

2. Impianto fotovoltaico di Soragna

L'impianto considerato nella simulazione è quello dello stabile comunale di Soragna destinato a mensa scolastica, ubicato in Via Veneto 1, Soragna (PR), a 26 m sul livello del mare, lat. 44°55' Nord, long. 10°7' Est.

L'impianto è destinato a produrre energia elettrica per uso di tipo civile con connessione in parallelo alla rete di distribuzione.

L'installazione è di tipo architettonicamente non integrata. L'allacciamento dell'impianto fotovoltaico è stato eseguito sul lato di bassa tensione in modalità trifase con neutro.

L'impianto è entrato in funzione nell'aprile 2011, ed è costituito da due sottocampi fotovoltaici per un totale di circa 17 kWp installati. Il sistema è connesso direttamente alla rete elettrica e si avvale dello scambio sul posto previsto dalle norme del GSE. Mediante un apposita centralina, è stato possibile monitorare la produzione dell'impianto; i dati ricavati ed utilizzati per il confronto con le simulazioni sono quelli relativi alla produzione energetica per il periodo compreso tra il mese di Aprile e la fine di Settembre dell'anno 2011.

2.1 Caratteristiche dell'impianto

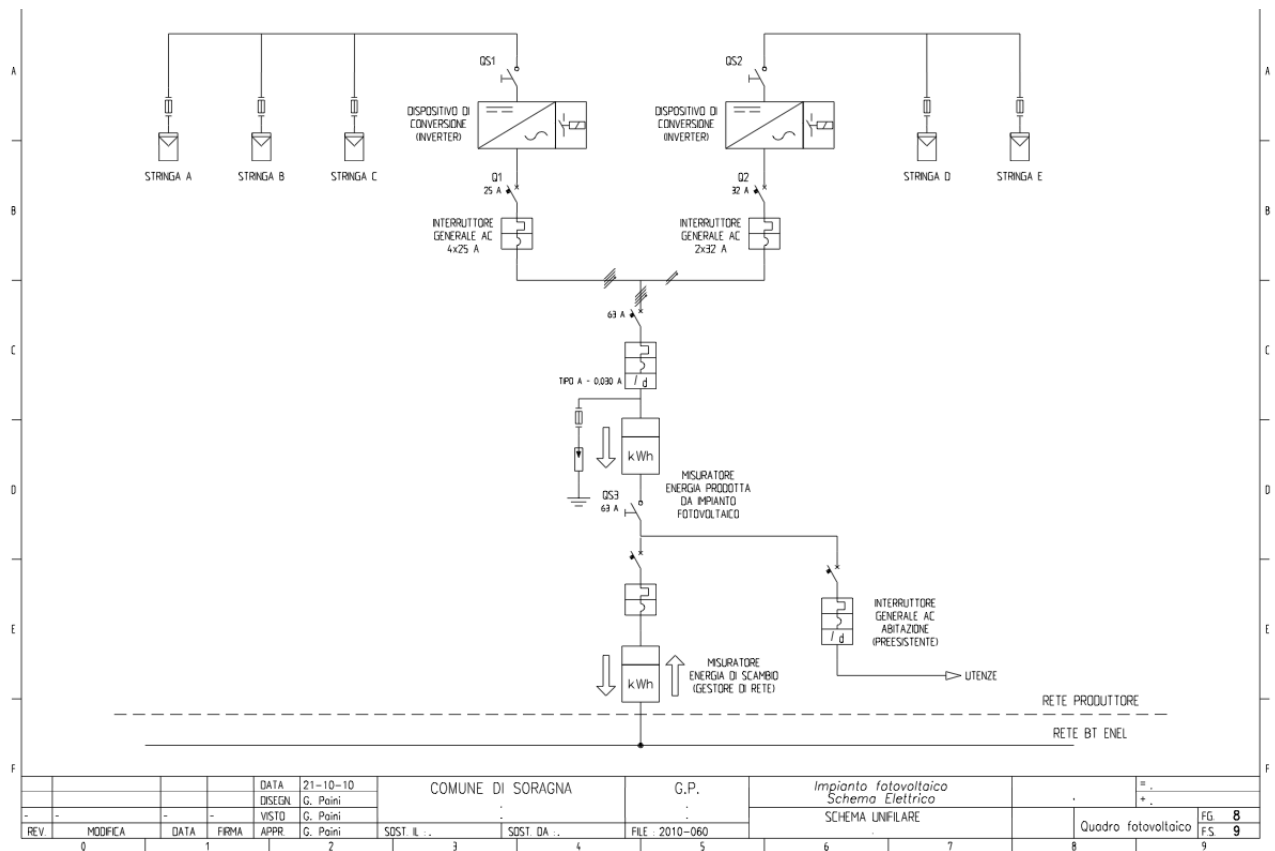


Figura 28 – Schema elettrico dell'impianto fotovoltaico di Soragna

L'impianto è costituito da due sottocampi fotovoltaici, ognuno connesso al proprio inverter, dimensionato sulla base della potenza, dell'intervallo di tensione in condizioni di massima potenza, e della tensione massima a circuito aperto.

Connessi all'inverter si trovano rispettivamente due sezionatori, e due interruttori magnetotermici a salvaguardia dei componenti dell'impianto.

I cavi elettrici convergono quindi in un ulteriore sezionatore, e passano poi ad un interruttore magnetotermico e differenziale (a protezione dell'operatore).

Si ha poi uno scaricatore di corrente, in caso di cortocircuiti, un contatore dell'energia prodotta, ed infine l'allacciamento in parallelo all'utenza dell'edificio e alla rete elettrica.

2.1.1 Generatore fotovoltaico

L'impianto impiega pannelli Amerisolar, modello AS-6P30 da 235 Wp in silicio policristallino; le dimensioni sono di 1.650 mm X 991 mm X 46 mm, per una superficie totale di circa 121 m². Tutti i dati tecnici sono ricavabili dalla scheda fornita dal produttore:

- Potenza nominale (P): 235 Wp;
- Corrente di cortocircuito (I_{sc}): 8,40 A;
- Tensione di circuito aperto (V_{oc}): 37,34 V;
- Corrente alla potenza massima (I_{mpp}): 7,96 A;
- Tensione alla potenza massima (V_{mpp}): 29,52 V;
- Efficienza del modulo: 14,4 %;
- Coefficiente di temperatura di P_m : -0,47%/°C;
- Coefficiente di temperatura di I_{sc} : 0,036%/°C;
- Coefficiente di temperatura di V_{oc} : -0,33%/°C;
- NOCT: 47°C ± 2°C;
- Numero di celle: 60;
- Peso: 19,5 kg;
- Cornice: lega d'alluminio.

I pannelli sono orientati a sud (ossia hanno Azimuth pari a 0°) e sono inclinati di circa 30° rispetto al piano orizzontale. Il generatore è nel complesso costituito da due sottocampi: il primo formato da 3 stringhe per 16 moduli l'una, e il secondo da 2 stringhe da 13 moduli l'una; una scelta di questo tipo obbliga all'utilizzo contemporaneo di due inverter, ma consente una migliore ripartizione della tensione e offre una certa sicurezza di produzione anche nel caso in cui si verifici un guasto ad uno dei sottocampi, permettendo la gestione indipendente degli stessi.

I pannelli sono stati fissati alla copertura del tetto, mediante strutture di sostegno ancorate direttamente al solaio.

