

RELAZIONE TECNICA SISTEMA INTEGRATO GENERA



Settembre 2012

NIER Ingegneria S.p.A.

Via Clodoveo Bonazzi n. 2 □ 40013 CastelMaggiore (BO)
Tel. 051 03.91.000 □ Fax: 051 58.80.758
Sede di Milano: Via Buonarroti n. 7 □ 20149 Milano
Tel. 02 480.152.28 □ Fax: 02 480.248.74
mail: segreteria@niering.it □ web: www.niering.it
C.F. e P.I. 02242161202 □ R.E.A. n. 423424
Cap. soc. € 1.500.000,00 i. v.

Sistema di gestione
integrato certificato
UNI EN ISO 9001 (BO-MI)
UNI EN ISO 14001 (BO)
BS OHSAS 18001 (BO-MI)

SOMMARIO

SOMMARIO	3
1. INTRODUZIONE	5
2. ATTIVITA' SPERIMENTALE	7
2.1. DESCRIZIONE DEL PROTOTIPO	7
2.1.1. STRUTTURA.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
2.1.2. VERDE PENSILE	8
2.1.3. IMPIANTO FOTOVOLTAICO.....	11
2.1.4. SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO.....	16
2.1.5. GIARDINO FILTRANTE	18
2.1.6. BIOLAGO	20
2.1.7. IL CICLO DELL'ACQUA	21
2.2. DESCRIZIONE DEGLI STRUMENTI DI MISURA	23
2.2.1. CENTRALINA METEO.....	23
2.2.2. ASFV/TPAN – SENSORE DI TEMPERATURA DEI PANNELLI.....	24
2.2.3. ACQUISIZIONE DATI IMPIANTO FOTOVOLTAICO: MaxTalk.....	25
2.2.4. SISTEMA DI RACCOLTA E MONITORAGGIO ACQUA DI RITORNO DAL TETTO: "LEM"	25
2.2.5. SISTEMA DI RACCOLTA E MONITORAGGIO ACQUA PROVENIENTE DAL GIARDINO	26
2.3. RACCOLTA ED ELABORAZIONE DATI.....	28
2.3.1. TEST DI STIMA DELLA CAPACITA' DI RACCOLTA DELL'ACQUA	28
2.3.2. TEST DI STIMA DEL COEFFICIENTE DI DEFLUSSO	31
2.3.3. TEST FOTOVOLTAICO	34
2.3.3.1. ESPERIMENTO IN CONDIZIONE DI BAGNATURA DEI MODULI FOTOVOLTAICI	
(FV-1)	34
2.3.3.2. ESPERIMENTO IN CONDIZIONE DI ASSENZA DI BAGNATURA DEI MODULI	
FOTOVOLTAICI (FV-2)	39
2.3.3.3. CONFRONTO DEGLI ESPERIMENTI FV-1 E FV-2.....	40
2.3.3.4. ESPERIMENTO IN CONDIZIONE DI ASSENZA DI BAGNATURA DEI MODULI	
FOTOVOLTAICI E COPERTURA DEL TETTO VERDE FV-3	52
2.3.3.5. CONFRONTO TRA GLI ESPERIMENTI FV-1 E FV-3	53
2.3.3.6. ESPERIMENTO SULL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO DI FOTOCROMO	64
3. ATTIVITA' MODELLISTICA	77
3.1. TRNSYS	77
3.2. GESTIONE ACQUA E DIMENSIONAMENTO CISTERNA.....	78

3.3.	MODELLO DI SIMULAZIONE IMPIANTO FOTOVOLTAICO	81
3.4.	CALCOLO DELL'INCREMENTO ANNUO DI PRODUZIONE	82
3.4.1.	CASO STUDIO 1 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)	83
3.4.2.	CASO STUDIO 2 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)	83
3.4.3.	CASO STUDIO 3 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)	84
3.4.4.	CASO STUDIO 4 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)	84
3.4.5.	CASO STUDIO 5 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)	85
3.4.6.	CASO STUDIO 6 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)	85
3.4.7.	CASO STUDIO 7 (PRESENZA DEL VERDE PENSILE E SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)	86
4.	CONCLUSIONI	87
5.	BIBLIOGRAFIA	88

1. INTRODUZIONE

Il rendimento di produzione di energia elettrica da parte di un impianto fotovoltaico è fortemente influenzato dalla temperatura della cella: maggiore è la temperatura raggiunta dalla cella, peggiore è il rendimento di trasformazione. È noto che, superati i 25°C, a parità di condizioni di irraggiamento solare, la potenza elettrica generata dalla cella fotovoltaica subisce un calo dallo 0,3 allo 0,5% per ogni grado di aumento della temperatura della cella stessa (*Peck e van der Linde, 2010; Markrides, et al., 2009*). Un modo per ridurre la degradazione termica cui è sottoposta la cella FV ed aumentare la sua efficienza è quella di ridurre la temperatura superficiale, specialmente nel periodo estivo in cui la produttività dell'impianto è maggiore. Una buona soluzione per ovviare a questa problematica è rappresentata dall'accoppiamento della tecnologia fotovoltaica, con la tecnologia del verde pensile, unite all'interno di un sistema integrato. Rispetto ad una copertura tradizionale, la superficie verde riflette una maggior parte della radiazione incidente e beneficia altresì dell'effetto raffrescante dovuto al processo di evapotraspirazione delle piante. Il giardino pensile oltre a rappresentare uno strumento importante per lo sviluppo sostenibile ed il risparmio energetico negli edifici e per la riduzione dei gas serra è in grado di aumentare la produzione di un impianto fotovoltaico installato in vicinanza (*Parida, et al., 2011*). Oltre a questi indubbi vantaggi un tetto verde presenta anche i seguenti aspetti positivi (*Koehler, et al.*):

- Riduzione del run-off delle precipitazioni
- Sgravio del carico idraulico dalla rete di drenaggio
- Aumento della durata delle stratificazioni d'impermeabilizzazione
- Riduzione dell'impatto visivo ed ambientale di una struttura
- Influenza sul microclima locale
- Riduzione dell'effetto "isola di calore urbana"
- Trattenimento e filtraggio delle polveri.

I vantaggi derivanti dall'unione della tecnologia del verde pensile con il fotovoltaico aumentano se si considera anche la presenza di sistemi di irrigazione controllata superficiale e sub-superficiale. È altresì possibile prevedere un sistema di bagnatura della superficie delle celle FV. Tale soluzione rappresenta un ulteriore strumento per abbassare la temperatura di cella oltre la vicinanza con il tetto verde, consentendo un incremento di rendimento e di produzione dell'impianto FV. Il raffreddamento mediante acqua dei moduli FV è un metodo già analizzato in letteratura. Diverse sono le modalità di bagnatura studiate, Odeh (*Odeh et al., 2009*) propone una bagnatura in continuo della cella con un film d'acqua sottile, Abdolzadeh (*Abdolzadeh, et al., 2009*) propone invece una bagnatura a spruzzo in continuo della cella, entrambe in grado di incrementare la produzione ed il rendimento di produzione della cella. In quest'ottica di efficientamento energetico e di sostenibilità ambientale nasce il sistema GENERA che ha l'obiettivo di integrare tre diverse tecnologie, ossia tetto verde, impianto fotovoltaico e un sistema di recupero idrico, al fine di massimizzare i benefici reciproci. Per studiare e quantificare tali benefici è stato realizzato un prototipo che implementa il sistema GENERA. Il prototipo è altresì dotato di un sistema di recupero e misura delle acque meteoriche sistemato in prossimità del tetto e del giardino filtrante adiacente, in grado di captare l'acqua meteorica caduta in corrispondenza del tetto e del giardino attorno e da qui poi convogliarla all'interno di un punto di accumulo.

L'acqua di accumulo integra l'impiego dell'acquedotto per irrigare il verde pensile, il verde ornamentale, alimentare il sistema di raffrescamento e per soddisfare i bisogni idrici dell'utenza che non richiedano acqua potabile. Il prototipo è stato dotato di sistemi di misura e raccolta dati di producibilità dell'impianto FV, capacità di recupero delle acque piovane e delle variabili meteorologiche che influenzano tali fenomeni. Il presente documento si propone di illustrare nel dettaglio le misure sperimentali effettuate presso il prototipo GENERA ed i risultati ottenuti dalle successive elaborazioni con lo scopo di quantificare i benefici derivanti dalla progettazione integrata del sistema GENERA. Un modello di simulazione dinamica dell'intero sistema integrato è stato altresì implementato e tarato attraverso le misurazioni effettuate sul campo.

