L'utente sarà in grado di "navigare" in modo trasparente da una cella all'altra, senza alcuna interruzione del segnale radio. All'interno delle Independent Basic Service Set (IBSS), le stazioni radio possono comunicare tra di loro senza l'ausilio di un AP. La trasmissione dati, tramite la tecnologia Wi-Fi, avviene con il metodo di accesso Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), con quest'algoritmo di accesso multiplo, i dispositivi comunicano in base ad un meccanismo di ascolto delle trasmissioni ed evitano la collisione dei pacchetti dati. Per quanto concerne la sicurezza della trasmissione dati, lo standard IEEE 802.11 adopera un meccanismo di crittografia del tipo 32-bit CRC (Cyclic Redundancy Check), oltre ad essere caratterizzato da un meccanismo di autenticazione utente, del tipo Wired Equivalent Privacy (WEP).

2) Lo standard Bluetooth trova largo impiego nelle connessioni a distanza limitata e a basso consumo energetico. In questo ambito la rete realizzata è del tipo Wireless Personal Area Network (WPAN), con due connessioni possibili: piconet o scatternet. In caso di piconet, la comunicazione viene gestita tramite il meccanismo Master e Slave, dove il Master stabilisce la priorità nella comunicazione. Il numero massimo di dispositivi è pari a 8, di cui uno funge da Master e gli altri da Slave. In questo caso, tutte le informazioni e i dati vengono trasmessi al Master che, a sua volta, le inoltra ai destinatari. Quando uno Slave non viene coinvolto nella trasmissione dati, imposta lo stato di stand-by, con un conseguente risparmio energetico. Una rete scatternet è costituita dall'insieme di diverse reti piconet i cui Master dialogano tra di loro. Un dispositivo Bluetooth può, in questo caso, fungere da Slave in più connessioni piconet e le informazioni possono fluire attraverso un'area maggiore.

3) La connessione Ultra Wide Band (UWB) realizza, nell'ambito delle connessioni a breve distanza, un collegamento con una velocità fino a 480 Mbit/s. Essa viene preferita per la trasmissione di segnali con un elevato grado di qualità, quali video o immagini ad alta risoluzione. Per realizzare una rete UWB vengono impiegate antenne omnidirezionali o dispositivi con un angolo di copertura radio molto esteso. Il meccanismo di modulazione del segnale adottato è il MultiBand-Orthogonal Frequency Division

Multiplexing (MB-OFDM), grazie al quale il flusso dati viene scomposto in N flussi, che vengono inviati al nodo destinatario in parallelo.

4) Il protocollo IEEE 802.15.4, denominato ZigBee, viene utilizzato all'interno della Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN). È uno standard che riguarda il livello fisico e il livello MAC (Media Access Control) del modello ISO-OSI; a causa della ridotta velocità questo protocollo non si presta alla trasmissione di dati multimediali con un contenuto di elevata qualità, quali ad esempio il tipo dati "voce e immagini", poiché il bit rate teorico risulta pari a soli 250kbit/s. Per questa tipologia di comunicazioni possono essere adoperati due dispositivi: l'FFD (Full Function Device) e l'RFD (Reduced-Function Device); dove l'FFD è in grado di comunicare sia con gli RFD sia con altri FFD, mentre un dispositivo RFD può comunicare soltanto con un FFD.