2.1.2 Inverter

Si è scelto di utilizzare due inverter diversi per gestire i due sottocampi; per quello maggiore costituito da 3 stringhe è stato scelto il PV-10.0-OUTD della Power One da 10 kW, mentre per il secondo campo, di potenza inferiore, è stato scelto l'analogo inverter nella versione da 6 kW, il PV-6.0-OUTD. Entrambi i modelli sono dotati di dispositivi di protezione contro le sovratensioni grazie a interruttori controllati termicamente, nonché di dispositivo MPPT (maximum power point tracking); si tratta di inverter moderni caratterizzati da alta efficienza di conversione della corrente e grande stabilità nel caso di variazioni della tensione e della corrente. Inoltre, sono dotati della possibilità di gestire stringhe diverse in contemporanea utilizzando due dispositivi MPPT indipendenti, possibilità in questo caso scartata poiché tutti i moduli si trovano nelle medesime condizioni di orientamento. Le caratteristiche tecniche sono reperibili sulle schede del costruttore.

Modello PV-10.0-OUTD:

- Potenza nominale in ingresso: 10,4 kW;
- Potenza massima raccomandata in ingresso: 11,4 kW;
- Intervallo di tensione in campo MPP: 300-750 V;
- Tensione massima assoluta: 900 V;
- Tensione di attivazione: 360 V;
- Numero di MPPT indipendenti: 2;
- Efficienza: 97,7%;
- Potenza nominale in uscita: 10 kW;

- Potenza massima in uscita: 11 kW;
- Connessione alla rete: trifase;
- Tensione in uscita: 311-456 V;
- Frequenza di rete: 50 Hz;
- Corrente di uscita massima: 16,6 A;
- Consumo (stand-by/notturmo): 10 W/ <2 W;
- Peso: 38 kg;
- Dimensioni (larghezza, altezza, profondità): 650 X 650 X 200.

Modello PV-6.0-OUTD:

- Potenza nominale in ingresso: 6,2 kW;
- Potenza massima raccomandata in ingresso: 6,9 kW;
- Intervallo di tensione in campo MPP: 180-530 V;
- Tensione massima assoluta: 600 V;
- Tensione di attivazione: 200 V;
- Numero di MPPT indipendenti: 2;
- Efficienza: 97%;
- Potenza nominale in uscita: 6 kW;
- Potenza massima in uscita: 6 kW;
- Connessione alla rete: monofase;
- Tensione in uscita: 180-264 V;
- Frequenza di rete: 50 Hz;
- Corrente di uscita massima: 30 A;
- Consumo (stand-by/notturmo): 8 W/ 0,3 W;
- Peso: 26 kg;
- Dimensioni (larghezza, altezza, profondità): 740 X 325 X 208.

2.1.3 Cablaggio

Per il cablaggio in corrente continua è stato utilizzato un apposito cavo solare della SolarKab, antifiamma, caratterizzato da una bassa tossicità in caso di incendio, resistente ai raggi UV e alle condizioni ambientali anche a elevata temperatura. Per il cablaggio in corrente alternata sono sufficienti i normali cavi da impianto elettrico, poiché si trovano a operare in zone non esposte all'ambiente esterno.

2.1.4 Dati rilevati

Il monitoraggio dell'impianto è stato eseguito sia mediante appositi contatori di corrente immessa in rete, sia mediante una centralina che comunica i dati aggiornati ogni ora al portale internet Solarlog, dal quale è possibile visualizzare grafici e tabelle o esportare in formato Ms-Excel i valori misurati.

I dati raccolti ed utilizzati per la simulazione, vanno dall'1 aprile 2011 (data della messa in funzione dell'impianto) sino alla fine del mese di settembre dello stesso anno.

I parametri rilevati ed impiegati nel confronto con le simulazioni, consistono nei valori di produzione energetica giornaliera dell'impianto.

	A	B	C	D	E	F
1		Energia prodotta (kWh/giorno)				
2	01/04/11	92.009				
3	02/04/11	94.157				
4	03/04/11	93.049				
5	04/04/11	92.383				
6	05/04/11	74.07				
7	06/04/11	99.264				
8	07/04/11	97.886				
9	08/04/11	94.918				
10	09/04/11	91.298				
11	10/04/11	100.255				
12	11/04/11	97.435				
13	12/04/11	97.015				
14	13/04/11	82.488				
15	14/04/11	100.312				
16	15/04/11	30.919				
17	16/04/11	61.328				
18	17/04/11	96.899				
19	18/04/11	101.841				
20	19/04/11	100.89				
21	20/04/11	97.143				
22	21/04/11	98.459				
23	22/04/11	97.674				
24	23/04/11	91.043				
25	24/04/11	34.166				
26	25/04/11	79.191				
27	26/04/11	84.988				
28	27/04/11	93.226				
29	28/04/11	92.294				
30	29/04/11	54.472				
31	30/04/11	69.906				
32	01/05/11	80.606				
33	02/05/11	102.638				
34	03/05/11	87.975				
35	04/05/11	93.471				
36	05/05/11	73.134				

Figura 29 – Immagine della tabella di Ms-Excel riportante i valori ottenuti tramite il portale Solarlog

L'immagine seguente mostra la collocazione dell'impianto di Soragna; grazie alle foto scattate sul tetto e alle immagini del satellite è possibile avere un'idea più chiara del contesto in cui è collocato l'impianto, per esempio al fine di una migliore valutazione del coefficiente di albedo.

Le fotografie, inoltre, consentono di valutare in modo più attento l'eventuale presenza di ostacoli che potrebbero creare un effetto di ombreggiatura nell'impianto.



Figura 30 - Foto dell'impianto fotovoltaico della mensa comunale di Soragna



Figura 31 - Foto scattata dal satellite dell'edificio su cui è stato realizzato l'impianto fotovoltaico

3. Software di simulazione

Obiettivo della tesi è l'analisi e il confronto tra le simulazioni di funzionamento dell'impianto realizzate mediante due software differenti: i software utilizzati nella simulazione sono PV-SYST e TRNSYS.

3.1 PV-SYST

PV-SYST è un programma commerciale sviluppato dall'università di Ginevra nel 1992 e immesso successivamente sul mercato, che nasce con l'obiettivo principale di effettuare simulazioni accurate di impianti solari fotovoltaici sia termici.

L'uso del programma è particolarmente semplice: l'utente è guidato passo dopo passo nella costruzione dell'impianto virtuale mediante dati facilmente reperibili sulle schede tecniche dei componenti, e che consentono al computer di estrapolare i parametri necessari per la simulazione di ogni componente del sistema.

In realtà, nonostante una relativa semplicità d'uso, il software permette di definire in modo preciso ogni particolare, e fornisce risultati altrettanto dettagliati; presuppone quindi una discreta conoscenza tecnica del sistema fotovoltaico.

Il programma dispone di un database ampio e continuamente aggiornato, nonché della possibilità di collegarsi a diverse banche dati online per poter ricevere materiale riguardante componenti o dati meteorologici. Naturalmente è anche possibile immettere manualmente dati e parametri relativi a ogni aspetto della simulazione.

Nel caso di problemi nella definizione dei dati, il software indica all'utente la posizione e la tipologia dell'errore, facilitandone la correzione.

3.1.1 Simulazione con PV-SYST

La simulazione avviene grazie ad un modello virtuale dell'impianto che il software è in grado di creare se programmato con i dati richiesti.

Per prima cosa occorre scegliere il tipo di progetto da realizzare (figura 32); nella stessa pagina il programma permette di utilizzare strumenti per l'importazione e l'aggiornamento dei dati (come per esempio quelli meteorologici), o realizzare un modello preliminare dell'impianto, privo di particolari avanzati.