2. ATTIVITA' SPERIMENTALE

2.1. DESCRIZIONE DEL PROTOTIPO

La struttura portante del prototipo GENERA è costituita da profili scatolari in ferro e le pareti sono interamente in vetro di spessore 3 cm. In copertura sono posizionati l'impianto fotovoltaico ed il giardino pensile, che occupano rispettivamente una superficie di 62 mq e 59 mq. Le dimensioni misurate dell'edificio sono 13,7 m x 8,8 m e la copertura è costituita da una unica falda inclinata, nel punto più basso è alta 3,20 m, nel punto più alto 3,75 m.



Figura 2-1: Esterno prototipo GENERA

2.1.1. VERDE PENSILE

La copertura del prototipo GENERA è adibita a tetto verde, per un superficie di 59 m². Tale superficie è contornata dai pannelli di un impianto fotovoltaico da 8,36 kWp. La realizzazione del giardino pensile rispetta pienamente le linee guida proposte dell'organizzazione tedesca FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) che rappresentano uno standard internazionale di buona pratica sulla progettazione, realizzazione e manutenzione del verde pensile e la UNI 11235 che è il riferimento normativo italiano. Si tratta di un tetto verde di tipo estensivo ottenuto tramite la piantumazione di specie termofile, abbastanza resistenti all'aridità, che richiedono una manutenzione molto ridotta (generalmente 1-2 volte all'anno) rispetto alla tipologia di "verde intensivo", che prevede l'utilizzo di grandi spessori di suolo e manutenzione più frequente. La tipologia vegetata prevalente utilizzata per il tetto verde del prototipo GENERA è il *sedum*, pianta erbacea con limitato sviluppo in altezza, che richiede minima manutenzione e con buone caratteristiche in termini di velocità di radicamento, di ombreggiatura, resistenza alla siccità ed al gelo e con buona autorigenazione. Il *sedum* è caratteristico anche per avere un elevato LAI, ovvero il Leaf Area Index (indice di area fogliare), che rappresenta il rapporto tra la superficie totale dell'area fogliare con l'area della proiezione della pianta sull'orizzontale. È un valore adimensionale, ma più correttamente è espresso in mq di fogliame su mq di suolo (m²/m²). Sono state piantumate anche altre tipologie vegetali a scopo ornamentale che presentano caratteristiche simili a quelle del *sedum*. Le stratigrafie di un tetto verde estensivo sono di dimensioni inferiori rispetto a quelle di un tetto verde intensivo, generalmente il peso delle stratificazioni è compreso tra i 90 e i 150 kg/mq, definiti in condizioni di massima saturazione idrica. Sul prototipo GENERA sono state installate le seguenti stratificazioni dalla superficie alla struttura portante:

- essenze vegetali (descritte in precedenza)
- substrato minerale vulcanico (substrato colturale) spessore 5 cm
- lapillo vulcanico LV 5/10 (elemento drenante e filtrante) spessore 10 cm.
- materassino drenante (elemento di protezione meccanica) spessore 2 cm.
- guaina impermeabilizzante (elemento impermeabilizzante della copertura)
- pannello tipo ISOPAN spessore 6 cm

Lo spessore complessivo del pacchetto è di circa 15 cm, considerata la compenetrazione tra il substrato colturale ed il lapillo vulcanico sottostante, utile per incrementare la filtrazione ed il drenaggio dell'acqua . Il sistema vegetativo, grazie alla sua capacità di evapotraspirazione e di risalita capillare stimola l'evaporazione dell'acqua incidente (meteorica ed irrigua) amplificando l'effetto di raffrescamento circostante.

Il sistema vegetativo realizzato ha inoltre le seguenti caratteristiche :

- Stimolo allo sviluppo dell'apparato radicale.
- Prevenzione di compattazione del substrato.
- Mantenimento dell'infiltrazione idrica.
- Mantenimento dell'aerazione del substrato.
- Mantenimento della struttura del substrato.
- Drenaggio dell'acqua in eccesso / prevenzione da saturazione idrica.

- Miglioramento degli scambi di aria e di acqua tra il terreno e l'atmosfera.
- Capacità di scambio cationico

All'interno del sistema vegetativo sono inseriti dei profili drenanti che servono ad evitare lo slittamento delle stratigrafie, ad ancorare l'impianto di irrigazione ed a permettere il flusso dell'acqua accumulata dalla porzione verde verso lo strato umidificante posato sotto il pannello fotovoltaico, al gocciolatoio in lamiera zincata, al misuratore ed infine alla zona di accumulo. Di seguito sono riportate alcune immagini delle fasi di costruzione e realizzazione del tetto verde.



Figura 2-2: Posa del substrato colturale.



Figura 2-3: Zonizzazione delle essenze vegetali.



Figura 2-4: Piantumazione delle essenze nel substrato culturale.

L'evapotraspirazione del tetto verde del prototipo GENERA permette un'unione armonica tra le tecnologie impiegate. Grazie alle caratteristiche proprie delle piante presenti, si viene a creare un micro-clima locale con temperature più basse, in cui aumenta la produzione di energia elettrica dei pannelli fotovoltaici. Una parte del presente studio sarà dedicata all'approfondimento di questa tematica.

è una forma di condizionamento naturale dell'ambiente interno, che consiste nel processo di asportazione di calore dal tetto attraverso l'attività metabolica delle piante, cui contribuisce in modo significativo anche la capacità di ritenzione idrica dei materiali impiegati per il substrato e lo strato drenante. Tale effetto viene ulteriormente amplificato attraverso il sistema controllato di raffreddamento superficiale dei pannelli fotovoltaici e di sub-

irrigazione del verde pensile. Di seguito sono riportate alcune immagini dell'integrazione delle tecnologie in copertura.



Figura 2-5: Integrazione delle tecnologie in copertura. Impianto fotovoltaico e verde pensile.

2.1.2. IMPIANTO FOTOVOLTAICO

In copertura al prototipo GENERA e tutto attorno al verde pensile, è installato un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica, che occupa in una superficie totale di circa 62 mq. Il tetto è costituito da un'unica falda esposta verso sud, l'angolo di scostamento dei moduli è di 9° verso ovest e l'angolo di inclinazione è di 6° rispetto al piano orizzontale. L'impianto fotovoltaico trifase ha una potenza di 8,36 kWp, è connesso alla rete di distribuzione Enel secondo quanto stabilito dalla Delibera 90/07 dell'A.E.E.G., che definisce le modalità procedurali e le condizioni tecnico-economiche per la connessione alle reti elettriche con obbligo di connessione di terzi in bassa tensione di impianti di produzione di energia elettrica. Ciascuna sezione dell'impianto è dotata della propria apparecchiatura per la misura dell'energia elettrica prodotta, come stabilito dalla Delibera ARG/elt 161/08. dalla documentazione rilasciata dall'azienda che si è occupata della progettazione e dell'installazione dell'impianto, risulta che il rendimento di conversione medio annuo è di circa l'80% e che quindi la potenza nominale verso la rete di distribuzione risulta ridotta di un 20%. L'impianto fotovoltaico è costituito da 48 moduli fotovoltaici da 175 Wp cad., disposti su telai di alluminio e acciaio zincato con dimensionamento e ancoraggio al tetto secondo le norme vigenti. È composto da 6 stringhe da 8 moduli cad., mod. SUNAGE tipo SAM72/5 monocristallino. In un vano tecnico al piano terra della struttura sono installati: il quadro di stringa lato corrente "continua", il gruppo di conversione della corrente continua in "alternata", composto da due inverter ed i gruppi di misura dell'energia prodotta (contatori "conto energia").

Nelle seguenti tabelle sono riportati i principali dati tecnici dei moduli fotovoltaici e dei due inverter installati.

MODELLO PANNELLI SOLARI FV



MODELLO	SAM72/5
PRODUTTORE	SUNAGE SA
QUANTITA'	48
POTENZA NOMINALE	175 Wp
TOLLERANZA	± 2 %
TIPOLOGIA CELLA	Si-monocristallino
FORMA DELLA CELLA	Pseudo-quadrata 125x125
CELLE PER MODULO	72
TENSIONE	35,3 V
CORRENTE	4,9 A
TENSIONE A CIRCUITO APERTO	43,9 V
CORRENTE A CORTO CIRCUITO	5,2 A
LUNGHEZZA	1606 mm
LARGHEZZA	814 mm
SPESSORE	45 mm
PESO	18,5 kg
CORNICE	Alluminio anodizzato
TIPO DI VETRO E SPESSORE	Vetro solare texturizzato – 3,2 mm
GARANZIA DELL'INTERO PRODOTTO	5 anni
GARANZIA DI POTENZA	90 % - 12 anni / 80 % - 25 anni

Tabella 2-1: Dati tecnici dei moduli fotovoltaici SUNAGE installati presso il prototipo.