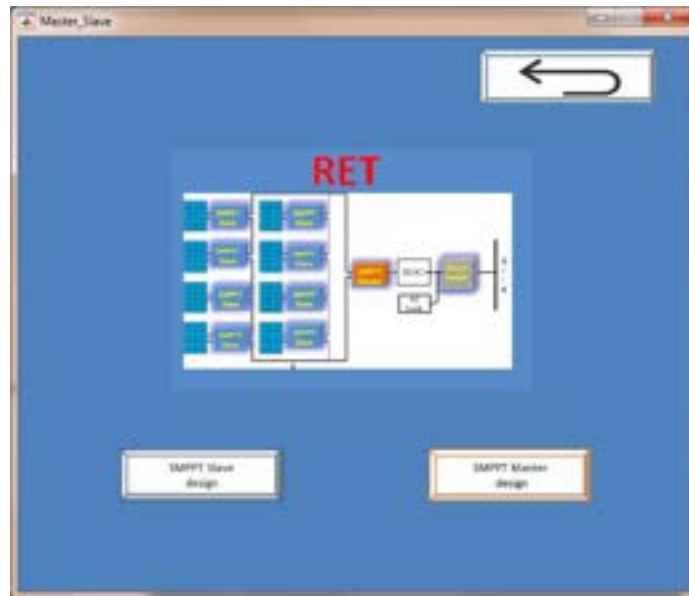
Gli RFD vengono impiegati nell'ambito di applicazioni che non richiedono il trasferimento di una grande quantità di dati, quali ad esempio sensori ad infrarossi passivi, per tale motivo non richiedono un dispendio energetico oneroso. I dispositivi FFD sono, invece, responsabili del coordinamento dei dispositivi e della sincronizzazione dati all'interno delle reti PAN.

5) Il protocollo Wireless M-Bus (estensione dello standard M-Bus, utilizzato per le comunicazioni Wired) ha raggiunto un notevole sviluppo nell'ambito delle reti intelligenti. L'utilizzo principale riguarda, infatti, la raccolta dei dati provenienti dai contatori "intelligenti", per offrire un servizio di monitoraggio e comunicazione soprattutto in zone difficilmente raggiungibili dalla rete. Al fine di garantire un buon raggio di copertura, la frequenza prescelta è pari a 169MHz. Occorre prestare attenzione nella disposizione dei concentratori di dati, per assicurare una perdita di propagazione minima.

6) Il protocollo Z-wave è caratterizzato da una frequenza operativa pari a circa 869,85 MHz, con un bit-rate di 100Kps; la banda di frequenza stabilita evita le interferenze con i segnali Bluetooth e Wi-Fi. La configurazione della rete rientra nella topologia a maglia, con una condivisione dati del tipo Master e Slave. Nel dettaglio, un nodo funge da controllore e si occupa dell'indirizzamento dei dati e del calcolo dei percorsi per l'instradamento dei pacchetti, provenienti dai nodi Slave.

### 4.3 Trasferimento dati del convertitore SMPPT MASTER

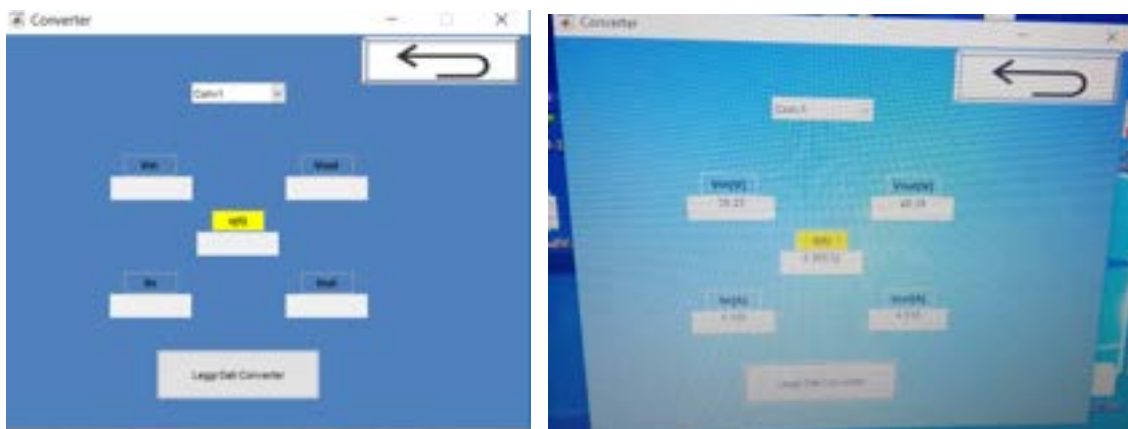
In riferimento allo sviluppo del sistema di comunicazione, l'architettura considerata è caratterizzata da convertitori SMPPT Master e SMPPT Slave (Fig.30).



**Figura 30. Architettura SMPPT Master-SMPPT Slave**

L'obiettivo è di dotare il convertitore SMPPT di capacità di comunicazione e scambio dati sia con convertitori collocati allo stesso livello gerarchico, sia con convertitori a più alto livello.