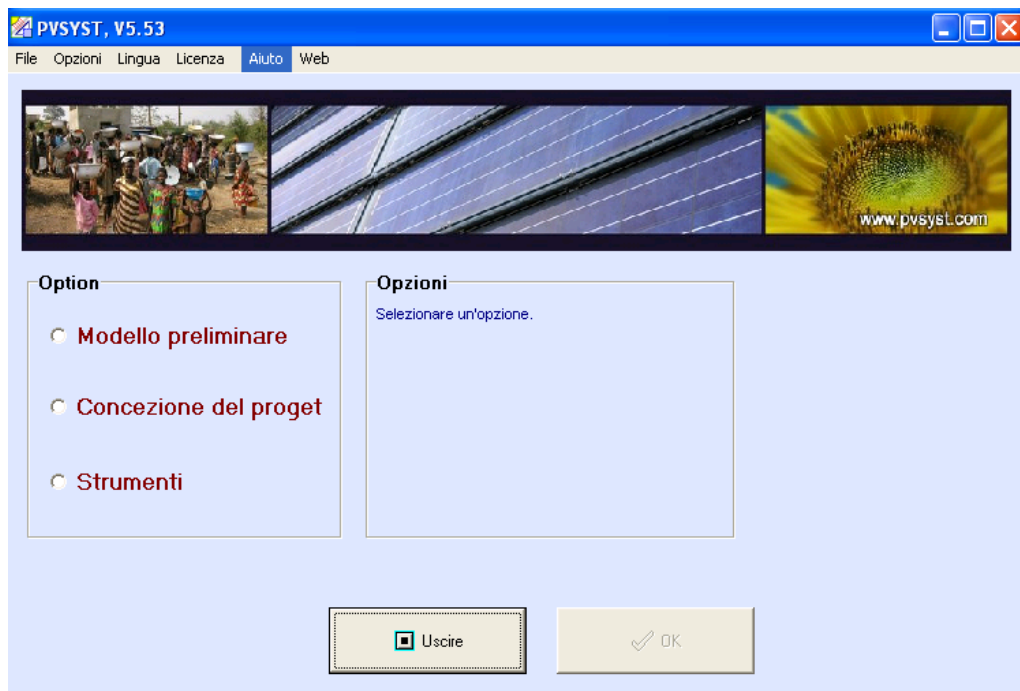


Figura 32 - Pagina iniziale di PV-SYST

Si passa poi alla realizzazione del modello vero e proprio dell'impianto.

Questa è eseguita in più fasi definendo in quest'ordine:

- Dati di progetto;
- Orientamento;
- Orizzonte;

- Ombreggiatura;
- Sistema;
- Module layout.

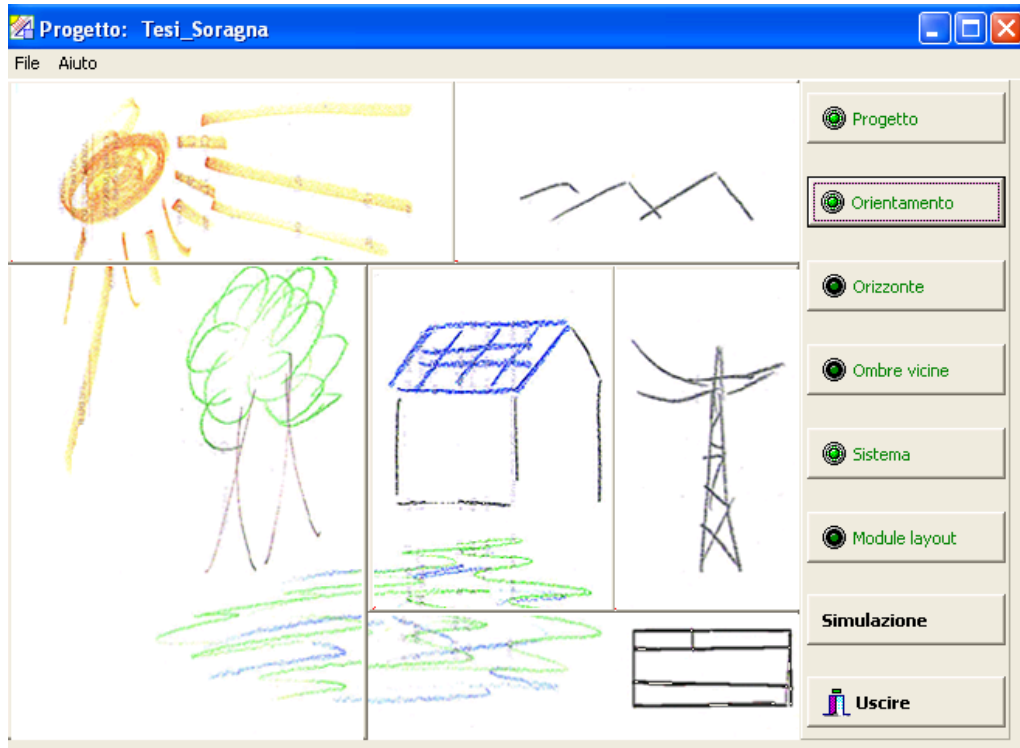


Figura 33 – Visualizzazione dei punti principali del progetto dell’impianto in PV-SYST

Per i dati meteorologici, sono state utilizzate le misurazioni della stazione ARPA (Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente) di San Pancrazio (a m 57 sul livello del mare, lat. 44°48’ Nord, long. 10°16’ Est), con valori orari che vanno dal 01/04/11 al 30/09/11.

Sono disponibili i seguenti dati:

- Temperatura dell’aria (°C);
- Irraggiamento orizzontale globale (W/m²);
- Velocità del vento (m/s).

Lo strumento d'importazione dei dati meteorologici consente di confrontare i valori inseriti con un modello fisico presente nel software per verificare la correttezza delle misurazioni.

Si passa poi alla definizione dell'orientamento dei pannelli e, alla posizione di eventuali corpi vicini per valutare l'effetto di ombreggiamento (non presenti nel caso in esame).

Nella sezione "Orizzonte" è possibile visualizzare il cammino del sole durante l'anno in funzione della posizione geografica del luogo considerato e definire eventuali ostacoli che si interpongano tra di esso e l'impianto (non presenti nel nostro caso).

La definizione del sistema consiste nell'inserimento dei dettagli riguardanti i pannelli, gli inverter, e la loro disposizione.