MODELLO INVERTER INPIANTO FV		
	MODELLO	SolarMax 4200S
	QUANTITA'	2
	INGRESSO (DC)	
	POTENZA MAX. GENERATORE	5000 W _{stc}
	CAMPO DI REGOLAZIONE	100 – 500 V _{dc}
	TENSIONE MAX IN INGRESSO	600 V _{dc}
	CORRENTE IN INGRESSO	0 – 22 A _{dc}
	USCITA AC	
	POTENZA NOMINALE	3800 W
	POTENZA MASSIMA	4180 VA
	TENSIONE NOMINALE DI RETE/DI CAMPO	230 Vac / 184 – 300 Vac
	FATTORE DI POTENZA (PF)	< 0,98
	FREQUENZA NOMINALE DI RETE/CAMPO	50 Hz / 45 – 55 Hz
	DATI DI SISTEMA	
	RENDIMENTO MASSIMO	97 %
	RENDIMENTO EUROPEO	95,8 % @ 400 V _{oc} 95,1 % @ 300 V _{oc}
	TEMPERATURA AMBIENTE	- 20°C – 60 °C
	POTENZA NOMINALE CON UNA TEMPERATURA AMBIENTE FINO A	45 °C
	GRADO DI PROTEZIONE	IP 54
	INDICAZIONE	Display grafico LC 128x64 pixel, retroilluminazione e LED di stato
	COMUNICAZIONE DATI	RS 485/Ethernet
	DIMENSIONI	545 x 290 x 185 mm
	PESO	15 kg

Tabella 2-2: Dati tecnici dei due inverter SOLAR MAX installati presso il prototipo.

Di seguito sono riportate le planimetrie della disposizione dei moduli fotovoltaici in copertura, delle aree di competenza dei due inverter ed alcune immagini della fase di realizzazione dell'impianto.

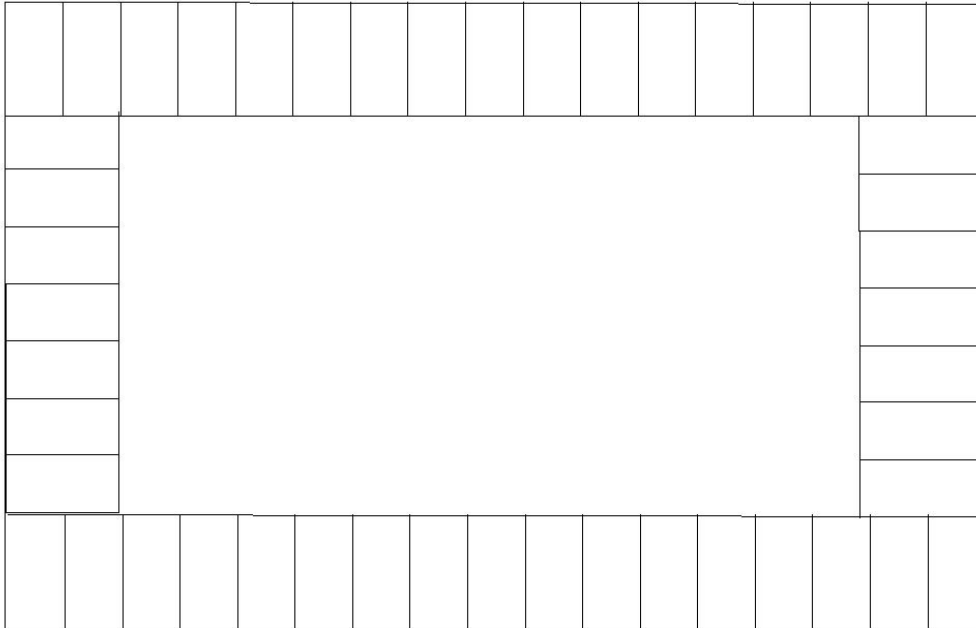


Figura 2-6: Planimetria della disposizione dei moduli fotovoltaici in copertura.

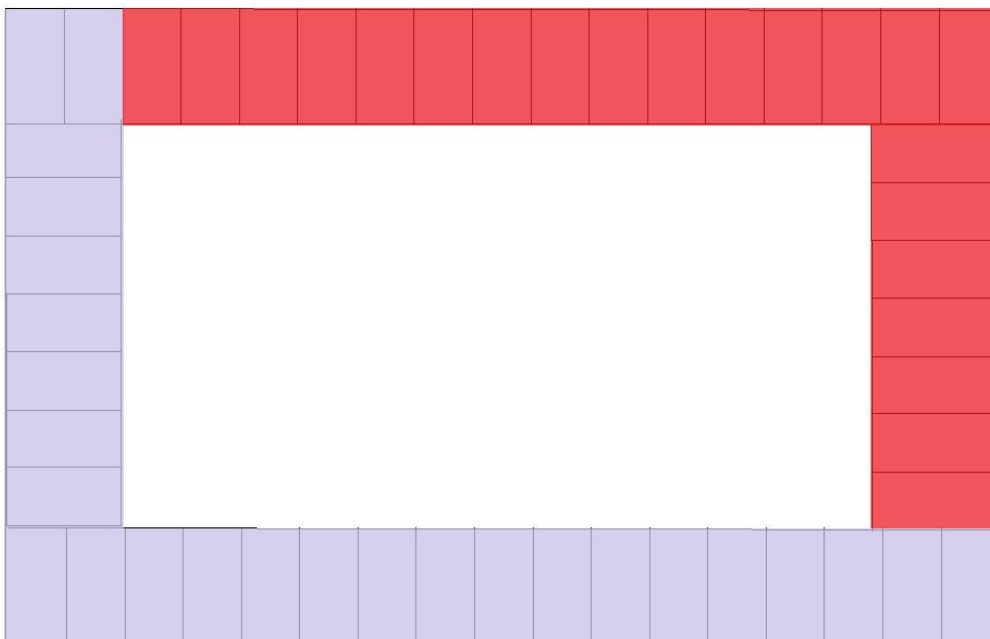


Figura 2-7: Planimetria della suddivisione dei moduli fotovoltaici fra i due inverter – Legenda: rosso – inverter 1 / violetto – inverter 2



Figura 2-8: Copertura del Prototipo GENERA. Fase di montaggio dell'impianto fotovoltaico.

Tutti i cavi di collegamento tra moduli fotovoltaici, inverter e quadro di distribuzione alla rete sono inseriti all'interno di opportune canalizzazioni. La consegna alla rete di distribuzione avviene nel quadro predisposto da Enel per la fornitura di energia elettrica.

I pannelli fotovoltaici che poggiano su un telaio di ancoraggio e supporto hanno uno strato di lapillo vulcanico LV 3/5 mm steso al di sotto di essi, che funge da "strato umidificante". L'acqua meteorica o di irrigazione proveniente dal tetto verde si infiltra all'interno della stratigrafia e scende attraverso il lapillo LV 5/10, scorrendo fino alla porzione di lapillo LV 3/5 che la assorbe parzialmente all'interno dei suoi pori e la rilascia lentamente esercitando a posteriori un effetto di raffrescamento sui pannelli fotovoltaici e un ulteriore rallentamento del deflusso dell'acqua verso il bacino di raccolta.



Figura 2-9: Ancoraggi e profili drenanti in acciaio zincato ed alluminio, posizionati sotto i pannelli fotovoltaici.



Figura 2-10: Profili drananti, lapillo vulcanico LV 3/5 e pannelli fotovoltaici in copertura del prototipo.

2.1.3. SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO

In corrispondenza del verde pensile e dell'impianto fotovoltaico sono stati installati due sistemi di distribuzione dell'acqua, con la doppia funzione di irrigazione della porzione vegetata e di raffreddamento della superficie dei pannelli solari fotovoltaici. Relativamente al sistema di raffreddamento dell'impianto fotovoltaico sono presenti 21 erogatori, della tipologia "ugelli auto-compensanti", che entrano in funzione solo quando la pressione dell'acqua in arrivo raggiunge un determinato valore. Gli erogatori di acqua sono fissati al profilo drenante ed alimentati da un' apposito tubo in polietilene disposto lungo il perimetro dello stesso profilo drenante. La gittata dell'acqua viene regolata verso il basso ed in modo che possa investire interamente la superficie del pannello fotovoltaico. La portata di un singolo erogatore è di 1,6 l/min, per un totale di 33,6 l/min sulla superficie dei pannelli fotovoltaici. Ottimizzando l'erogazione dell'acqua da questo ramo di impianto si ottiene come beneficio la riduzione della temperatura superficiale delle celle dell'impianto FV, che si traduce in un aumento della produzione e di rendimento del sistema. Di seguito è riportato l'impianto di raffreddamento in funzione.