A valle dello studio dei principali standard per la comunicazione di tipo wireless applicabili, si è deciso di dotare i prototipi SMPPT, realizzati dal Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, delle Infrastrutture e dell'Energia Sostenibile (DIIES) dell'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, di interfacce di comunicazione di tipo Wi-Fi. Tali tecnologie risultano adeguate all'applicazione nei contesti energetici di interesse per le loro caratteristiche di flessibilità e versatilità, anche in caso di ampliamento degli impianti. In dettaglio, la piattaforma è dotata di un'apposita sezione per la ricezione di messaggi di tipo JSON dal prototipo di convertitore. Tale interfaccia consente il monitoraggio delle principali grandezze in ingresso e uscita al convertitore SMPPT, come mostrato in Fig. 31 e Fig.32.



**Figura 31. Sezione dedicata alla trasmissione dati dal convertitore SMPPT alla piattaforma Pi.Con-RET**

In dettaglio, in Fig.32 viene mostrato uno dei prototipi realizzati durante l'esecuzione dei test di caratterizzazione. La sezione della piattaforma dedicata al trasferimento dei dati dal convertitore SMPPT

consente una rapida visualizzazione dei dati operativi e dell'eventuale presenza di anomalie di funzionamento.



Figura 32. Caratterizzazione sperimentale del prototipo di convertitore SMPPT con MOSFET in Si

## 5 Manuale utente della piattaforma

La piattaforma “Pi.Con-RET” viene fornita mediante un file eseguibile. La procedura di installazione prevede a caricare sul PC i file, i database ed i modelli necessari per il funzionamento del software.

Vengono copiati, inoltre, sul computer i file “template” per la personalizzazione dei profili operativi e di carico, per l’introduzione di nuovi generatori fotovoltaici e multi-DER, nonché per l’inserimento di nuovi dispositivi elettronici commerciali nei relativi database.

La piattaforma “Pi.Con-RET” è corredata da un manuale utente esplicativo delle modalità di funzionamento, di utilizzo e personalizzazione del software fornito.

La struttura della piattaforma è stata progettata in sviluppata in modo da garantire la massima flessibilità e possibilità di ampliamenti ulteriori.

## 6 PiCon-RET: esempi applicativi

In questa ultima parte del documento vengono riportati i risultati ottenuti, mediante l'utilizzo della piattaforma, per la progettazione di sistemi FV<sup>+</sup>.

L'attenzione è stata focalizzata sull'utilizzo, nei tre casi studiati, dei tre materiali (Si, SiC e GaN) per i dispositivi switching del convertitore SMPPT.

In dettaglio, si è proceduto in modo da ottenere il design di un convertitore Full-Bridge con cui equipaggiare un modulo fotovoltaico commerciale da 200W per la realizzazione di un impianto fotovoltaico su tetto di 30m<sup>2</sup> in una zona geografica del Sud Italia.

Nelle seguenti figure, sono riportati i risultati ottenuti.

E' possibile osservare che i tre tipi di dispositivi selezionati garantiscono prestazioni diverse.