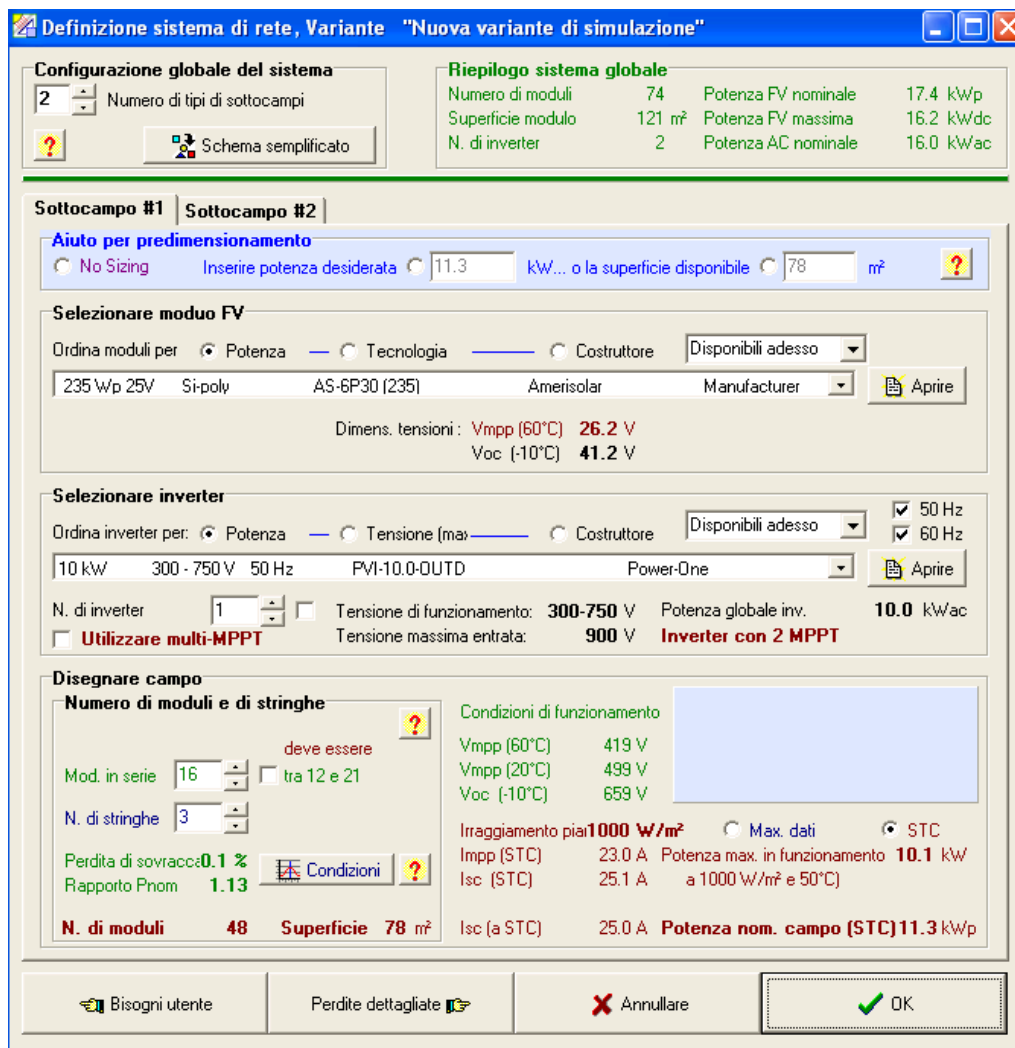


Figura 34 – Schermata di definizione degli elementi di sistema in PV-SYST

Come si può notare in figura 34, il software consente di dimensionare il sistema con ampia possibilità di scelta dei parametri. Una volta inseriti nel database i dati principali dei moduli fotovoltaici forniti dal costruttore, il software è in grado di interpolare i valori per ricavare la curva caratteristica della cella e ogni altro parametro necessario alla simulazione.

In “Module layout” è possibile realizzare mediante uno strumento CAD lo schema dell’impianto simulato.

A questo punto si definisce la durata della simulazione e la si esegue.

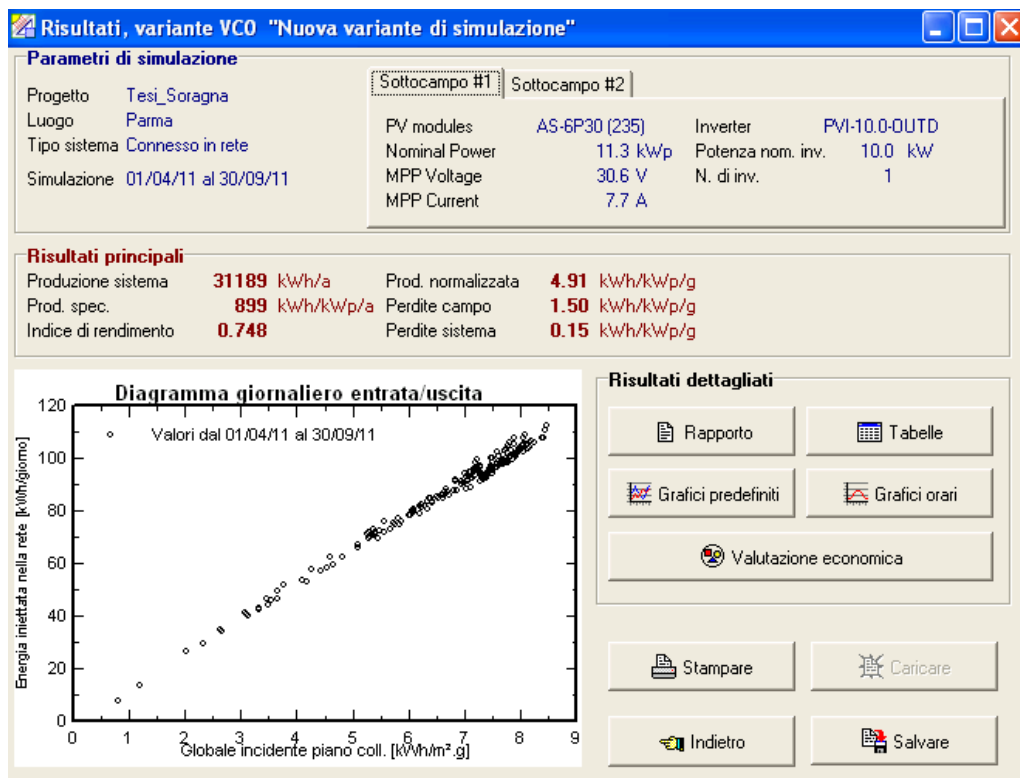


Figura 35 – Schermata di risultato della simulazione in PV-SYST

Il programma fornisce un'ampia scelta di dati sia in formato di grafico che di tabella facilmente esportabili in formato Excel, e se dotato di adeguati dati commerciali, effettua una valutazione economica del progetto.

Viene inoltre generato un breve rapporto contenente in modo sintetico i dati principali riguardanti l'impianto, inseriti in precedenza.

3.2 TRNSYS

Trnsys è un software che nasce per simulare il comportamento di un generico sistema in regime transitorio; è stato sviluppato nel 1975 mediante un progetto comune dell'Università del Wisconsin e quella del Colorado.

Trnsys è caratterizzato da un'interfaccia grafica di semplice uso, dove l'utente può combinare tra loro diversi moduli (o "Type" nel programma), ciascuno in grado di svolgere una determinata funzione, con l'obiettivo di costruire e simulare, in un certo intervallo di tempo, un sistema complesso.

La natura modulare del software e la ricchezza della libreria di Types a disposizione, rendono Trnsys un programma estremamente versatile e semplice.

Ogni modulo è costituito da una forma base dove l'utente può impostare i vari parametri ed effettuare ogni collegamento di tipo input/output tra i Types; in questo modo il software riproduce il comportamento del sistema complessivo, simulando il funzionamento dei componenti interconnessi singolarmente. E' inoltre possibile, definire ogni valore relativo alla simulazione (per esempio l'intervallo di tempo), immettere nel software dati di lettura esterni e regolare la forma di output del sistema (ad esempio un grafico oppure un file Ms-Excel).

Il programma può essere aggiornato anche manualmente, creando una descrizione matematica di un nuovo modulo da inserire, scritta in linguaggio FORTRAN.

3.2.1 Simulazione con TRNSYS

La struttura della simulazione è caratterizzata da un insieme di moduli collegati tra loro, e dotati di funzioni differenti, che nel software prendono il nome di "Type".