Figura 2-11: Impianto di raffrescamento superficiale dei pannelli solari FV in funzione.

All'interno della stratigrafia del verde pensile si trova un sistema di sub-irrigazione, composto da una serpentina, detta anche "ala gocciolante", di lunghezza 100 m in cui sono presenti 333 punti goccia con una portata di 0,035 l/min ciascuno, per un totale di 11,7 l/min di acqua rilasciata all'interno della porzione vegetata. Questo sistema non è solo utile per stimolare la normale crescita delle piante, ma ottimizzando la bagnatura è possibile anche avere effetti positivi nel periodo estivo in termini di abbassamento della temperatura dell'ambiente indoor, creando un effetto di condizionamento naturale. Tale raffrescamento dipende soprattutto dalla capacità di ritenzione idrica dei materiali impiegati per la costruzione delle stratigrafie del verde pensile, come ad esempio il lapillo vulcanico in grado di assorbire sulla sua superficie notevoli quantità di acqua.



Figura 2-12: Copertura del prototipo GENERA. Posa dell'ala gocciolante della sub-irrigazione.

2.1.4. GIARDINO FILTRANTE

Attorno al prototipo GENERA è stato costruito ad hoc un giardino filtrante non solo con funzione ornamentale, ma anche con il compito di superficie captante e filtrante verso l'acqua meteorica e di irrigazione, esattamente come succede per il verde pensile posizionato in copertura. Come per il tetto verde, le stratigrafie sono state costruite in modo tale da massimizzare il drenaggio e la filtrazione dell'acqua. A favore di ciò è stata stesa una rete di drenaggio composta da 3 tubi forati che raccolgono l'acqua incidente sull'intera superficie del giardino filtrante, posizionata seguendo tre differenti pendenze, in base alle quali sono stati posati anche i diversi strati di materiali componenti. Di seguito sono riportate alcune immagini delle fasi di realizzazione e posa del sistema di drenaggio del giardino filtrante.



Figura 2-13: Scavi per la posa dei dreni del giardino filtrante.



Figura 2-14: Posa dei dreni del giardino filtrante.

La superficie occupata dal giardino filtrante è di circa 256 mq, con dimensioni di 18 m x 14 m. A differenza del verde pensile non è stato possibile installare un materiale impermeabile alla base, che avrebbe permesso la raccolta della maggior parte dell'acqua meteorica e dall'irrigazione, tuttavia le stratigrafie sono state realizzate in modo tale da rendere preferenziale l'afflusso verso la rete di drenaggio piuttosto che il rilascio in falda dell'acqua stessa. Tutto questo è stato possibile grazie alla posa di uno strato di lapillo vulcanico LV 5/10 mm di spessore 25 cm, sopra il suolo tal quale, che ha consentito di riempire le pendenze create ad hoc per il drenaggio e riportare al livello originario il piano di campagna. A completamento del giardino filtrante, al di sopra dello strato di lapillo è stato impiantato un substrato erboso di spessore circa 5 cm.



Figura 2-15: Posa dello strato di lapillo vulcanico LV 5/10 nel giardino filtrante.



Figura 2-16: Posa del substrato erboso del giardino filtrante.

2.1.5. BIOLAGO

A corredo del prototipo GENERA è presente anche un biolago. Esso occupa una superficie di circa 40 mq e viene utilizzato come bacino cui confluisce per l'acqua meteorica o di irrigazione, drenata e raccolta dalle superfici captanti, ovvero dal verde pensile, dal giardino filtrante e dal biolago stesso. Viste le problematiche connesse con le perdite di acqua per evaporazione e non solo, non sarebbe corretto utilizzare il biolago come un vero e proprio serbatoio di stoccaggio dell'acqua raccolta, ma sarebbe auspicabile installare una cisterna cui far confluire l'acqua stessa. Il biolago viene quindi a svolgere una funzione puramente estetica e ricreativa, aumentando le possibilità di fruizione e di sfruttamento di uno spazio verde, ed una funzione naturalistica, favorendo la biodiversità locale ed il ripopolamento da parte della fauna selvatica. La zona di filtrazione viene riempita di lapillo vulcanico LV 10/20mm (si tratta dello stesso materiale impiegato nello strato drenante del verde pensile, nello strato umidificante sotto i pannelli fotovoltaici e all'interno del giardino filtrante, in granulometria diversa) che ha, tra le diverse caratteristiche chimico – fisiche essenziali dal punto di vista agronomico, anche un'eccellente capacità filtrante e di trattenimento di nutrienti ed inquinanti. L'effetto di purificazione e filtrazione dell'acqua viene amplificato mediante una apposita pompa alimentata dall'impianto fotovoltaico che tiene in movimento l'acqua del lago e permette di svolgere così diversi cicli di passaggi consecutivi nella zona di filtrazione. In linea teorica è lo stesso sistema di movimentazione dell'acqua del lago che fornisce acqua all'impianto di sub-irrigazione del verde pensile e al sistema di raffreddamento dei pannelli fotovoltaici installati in copertura della serra.



Figura 2-17: Biolago in fase di realizzazione.

2.1.6. IL CICLO DELL'ACQUA

Il ciclo dell'acqua è alla base dell'intero sistema integrato GENERA. Per comprendere ancora meglio il funzionamento del tutto è bene partire prendendo in considerazione una situazione tradizionale di una casa e del contesto in cui è inserita.

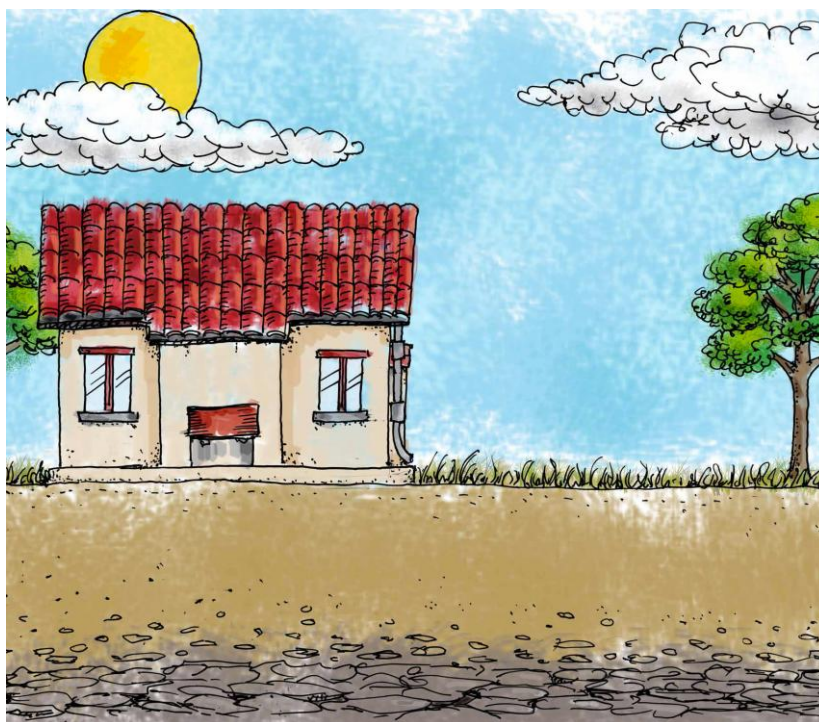


Figura 2-18: Casa tradizionale e contesto.

Analizzando le risorse della struttura e del contesto in cui è inserita la struttura è possibile fare valutazioni sulla realizzazione del sistema integrato GENERA.

Sulla copertura viene installato il verde pensile ed un impianto fotovoltaico e nel giardino una cisterna interrata ed allestita una zona di biofiltrazione nel giardino circostante.

La scelta realistica ricade sulla cisterna in quanto la prima soluzione prospettata, ovvero quella del biolago, non è efficiente dal punto di vista delle capacità di accumulo idrico, presentando infatti perdite di acqua di varia natura e non solo per evaporazione della sua superficie. Rimane il fatto che il biolago abbia indubbie qualità estetiche e ricreative e che sia di fondamentale importanza per l'ecosistema globale.