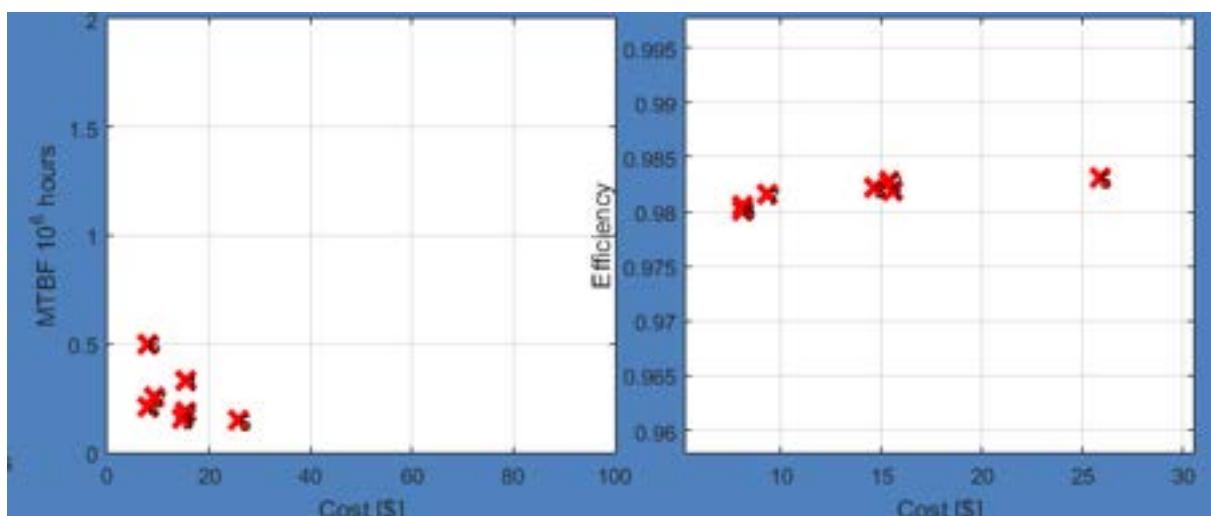


Figura 33. SMPPT con dispositivi in Si

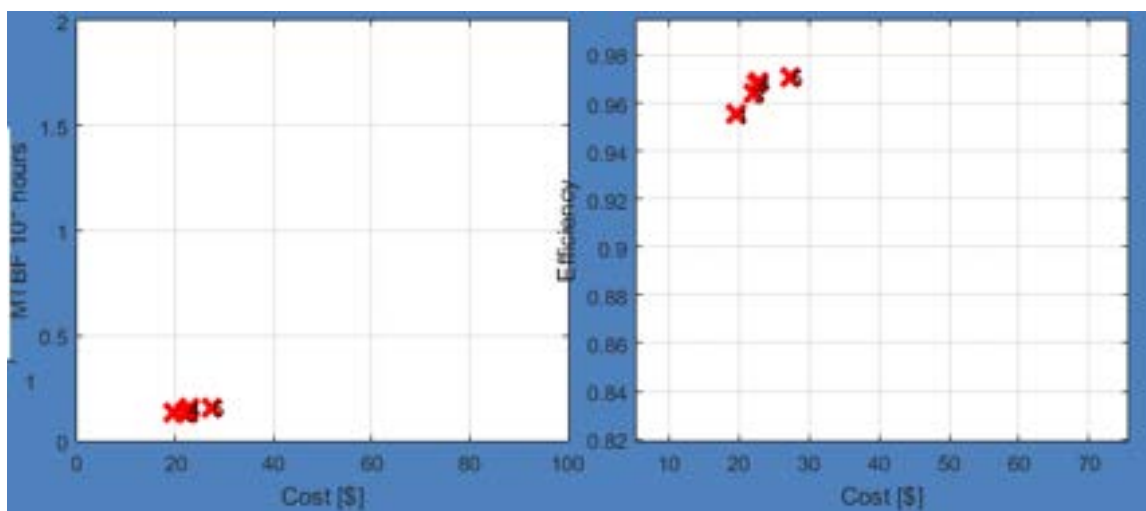


Figura 34. SMPPT con dispositivi in SiC

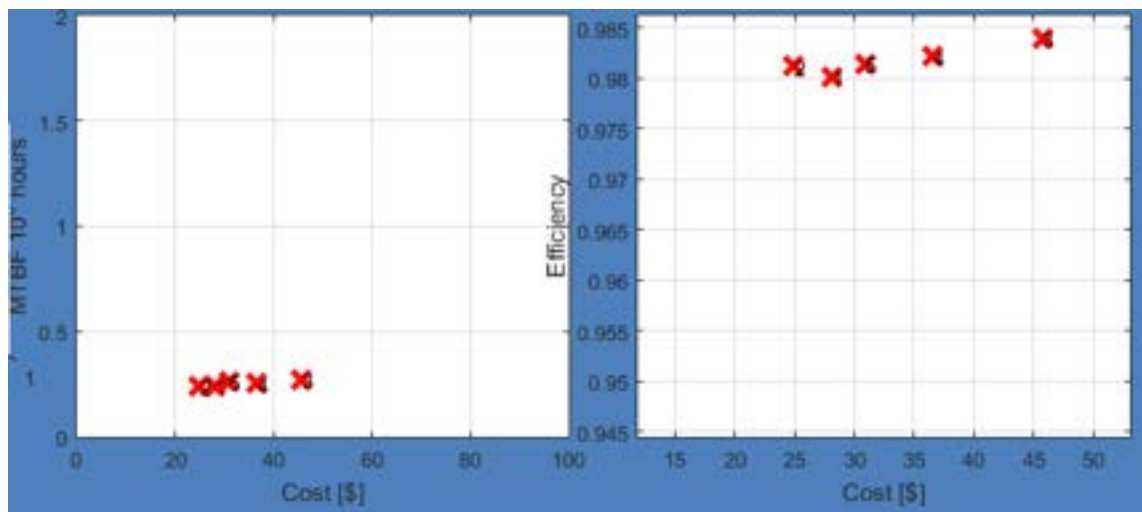


Figura 35. SMPPT con dispositivi in GaN

In primis è possibile osservare che i dispositivi in SiC sono quelli che garantiscono prestazioni peggiori in termini di efficienza. E' bene tenere presente che si tratta, in questo caso, di componenti SiC commerciali e non ottimizzati per le applicazioni fotovoltaiche; quindi emerge nel caso dei SiC la necessità, almeno allo stato attuale, di sviluppare soluzioni ottimizzate per le applicazioni suddette al fine di incrementarne la competitività con altri dispositivi basati su materiali differenti e ridurre il costo. Di particolare interesse, sulla base delle promettenti performance registrate, appare l'utilizzo di SMPPT equipaggiati con dispositivi in GaN. Tali valutazioni sono state verificate sperimentalmente mediante la caratterizzazione dei prototipi realizzati.

## 7 Conclusioni

Nel presente documento vengono presentate le attività svolte durante il terzo anno dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA.

Durante il PAR 2017 le attività di ricerca sono state mirate allo sviluppo della piattaforma informatica PiCon-RET per la progettazione di convertitori SMPPT da asservire a generatori fotovoltaici. In particolare, il software è dotato di sezioni dedicate agli scenari energetici individuati, partendo dal sistema FV<sup>+</sup> costituito dall'accoppiamento "generatore fotovoltaico + convertitore SMPPT" fino alle applicazioni in micro-reti AC e negli edifici NZEB.