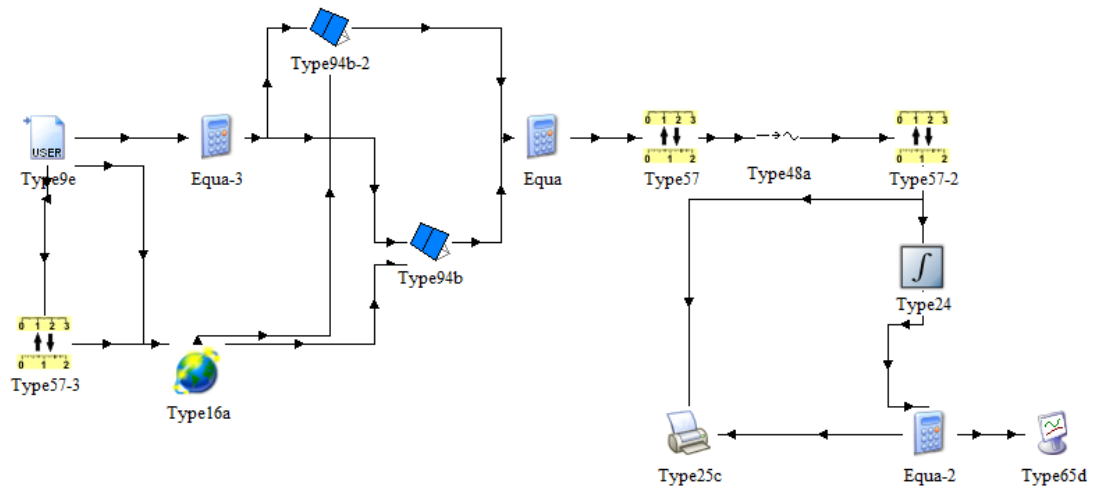


Figura 36 – Schermata principale di TRNSYS, con schema dell’impianto

Letto di dati (Type 9e)

Il lettore di dati di Trnsys permette di introdurre nella simulazione i parametri necessari per il funzionamento dei componenti del sistema.

In questo caso il lettore è stato usato per l’inserimento dei valori meteorologici della stazione ARPA, come nel caso precedente, fatta eccezione per i valori di velocità del vento. Il lettore è in grado di interpolare i dati, di origine oraria, mediante una legge lineare, creando una funzione che fornisce in modo continuo il valore del parametro richiesto.

Processore solare (Type 16a)

Il processore solare è il componente che simula il moto del sole sulla volta celeste in funzione della posizione geografica della località presa in esame, e del periodo dell’anno. Mediante questo modulo è possibile elaborare i valori di irradianza globali, relativi al piano orizzontale, e convertirli in valori distinti

di radiazione diffusa e diretta su piano inclinato (in questo caso si tratta di pannelli inclinati di 30° come descritto in precedenza).

I parametri in ingresso sono:

- modello matematico per l'elaborazione dei dati;
- giorno o periodo dell'anno di simulazione;
- latitudine della località studiata;
- dati di irradianza globale su superficie orizzontale;
- coefficiente di albedo;
- configurazione del generatore fotovoltaico (azimut e inclinazione della superficie).

Generatore fotovoltaico (Type 94b)

Questo modulo simula il comportamento dei pannelli fotovoltaici dell'impianto preso in esame.

Il generatore fotovoltaico è stato per semplicità diviso in due moduli distinti, uno per ogni sottocampo; ogni parametro è stato impostato come nella simulazione precedente, sulla base dei dati della scheda tecnica dei pannelli.

Inverter (Type 48a)

L'inverter svolge la medesima funzione di conversione della corrente continua prodotta dall'impianto, in corrente alternata; l'unico parametro significativo da impostare, è l'efficienza, il cui valore è lo stesso nella simulazione precedente.

4. Analisi e confronto dei risultati

I dati ottenuti dalla simulazione con entrambi i software, sono stati messi a confronto con i valori sperimentali.

I risultati sono i seguenti:

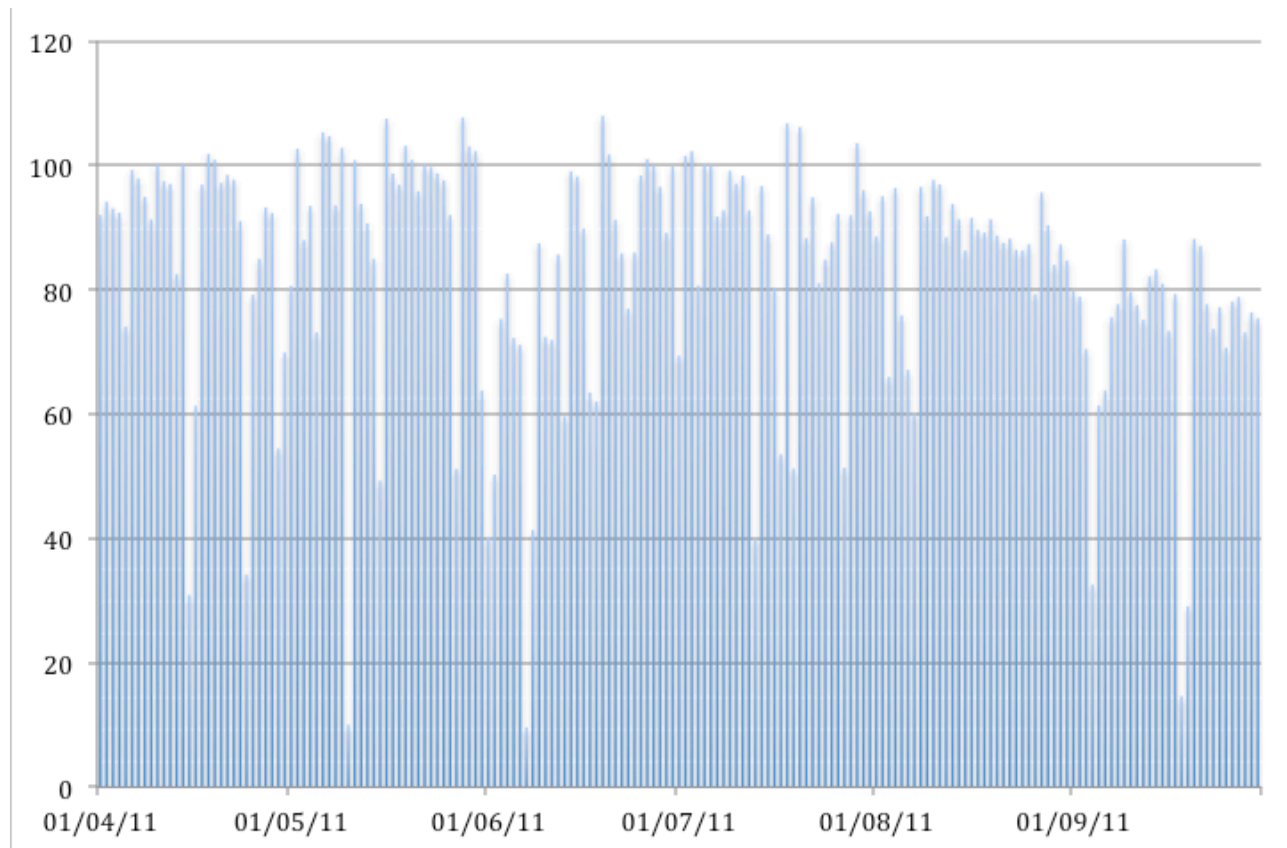
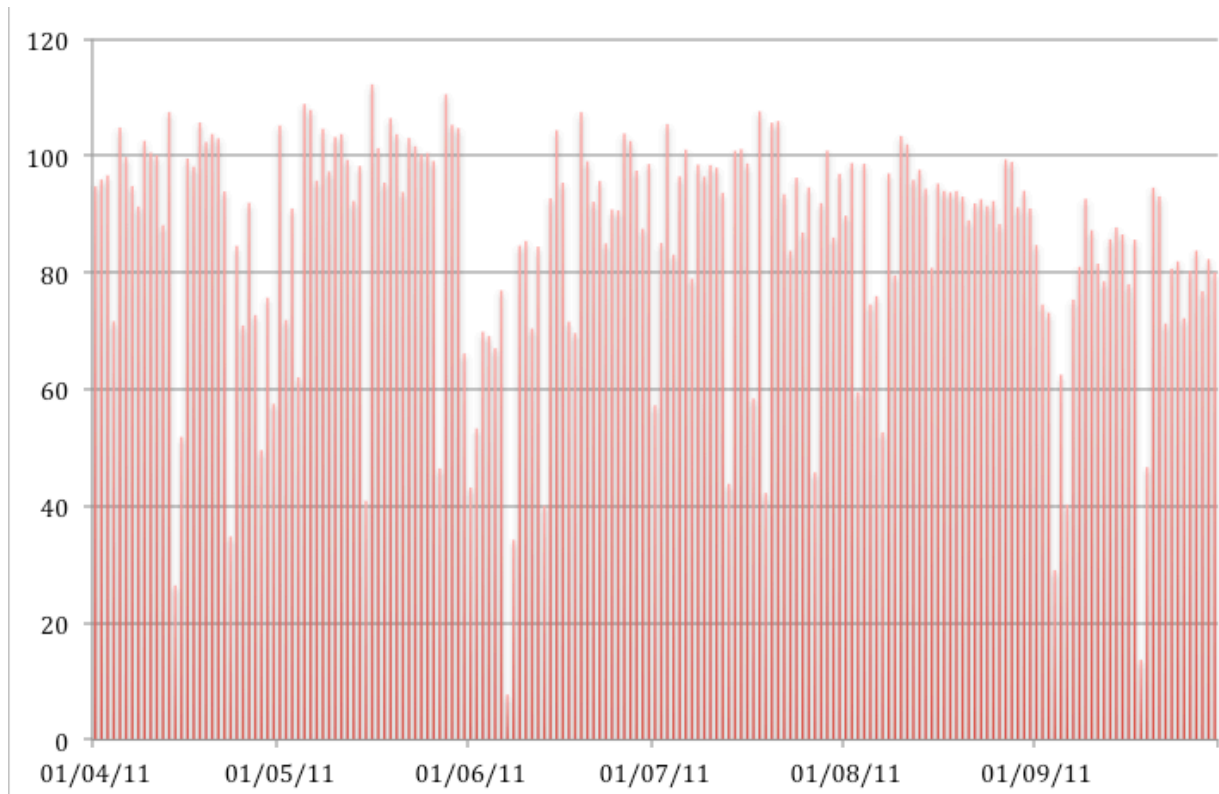
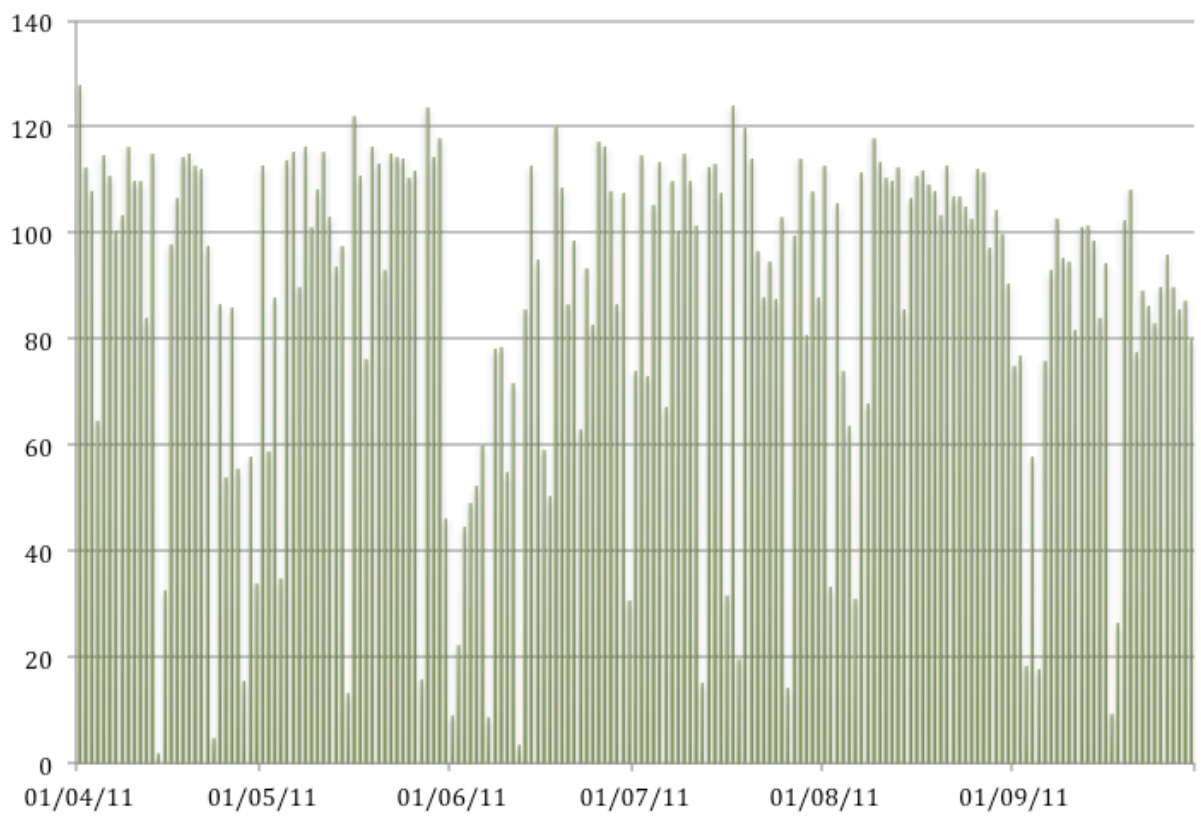


Figura 37 - Energia giornaliera prodotta dall'impianto (kWh/giorno)



**Figura 38 - Energia giornaliera prodotta nella simulazione con PV-SYST
(kWh/giorno)**



**Figura 39 - Energia giornaliera prodotta nella simulazione con TRNSYS
(kWh/giorno)**

I grafici precedenti mostrano l'energia prodotta giornalmente nell'arco di tempo preso in considerazione nella simulazione; per l'impianto simulato mediante i due software, i valori totali sono di circa 15.634 kWh per PV-SYST e di 15.825 kWh per TRNSYS, mentre il valore rilevato sperimentalmente è di circa 15.323 kWh, cioè di poco inferiore.

Si può notare dai grafici giornalieri come l'andamento della produzione durante i vari giorni, sia sostanzialmente simile, essendo lo scarto totale di produzione, particolarmente ridotto. Ai fini della lettura dei grafici è importante sottolineare come i mesi coinvolti nella simulazione siano di fatto quelli primaverili e estivi, in cui si raggiungono i valori più alti di produzione (dato confermato dagli elevati valori di irradianza misurati).

Per meglio identificare la differenza tra la simulazione e il dato rilevato si è confrontata la produzione mensile (tabella 1) e calcolato l'errore percentuale (tabella 2).

Mese	Dati reali (kWh)	Simulazione PV-SYST (kWh)	Simulazione TRNSYS (kWh)
Aprile	2.590	2.570	2.556
Maggio	2.793	2.932	2.971
Giugno	2.367	2.370	2.119
Luglio	2.714	2.732	2.753
Agosto	2.700	2.789	3.040
Settembre	2.159	2.241	2.385
TOTALE	15.323	15.634	15.825

Tabella 1 - Produzione mensile e totale (kWh)

Mesi	Variazione percentuale PV-SYST	Variazione percentuale TRNSYS
Aprile	-0,77%	-1,31%
Maggio	4,98%	6,37%
Giugno	0,13%	-10,48%
Luglio	0,66%	1,44%
Agosto	3,30%	12,59%
Settembre	3,80%	10,47%
TOTALE	2,03%	3,28%

Tabella 2 - Variazione percentuale della produzione simulata rispetto alla reale

Come si può vedere, l'errore percentuale sul totale dell'energia prodotta rispetto al valore reale, vale soltanto pochi punti percentuale per entrambi i programmi. Nella seguente figura si riporta il confronto grafico tra i valori di produzione reali e quelli simulati.