Il sistema integrato GENERA ha un molteplici funzionamento. In caso di evento meteorico, l'acqua incidente sulle superfici drenanti rappresentate dal verde pensile e, se possibile, dal giardino filtrante, viene raccolta e convogliata ad una cisterna interrata, opportunamente dimensionata per soddisfare le principali utenze idriche indoor che non richiedano acqua potabile.

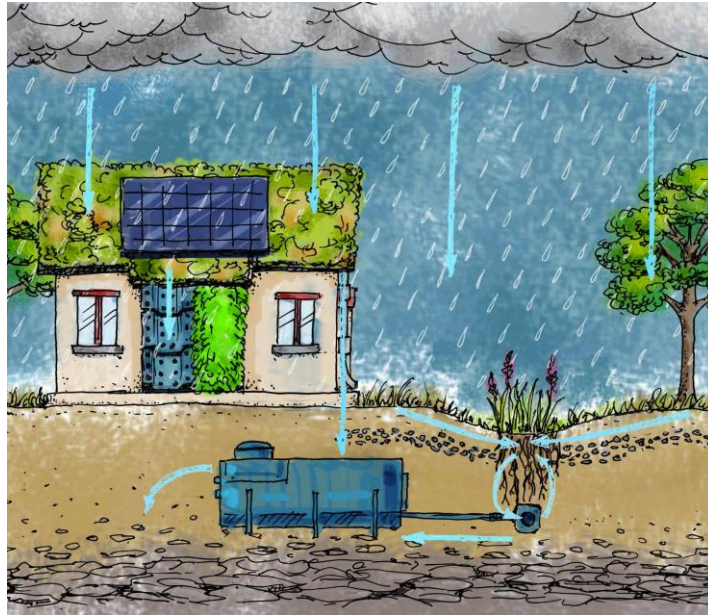


Figura 2-19: Funzionamento del sistema GENERA in caso di pioggia.

Il serbatoio di accumulo è dotato di un sistema che regola il “troppo pieno” consentendo che l’eccesso di acqua raccolta ritorni alla falda sottostante per la sua ricarica, ed è collegata ad un sistema di pompaggio che invia periodicamente l’acqua alla zona di biofiltrazione adiacente che ha la funzione di purificare l’acqua dalle sostanze inquinanti in essa presenti.

Una volta raccolta e trattata l’acqua meteorica viene inviata alle utenze idriche indoor ed utilizzata per il raffreddamento dei pannelli solari fotovoltaici e come irrigazione per il verde pensile ed il giardino circostante.

Il ciclo dell’acqua si chiude con l’ultimo passaggio che è rappresentato dalla raccolta dell’eccesso dell’acqua di irrigazione e di raffreddamento dei pannelli FV che attraversa gli strati drenanti posti in copertura e torna alla cisterna dove viene inviato alla zona di biofiltrazione per il trattamento.

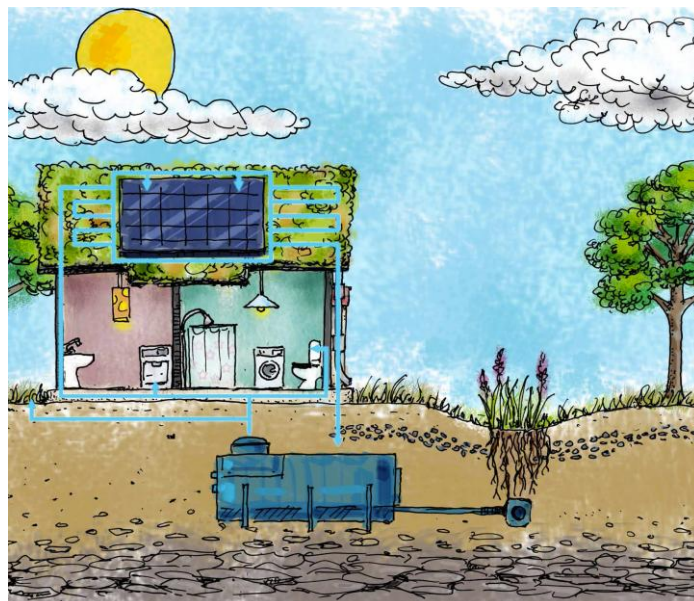


Figura 2-20: Funzionamento del sistema integrato GENERA.

2.2. DESCRIZIONE DEGLI STRUMENTI DI MISURA

2.2.1. CENTRALINA METEO

Il prototipo del progetto Genera è munito di una centralina meteo installata ad un'altezza di tre metri. Il modello scelto è "Vantage Pro 2 Plus" del produttore Davis Instruments. È una stazione meteo wireless composta da due elementi: il blocco sensori integrato (ISS integrated sensor suite) che ospita e gestisce tutti i sensori esterni, e la consolle che fornisce l'interfaccia utente, la visualizzazione dei dati, la conversione A/D in ISS e l'elaborazione dei dati. Il blocco sensori integrato e la consolle comunicano tramite un FCC-certificato (Federal Communications Commission).

L'acquisizione dei dati e la loro condivisione, anche tramite internet, viene eseguita dal software WeatherLink dal quale è possibile scaricare o visualizzare i seguenti parametri:

- Temperatura ambiente
- Temperatura ambiente massima
- Temperatura ambiente minima
- Umidità relativa
- Punto di rugiada
- Velocità del vento
- Direzione del vento
- Velocità massima vento
- Pressione atmosferica
- Precipitazioni
- Irraggiamento solare
- Temperatura 1
- Temperatura 2



Figura 2-21: Centralina meteo

Temperatura 1 e temperatura 2 sono due ingressi che lasciano la possibilità di acquisire i dati di altre due temperature tramite sensori applicati direttamente sulle superfici interessate. Per il nostro studio abbiamo installato il sensore ASFV/TPAN sul retro del modulo fotovoltaico.

Per l'acquisizione dei dati, è possibile scegliere il tempo di acquisizione all'interno del quale viene calcolata la media dei parametri e vengono registrati i valori massimo e minimo sopra indicati.

2.2.2. ASFV/TPAN – SENSORE DI TEMPERATURA DEI PANNELLI

Il sensore di temperatura dei pannelli solari ASFV/TPAN è costituito da una termo-resistenza al platino PT100 inserita in una lamella plastica autoadesiva idonea ad eseguire la misura a contatto sul retro di una cella fotovoltaica.

La termo-resistenza PT100 ha un campo di misura compreso tra -50°C e +150°C e precisione di misura 1/3DIN (secondo norma IEC 751).

Per il monitoraggio analitico degli impianti fotovoltaici, è consigliabile che il sensore ASFV/TPAN venga incollato sul retro di una cella centrale di un modulo posizionato nella zona centrale del campo fotovoltaico. Nel nostro caso questo non è stato possibile in quanto l'impianto è disposto a mo' di cornice al giardino pensile.

Dati tecnici:

Sensore	PT100 a 4 fili
Misura di temperatura	Da -50°C a +150 °C
Precisione	1/3 DIN secondo IEC 751
Grado di protezione	IP67
Dimensione lamella sensore	40 x 13 mm

Tabella 2-3: Dati tecnici ASFV/TPAN

Nella seguente fotografia si può notare il sensore installato su una cella centrale nel retro del pannello fotovoltaico:



Tabella 2-4: Termo-resistenza PT100

2.2.3. ACQUISIZIONE DATI IMPIANTO FOTOVOLTAICO: MaxTalk

Per l'acquisizione dei dati dell'impianto fotovoltaico viene utilizzato il software MaxTalk, pensato per la comunicazione in loco e il monitoraggio locale. Tramite la panoramica dell'impianto è possibile capire velocemente quale sia lo stato corrente, ed inoltre, MaxTalk permette l'interrogazione dei valori di misura, dei dati sulla resa e della configurazione del dispositivo, costantemente aggiornati.

Per il nostro studio sono state rilevate le potenze entranti negli inverter in modo tale da non avere il contributo negativo delle perdite di carico intrinseche negli inverter.