La piattaforma fornisce un tool che intende essere di ausilio per contribuire ad "ampliare" la concezione ed il ruolo del sistema fotovoltaico come parte integrante di architetture multi-DER integrate in presenza di poligenerazione distribuita da FER e di accumulo energetico.

La piattaforma consente, inoltre, la progettazione di sistemi generazione-carico di tipo DC al fine di favorire l'impiego delle tecnologie fotovoltaiche in contesti di "autoproduzione-autoconsumo" di energia elettrica.

La piattaforma sviluppata tiene, inoltre, conto del dell'affermarsi sul mercato di dispositivi switching basati su nuovi materiali. Sono stati, infatti, creati e introdotti nella piattaforma, database di MOSFET in SiC e GaN, per consentire all'utente la progettazione di convertitori SMPPT dotati di componenti switching di ultima generazione. L'utilizzo di tali dispositivi è molto promettente giacché caratteristiche, punti di forza e criticità possono essere studiati e analizzati durante la fase di sperimentazione e caratterizzazione. Alla luce, infatti, dei risultati ottenuti mediante la piattaforma a disposizione, il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, delle Infrastrutture e dell'Energia Sostenibile dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria ha realizzato tre prototipi di convertitori SMPPT utilizzando, rispettivamente, dispositivi switching in Silicio, SiC e GaN.

Durante la terza annualità di progetto l'attenzione è stata anche concentrata sullo studio di tecnologie e protocolli per la ricezione ed il trasferimento dei dati da parte di convertitori SMPT. L'architettura considerata è stata quella Master-Slave in cui gli SMPPT possono "comunicare" con convertitori disposti allo stesso livello o a livello gerarchico superiore.