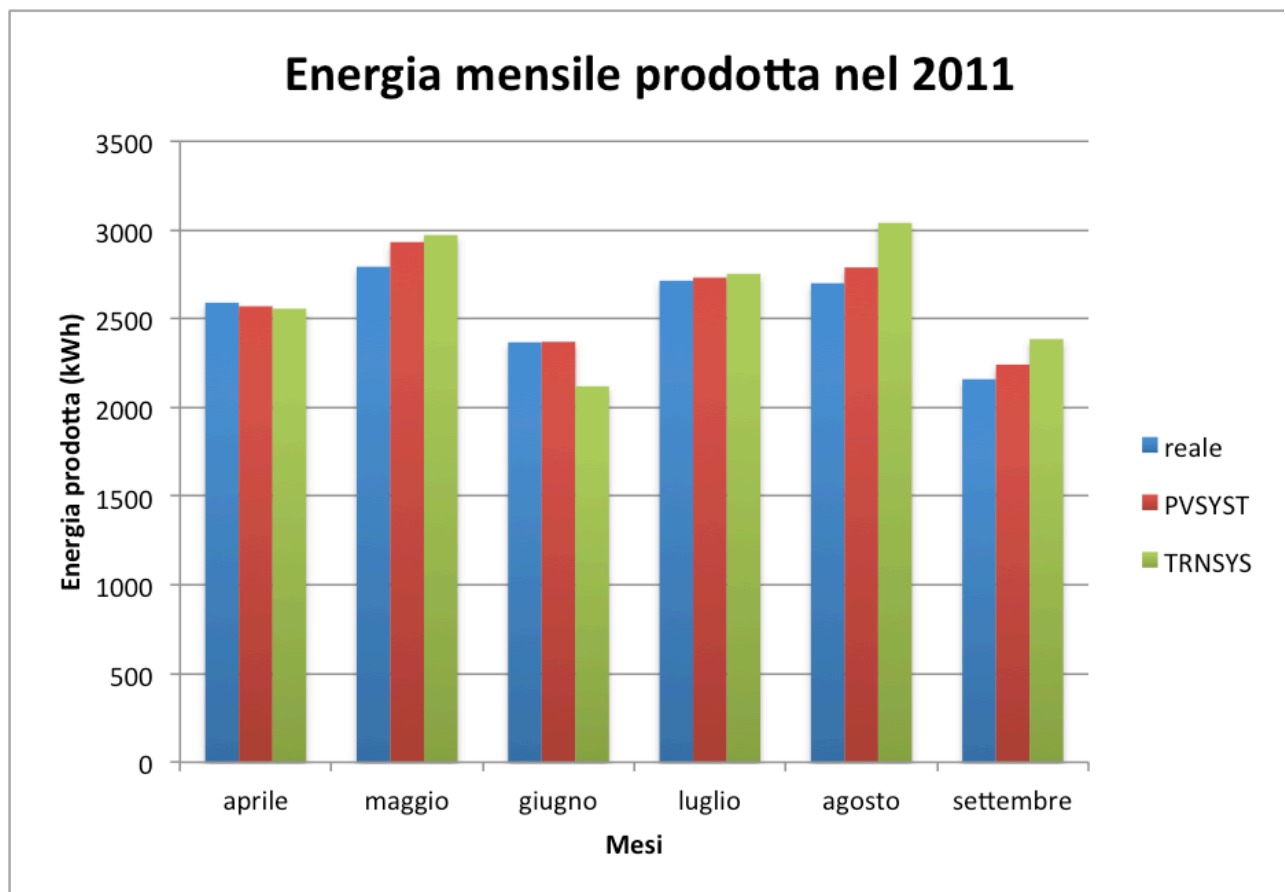


Figura 40 - Produzione mensile di energia elettrica nel 2011. Confronto tra dati stimati e produzione misurata (kWh/mese)

Per meglio valutare i risultati ottenuti, il software PV-SYST consente di evidenziare le perdite dell'impianto (figura 41).

Diagramma perdite sull'anno intero

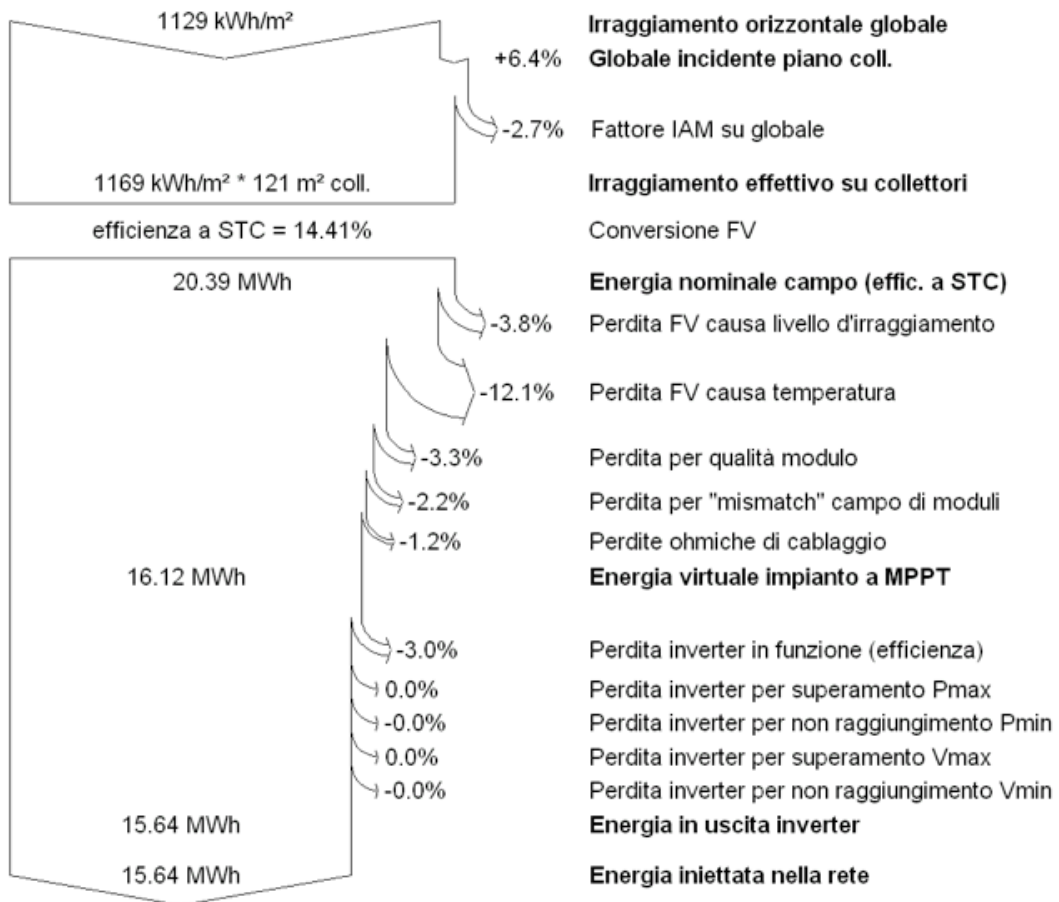


Figura 41 - Diagramma del flusso di energia e delle varie perdite, fornito da PV-SYST

Il valore iniziale, pari a 1.129 kWh/m^2 , rappresenta l'energia totale per unità di superficie sul piano orizzontale; si passa quindi all'irraggiamento effettivo sulla superficie inclinata di 30° dei pannelli, ed infine si applica una correzione secondo il fattore IAM (Incident Angle Modifier), il quale indica approssimativamente come decade l'assorbimento dei raggi solari in funzione dell'inclinazione in cui essi arrivano.