2.2.4. SISTEMA DI RACCOLTA E MONITORAGGIO ACQUA DI RITORNO DAL TETTO: "LEM"

L'acqua non deve essere sprecata sia per una questione etica che per una ragione economica. Pertanto lo studio effettuato ha tenuto in considerazione la possibilità di un sistema di stoccaggio e gestione dell'acqua, tramite un serbatoio interrato, capace di ridurre allo stretto indispensabile il consumo dell'acqua. Per il dimensionamento della cisterna e per il business-plan si ha quindi la necessità di uno strumento che misuri quanta acqua è possibile recuperare ad ogni ciclo di raffreddamento dei pannelli fotovoltaici, il "LEM". *Il nome dello strumento, interamente pensato e costruito da un tecnico che collabora con Olos, è stato scelto per la somiglianza con il modulo lunare che, il 20 luglio 1969, conquistò la luna tramite "un piccolo passo per l'uomo ma un gigantesco passo per l'umanità".*

Il LEM è costituito da un vasca di raccolta nella quale viene fatta confluire, tramite una tubazione, l'acqua in eccesso proveniente dal tetto, ovvero dal sistema di raffreddamento dei pannelli fotovoltaici, dal sistema di sub-irrigazione o dalla pioggia. All'interno della suddetta vasca, è installato un galleggiante che comanda una pompa che ha il compito di svuotare il recipiente pieno di acqua di recupero e inviarla al serbatoio interrato. A valle della pompa, in un settore ispezionabile, è presente un contatore d'acqua che permette di registrare la quantità d'acqua recuperata e quindi stimare quella che dovrà essere reintegrata. Il grado di precisione del contatore è dell'ordine di 10^{-4} m^3 .

Nella figura 2.22 viene riportato il LEM:



Figura 2-22: Sistema di raccolta e monitoraggio acqua di ritorno dal tetto: LEM

2.2.5. SISTEMA DI RACCOLTA E MONITORAGGIO ACQUA PROVENIENTE DAL GIARDINO

Nel giardino del prototipo del progetto Genera è stato predisposto, in fase di costruzione, un sistema capace captare l'acqua che penetra nel terreno e convogliarla in una vasca di recupero per poi essere successivamente inviata in cisterna. Come è possibile notare in figura 2.21, il giardino è stato suddiviso in tre settori delimitati da tre tubazioni drenanti sulla parte superiore. In questo modo, grazie anche alla stratigrafia del terreno eseguita, l'acqua penetrante nel terreno viene captata dalle tubazioni e riversata nella vasca di raccolta. Analogamente alla tecnologia utilizzata nel LEM, un galleggiante comanda l'azionamento di una pompa che invierà l'acqua captata in cisterna, che viene misurata da un contatore posto a valle della pompa di invio (figure 2.22 e 2.23).

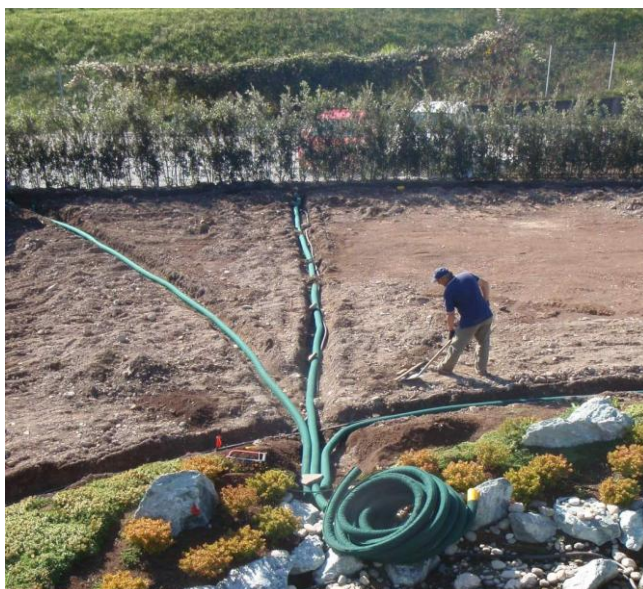


Figura 2-21: Suddivisione del giardino e tubazioni di raccolta acqua



Figura 2-22: Vasca di raccolta acqua giardino



Figura 2-23: Sistema di monitoraggio e pompaggio acqua, dalla vasca di raccolta alla cisterna

Il contatore dell'acqua è caratterizzato da un grado di precisione dell'ordine di 10^{-4} m^3 , come è possibile osservare dalla figura 2.24:

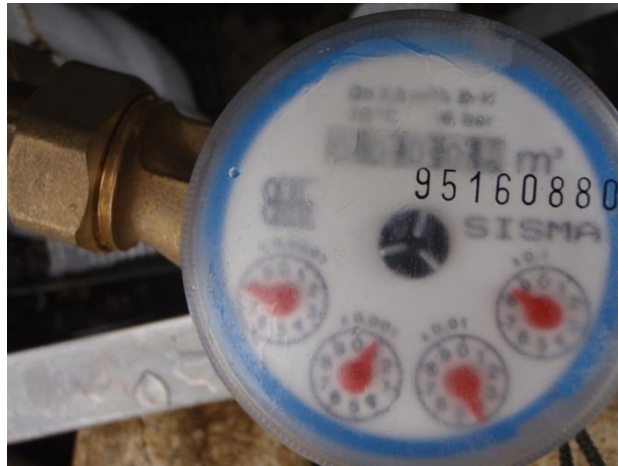


Figura 2-24: Contatore acqua recuperata dal giardino

2.3. RACCOLTA ED ELABORAZIONE DATI

2.3.1. TEST DI STIMA DELLA CAPACITA' DI RACCOLTA DELL'ACQUA

ESPERIMENTO 1

Per la stima della capacità di raccolta dell'acqua utilizzata per la bagnatura superficiale dei pannelli fotovoltaici, sono state fatte opportune misure, nel periodo scelto per il test del sistema di raffreddamento di GENERA. Sono state eseguite due misurazioni a distanza di 24 ore l'una dall'altra, in modo tale da considerare una intera giornata di funzionamento del sistema di bagnatura superficiale. Nella seguente tabella sono riportati i dati di rilevati dal LEM.

DATA	ORA	VOLUME [m ³]
02/05/2012	11:40	14,8017
03/05/2012	10:30	15,1481

Tabella 2-5: Dati registrati per la stima della raccolta acqua da sistema di raffreddamento.

Il volume di acqua raccolta, ottenuto per differenza dei volumi registrati, è risultato essere pari a 0,3464 m³.

In seguito è stata stimata la quantità rilasciata dal sistema di raffreddamento sui moduli fotovoltaici nell'intervallo di tempo di misura. Nella seguente tabella sono riportati i dati utilizzati per il calcolo.

DATI PER LA STIMA DELL'ACQUA RILASCIATA	
Numero ugelli	21
Portata ugello	1,6 l/min.
Periodo di bagnatura	1 min.
Frequenza di bagnatura	10 vv/gg

Tabella 2-6: Dati per la stima dell'acqua rilasciata dal sistema di raffreddamento.

La quantità di acqua rilasciata dal sistema di raffreddamento di GENERA si calcola con la seguente formula:

che coi nostri dati fornisce come risultato 0,3360 m³.

La percentuale di recupero, ottenuta dal seguente rapporto:

risulta pari al 97 % dell'acqua di raffreddamento. In questo caso si è pensato di utilizzare un coefficiente riduttivo pari a 0,9, per rendere la misura maggiormente cautelativa, moltiplicando per 0,90 il 97 % dell'acqua raccolta. Il risultato del recupero è quindi dell'87%.

ESPERIMENTO 2

Per la stima della capacità di raccolta dell'acqua meteorica da parte del sistema integrato GENERA è stato scelto come riferimento una giornata di precipitazioni avvenute in data 21 maggio 2012. Sono state fatte due misurazioni per il tetto, a distanza di 24 ore l'una dall'altra, in modo tale da calcolare il valore mediato sull'intera giornata. Nella seguente tabella sono riportati i dati di rilevati dal LEM.

DATA	ORA	VOLUME [m ³]
21/05/2012	13:16	23,9582
22/05/2012	10:16	24,7641

Tabella 2-7: Dati registrati per la stima della raccolta acqua dal tetto.

Il volume di acqua raccolta, ottenuto per differenza dei volumi registrati, è risultato essere pari a 0,8059 m³.

In seguito è stata stimata la quantità di pioggia caduta nel corrispondente intervallo di tempo. Il software della centralina meteorologia WeatherLink ci ha permesso di calcolare il valore di pioggia cumulato nel giorno di riferimento, risultato essere pari a 11,8 mm

Nella seguente immagine è riportata la schermata del programma con l'andamento delle piogge del giorno scelto, in cui figurano la temperatura dell'aria esterna (°C) e l'intensità di precipitazione (mm).