A valle della fase di studio, si è deciso di equipaggiare i prototipi di SMPPT realizzati con l'opportuna componentistica per la comunicazione di tipo Wi-Fi. E' stata, inoltre, implementata, nella piattaforma PiCon-RET un'apposita sezione per la verifica del trasferimento e comunicazione dei dati da ciascun convertitore SMPPT e per una rapida visualizzazione dei dati operativi caratterizzanti il comportamento e le prestazioni dei prototipi nelle diverse condizioni di funzionamento.

## 8 Riferimenti bibliografici

1. D.L. King, J.A. Kratochvil, W.E. Boyson, W.I. Bower, "Field Experience with a new performance characterization procedure for Photovoltaic arrays", Proceedings 2nd World conference and exhibition on photovoltaic solar energy conversion, July 1998 Austria, 1998.
2. M.G. Villalva, J.R. Gazoli, E.R.Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 24, Issue: 5 (2009), pp. 1198-1208.

## 9 Indice delle figure

Figura 1. Interfaccia iniziale piattaforma Pi.Con_RET-RET .....	8
Figura 2. Interfaccia scelta scenari energetici .....	9
Figura 3. Interfaccia delle configurazioni dello Scenario AC .....	10
Figura 4. Rappresentazione schematica dello scenario “FV-FC-BESS-AC” .....	11
Figura 5. Schema fasi di progettazione dello scenario “FV-FC-BESS-AC” .....	11
Figura 6. Interfaccia multi-tab della sezione “FV-BESS-AC” .....	12
Figura 7. Interfaccia multi-tab della sezione “FV-FC-BESS-AC” .....	12
Figura 8. Tab dedicato all’accumulo elettrico .....	13
Figura 9. Tab dedicato alla cella a combustibile.....	14
Figura 10. Tab dedicato al profilo di carico .....	14
Figura 11. Profili di carico mediante file xls.....	15
Figura 12. Grafico di un profilo di carico precaricato nella piattaforma .....	15
Figura 13. File template per la preparazione di un profilo personalizzato di carico residenziale.....	16
Figura 14. Tab dedicato alla generazione fotovoltaica.....	16
Figura 15. Istogramma dei valori della $T_{retroFV}$ (Sud Italia).....	17
Figura 16. Istogramma dei valori della $T_{retroFV}$ (Nord Italia) .....	18
Figura 17. Modello base Simulink adottato per il generatore FV [2] .....	20
Figura 18. Rappresentazione grafica delle soluzioni FV <sup>+</sup> .....	22
Figura 19. Documentazione di progetto per la Scheda FV dello scenario “FV-BESS” .....	22
Figura 20. Strategia di controllo implementata.....	24
Figura 21. Grafico della strategia di controllo per la configurazione “FV-BESS” .....	25
Figura 22. SOC sistema di accumulo nella configurazione “FV-BESS” .....	25
Figura 23. Interfaccia Scenario DC: generazione fotovoltaica.....	26
Figura 24. Interfaccia scenario DC: sistema di accumulo .....	27
Figura 25. Interfaccia scenario DC: profilo di assorbimento DC.....	27
Figura 26. File template per la personalizzazione dei profili di carico DC.....	28
Figura 27. Scenario DC considerato.....	28
Figura 28. Verifica dati: esito negativo .....	29
Figura 29. Interfaccia di avvio della progettazione .....	29
Figura 30. Architettura SMPPT Master-SMPPT Slave.....	35
Figura 31. Sezione dedicata alla trasmissione dati dal convertitore SMPPT alla piattaforma Pi.Con-RET .....	35
Figura 32. Caratterizzazione sperimentale del prototipo di convertitore SMPPT con MOSFET in Si.....	36
Figura 33. SMPPT con dispositivi in Si .....	38
Figura 34. SMPPT con dispositivi in SiC .....	38
Figura 35. SMPPT con dispositivi in GaN .....	39

## 10 Indice delle tabelle

Tabella 1. Template del file Excel per profili operativi personalizzati .....	19
Tabella 2. Valori del parametro $\Delta T$ .....	20
Tabella 3. Template del file Excel per un generatore fotovoltaico personalizzato .....	21