Si ottiene dunque il valore energetico effettivo incidente sui collettori, che è pari a 1.169 kWh/m^2 . Si applicano quindi il valore di rendimento di targa dei moduli (14,4%) e le perdite dovute allo scostamento dalle condizioni standard, sia in termini di temperatura, che di caduta del rendimento dovuta alla diminuzione dell'irradianza. Al risultato ottenuto viene sottratto un valore

indicativo della presenza di difetti nel modulo, le eventuali perdite di mismatch, ed infine le perdite ohmiche riferite al cablaggio.

Ogni valore di correzione applicato deriva o da calcoli che il software PV-SYST effettua grazie ai modelli in esso contenuti, oppure dall'ampio database che lo stesso ha a disposizione. Si considera, infine, l'efficienza dell'inverter il cui valore è pari a 97%.

E' importante notare, inoltre, come il valore fondamentale di perdita consista in quelle originate dalle elevate temperature di cella, e ciò spiega come in molti casi occorra valutare attentamente la scelta di installare pannelli in film sottile (meno sensibili a questo effetto) in luogo di pannelli in silicio cristallino, nonostante i secondi abbiano un rendimento più elevato.

E' possibile quindi rappresentare il PR (Performance Ratio) dell'impianto, il cui valore si aggira attorno al 75%, sia nel caso reale che nella simulazione.

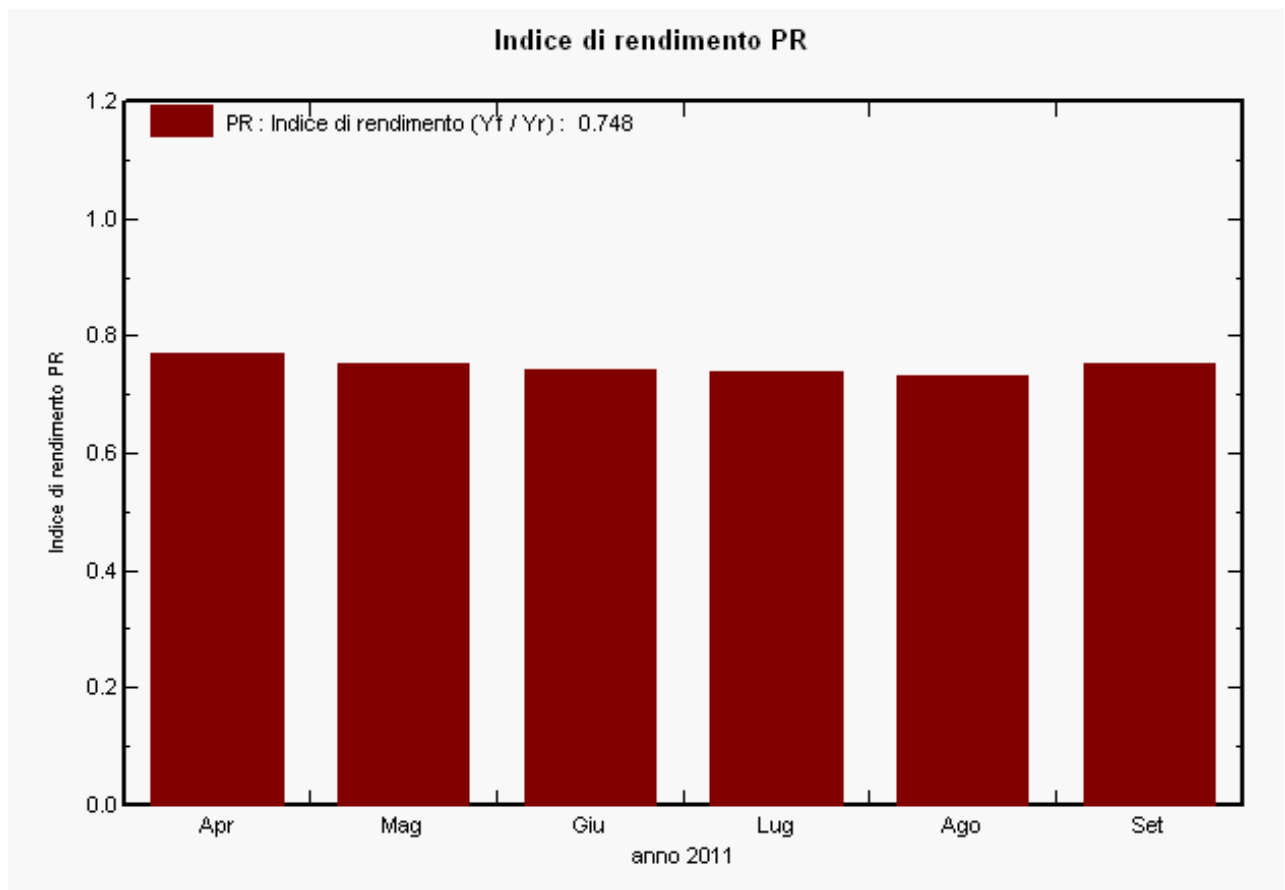


Figura 42 – Performance ratio dell’impianto, calcolato in ogni mese, nella simulazione effettuata con PV-SYST

Dall’analisi precedente ci si rende conto di come la discrepanza tra simulazione e realtà derivi dai difetti insiti nei programmi di simulazione; i modelli fisici adottati infatti possono rispecchiare la realtà solo con una certa percentuale di approssimazione; per esempio sia PV-SYST che TRNSYS calcolano autonomamente i valori di radiazione diffusa e diretta utilizzando il valore di irradianza orizzontale globale fornito; nel fare ciò essi si basano su algoritmi di calcolo che comportano una certa percentuale di errore. Lo stesso accade nel passare dai valori per la superficie orizzontale, a quelli per una inclinata.

Nel caso di PV-SYST, inoltre, i valori adottati per calcolare le perdite dovute al cablaggio, al mismatch, e ad eventuali difetti presenti nel modulo, derivano da

valori medi sperimentali, e possono non coincidere con le perdite reali dell'impianto.

Un'altra causa di errore è legata alla differenza tra i dati meteorologici delle due località (stazione di San Pancrazio e impianto di Soragna). Pur trovandosi ad una distanza di soli 20 km circa in linea d'aria, le condizioni di temperatura e irradianza possono comunque risultare diverse e contribuire ad aumentare lo scarto tra i dati raccolti.

Inoltre un confronto diretto dei valori giornalieri simulati, sulla base dei dati forniti dall'Arpa, con quelli di produzione effettiva ha evidenziato differenze particolarmente elevate in alcuni giorni, dovute presumibilmente ad errori di misurazione.

Osservando in tabella 2 la simulazione nel suo complesso si rileva che la variazione percentuale della produzione totale ottenuta con TRNSYS rispetto a quella sperimentale, supera di un solo punto quella ottenuta con PV-SYST.

Tuttavia nei singoli mesi, nel caso di TRNSYS, i valori di variazione superano talvolta i dieci punti di differenza rispetto al dato reale.

Il valore di produzione totale di TRNSYS risulta inoltre essere superiore sia al reale che a quello simulato con PV-SYST.

La principale differenza tra i due programmi è che TRNSYS, essendo un software molto meno specifico rispetto a PV-SYST che è stato progettato appositamente per la simulazione del funzionamento dell'impianto fotovoltaico, non è in grado di simulare gran parte delle perdite riportate nel diagramma di figura 41, riguardanti l'impianto nel suo complesso (perdite di cablaggio, mismatch, qualità modulo, basso irraggiamento); esso si limita a considerare l'efficienza dell'inverter e il decadimento del rendimento dei moduli dovuto alla temperatura come principali perdite del sistema.

PV-SYST inoltre tiene conto della velocità del vento che può dare un contributo, anche se limitato, in termini di raffreddamento della superficie dei moduli.