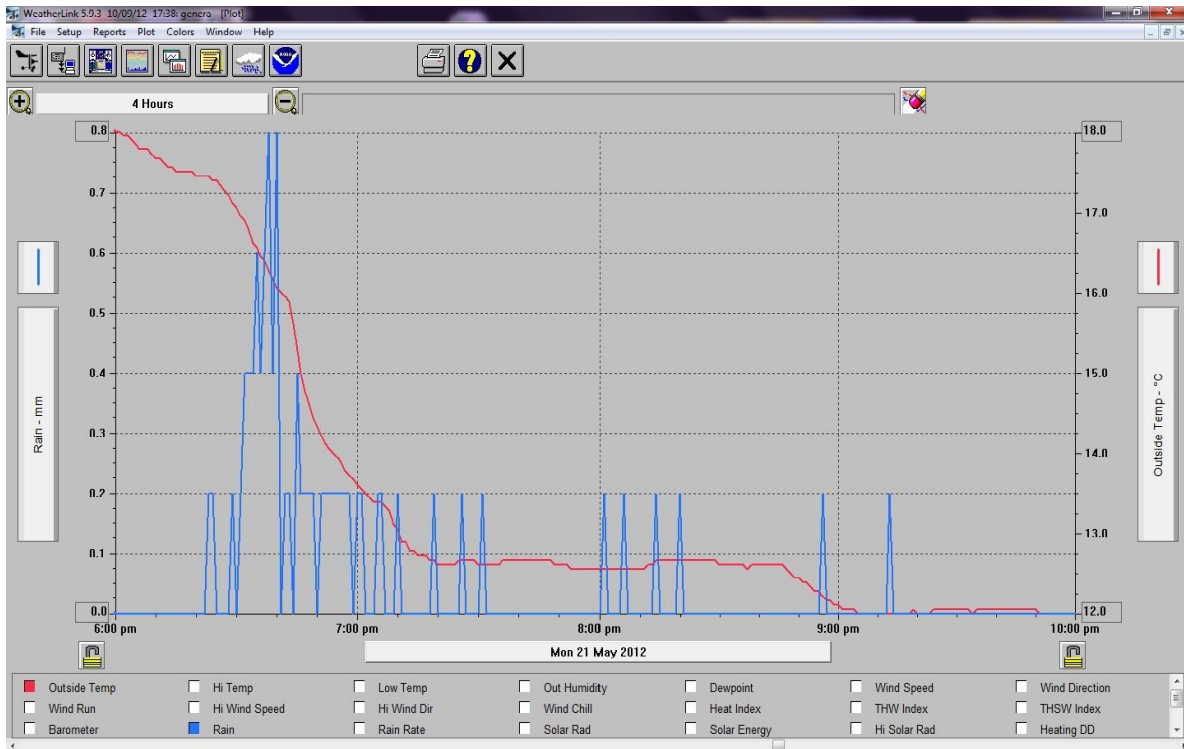


Figura 2-23: Schermata di WeatherLink con l'evento di precipitazione scelto.

La porzione di copertura occupata dal tetto verde ammonta a 59 m^2 , mentre quella occupata dai moduli fotovoltaici è di circa 63 m^2 , per un totale di 122 m^2 .

Per calcolare il volume di pioggia caduto in corrispondenza della superficie stessa, la formula è la seguente:

Dove:

A = superficie totale [m^2],

h = altezza totale di precipitazione [mm/gg].

Applicando la formula al nostro caso, il valore risultante è di $1,4396 \text{ m}^3$.

Infine, per calcolare la quantità di acqua potenzialmente recuperabile la formula è la seguente:

_____ *100

che fornisce come risultato finale 49 %. Questo valore è indicativo e da considerarsi riferito al solo evento di precipitazione studiato. Per conoscere un valore in grado di rispecchiare il reale comportamento del tetto verde a fronte di una precipitazione occorre fare delle misurazioni su un periodo di tempo più lungo, che sia mensile, stagionale o addirittura annuale.

2.3.2. TEST DI STIMA DEL COEFFICIENTE DI DEFLUSSO

La stima del coefficiente di deflusso è utile per conoscere il comportamento di un suolo che viene investito da una precipitazione, per sapere la quantità di acqua che è possibile recuperare dal volume di pioggia caduto sulla superficie captante. È una grandezza adimensionale, la cui formula di riferimento è:

Non è un valore che si può facilmente generalizzare, in quanto dipende molto dalla tipologia e dagli spessori della stratigrafia superficiale ed è sempre riferito ad un preciso arco temporale, che sia un unico evento di precipitazione, un periodo od un anno di riferimento.

In GENERA il coefficiente di deflusso del tetto verde e del giardino filtrante sono stati calcolati a partire da una serie di eventi di precipitazione avvenute nell'arco temporale compreso tra le ore 12:00 del 21/05/2012 e le ore 10:00 del 22/05/2012 (vedi Figura 2-27).

Dai dati di WeatherLink è stato calcolato il valore cumulato di precipitazione, che è risultato essere pari a 11,8 mm.

In seguito sono state stimate le superfici captanti efficaci, ovvero il tetto verde esclusa la porzione coperta da moduli fotovoltaici di area pari a 59 m² e la porzione utile di giardino filtrante che, dopo prove di bagnatura ad hoc, è risultata essere di soli 126 m² contro i 256 m² totali. Questo perché uno dei tre canali di raccolta dell'acqua inseriti nel giardino filtrante non funziona in modo adeguato, in quanto ostruito da materiale portato auspicabilmente da animali.

Sono state calcolati i volumi di precipitazione caduti in corrispondenza delle due superfici con la seguente formula:

Dove:

A = superficie totale [m²],

h = altezza totale di precipitazione [mm/gg].

Sostituendo i valori corrispondenti, si sono ottenuti i seguenti valori di volumi di precipitazione:

- Per la copertura = 1,4396 m³
- Per il giardino filtrante = 1,4868 m³.

Di seguito sono riportate le immagini dei misuratori del tetto e del giardino filtrante prima e dopo l'evento di precipitazione e la tabella con il riassunto dei valori registrati.

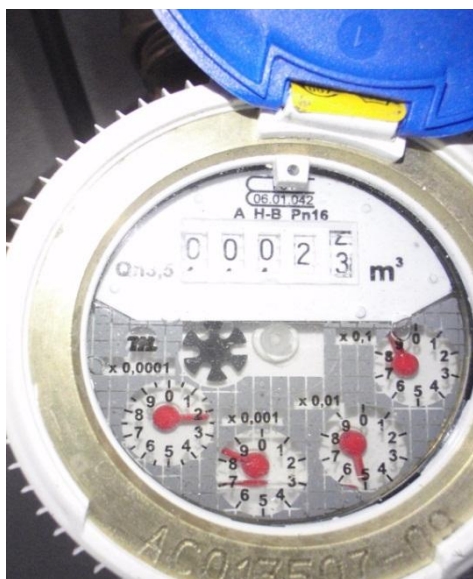


Figura 2-24 misuratore tetto – 21/05/2012

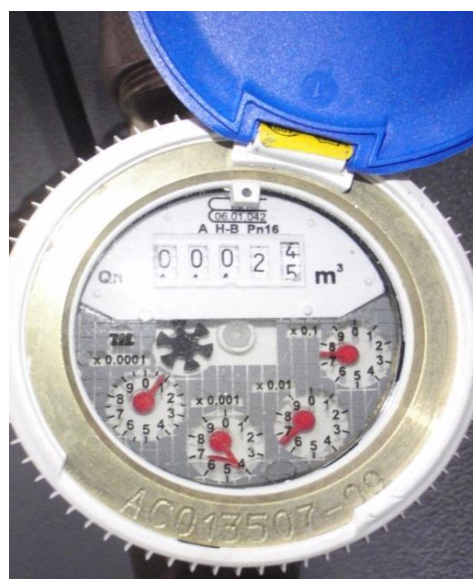


Figura 2-25: misuratore tetto - 22/05/2012



Figura 2-26: misuratore terreno – 22/05/2012

DATA	ORA	MISURATORE GIARDINO FILTRANTE -VOL [m³]	MISURATORE TETTO VERDE- VOL [m³]
21/05/2012	13:16	1,8418	23,9582
22/05/2012	10:16	2,8073	24,7641

Tabella 2-8: Dati registrati per la stima del coefficiente di deflusso del tetto verde e del giardino filtrante.

Il volume di acqua raccolto dal tetto e misurato dal LEM nel periodo di riferimento è di $0,8059 \text{ m}^3$. Questo valore comprende però anche la quota parte di acqua meteorica caduta sulla superficie dei moduli fotovoltaici che è possibile considerare impermeabile, ovvero con coefficiente di deflusso .

Dall'esperimento precedente (vedi 2.3.1. numero 2) è stato possibile ricavare il volume di precipitazione caduto sulla superficie dei moduli FV, pari a $0,7434 \text{ m}^3$, che deve essere tolto dal volume di acqua meteorica caduta e raccolta. Il volume di precipitazione totale da considerare è di quindi $0,6962 \text{ m}^3$ ed il contributo del solo tetto verde al deflusso risulta quindi essere pari a $0,0625 \text{ m}^3$.

Infine il coefficiente di deflusso del solo tetto verde risulta essere pari a:

Il valore ottenuto è molto al di sotto dei valori di letteratura indicati dai manuali (circa 30%) e dalle norme, questo perché la presenza dello strato di lapillo e la sua igroscopicità sono un grado di trattenere una buona quantità di acqua, diminuendo quindi la quantità di acqua che viene drenata dal tetto stesso.

In analogia con il tetto verde, anche per il giardino filtrante è stato calcolato il corrispondente coefficiente di deflusso.

Il volume di acqua raccolto dal misuratore a terra nelle 24 ore considerate è risultato pari a $0,9655 \text{ m}^3$.

Infine il coefficiente di deflusso del giardino filtrante risulta essere pari a:

Il valore ottenuto è di molto superiore ai valori di letteratura trovati. Occorrerebbe fare degli approfondimenti con altri eventi di precipitazione per validare o correggere questo valore.

2.3.3. TEST FOTOVOLTAICO

La quantificazione dei benefici dovuti all'interazione fra l'impianto solare fotovoltaico ed il verde pensile e dei benefici ottenibili dalla bagnatura dei pannelli fotovoltaici, rappresentano gli obiettivi dell'attività sperimentale descritta nel presente capitolo. A tal fine sono state eseguite campagne di misura della produzione di energia elettrica fotovoltaica dell'impianto posto in copertura del prototipo: in condizioni di bagnatura dei moduli fotovoltaici attraverso l'apposito impianto d'irrigazione, in condizioni di assenza di bagnatura ed, infine, in condizioni di assenza di bagnatura e copertura totale della superficie verde del tetto con guaine bituminose. Per ognuna delle prove eseguite sono state monitorate, attraverso la stazione meteorologica del prototipo, la radiazione solare incidente, la temperatura esterna, la temperatura di cella e la velocità del vento. La descrizione dettagliata degli esperimenti condotti è di seguito riportata.

2.3.3.1. ESPERIMENTO IN CONDIZIONE DI BAGNATURA DEI MODULI FOTOVOLTAICI (FV-1)

L'obiettivo del presente esperimento è quello di valutare come il sistema di raffreddamento dei pannelli fotovoltaici incida sul rendimento dell'impianto. Il test ha avuto inizio il 28 aprile 2012 e si è concluso il 13 maggio 2012.

Per i vincoli imposti dalla centralina che governa l'impianto di irrigazione, è stato deciso di eseguire cicli di bagnatura dei pannelli, della durata di un minuto, ogni trenta minuti partendo alle ore 11.00 fino alle ore 16.30. Il periodo di funzionamento del sistema di raffreddamento è stato scelto considerando le ore che durante la giornata sono caratterizzate da irraggiamento solare elevato e, di conseguenza, elevate temperature di cella.

Nella seguente tabella vengono riassunti i dati descrittivi del presente esperimento eseguito sul prototipo di Genera:

ESPERIMENTO IN CONDIZIONE DI BAGNATURA DEI MODULI FOTOVOLTAICI	
Periodo svolgimento esperimento	Dal 28/04/2012 al 13/05/2012
Accensione impianto	Ore 11.00
Spegnimento impianto	Ore 16.30
N° cicli di irrigazione giornalieri	12
Durata ciclo di irrigazione	1'
Frequenza accensioni	Ogni 30'
ΔT_{medio} raggiunto ad ogni ciclo	14°C

Tabella 2-9: Dati generali descrittivi dell'esperimento FV-1.

In figura 2.31 viene riportato il grafico rappresentante gli andamenti dell'irraggiamento solare (Solar Rad) e della temperatura dei pannelli (Soil Temp 1). Il nome attribuito alla temperatura dei pannelli, Soil Temp 1, che significa temperatura del terreno, è dovuto al fatto che nel software WeatherLink non è possibile modificare le nomenclature di input e non vi sono ingressi preimpostati per la temperatura dei pannelli solari, di conseguenza, si è deciso di inserire il cavo del sensore che misura la temperatura della cella nella porta adibi-

ta ad un eventuale sonda del terreno. Dal punto di vista funzionale non comporta nessun tipo di ostacolo, in quanto la grandezza fisica misurata è la stessa.

Osservando il grafico si può facilmente notare come, sia l'irraggiamento che la temperatura dei pannelli, hanno un intervallo di valori massimi tra le 11.00 e le 16.00, evidenziando uno stretto legame tra l'innalzamento delle due grandezze fisiche caratterizzato da un lieve ritardo della temperatura dei pannelli rispetto all'irraggiamento solare.

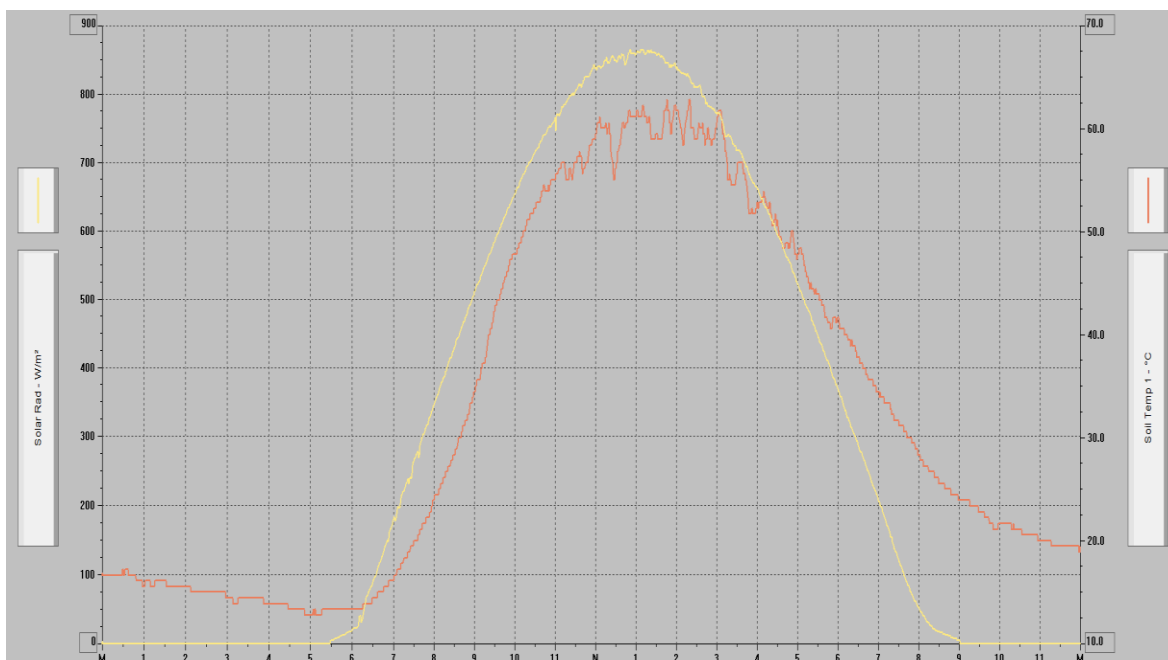


Figura 2-27: Andamenti Irraggiamento Solare e Temperatura dei Pannelli in una giornata tipo.
L'irraggiamento solare, in giallo, è misurato in W/m^2 , mentre la temperatura dei pannelli, in rosso, è misurata in $^{\circ}C$.

Il surriscaldamento dei pannelli, ed il conseguente abbattimento delle loro prestazioni, è condizionato da diversi fattori, quali la temperatura esterna, la direzione del vento, velocità del vento, l'umidità relativa dell'aria e l'irraggiamento solare, che domina su tutti gli altri fattori considerata anche la zona geografica in cui è insediato il prototipo di Genera.

Il sistema di raffreddamento dell'impianto fotovoltaico ha il compito di abbassare la temperatura dei pannelli con l'intento di mantenerla sotto un certo valore, per ottimizzare il rendimento dei pannelli stessi, raggiungendo un giusto compromesso tra aumento di redditività dell'impianto e consumo di acqua. La determinazione dell'intervallo ottimale di temperatura in cui far lavorare i pannelli sarà oggetto di studio al termine della fase sperimentale.

In figura 2.32 si nota il comportamento della temperatura dei pannelli nella fascia oraria in cui il sistema di raffreddamento è in funzione:

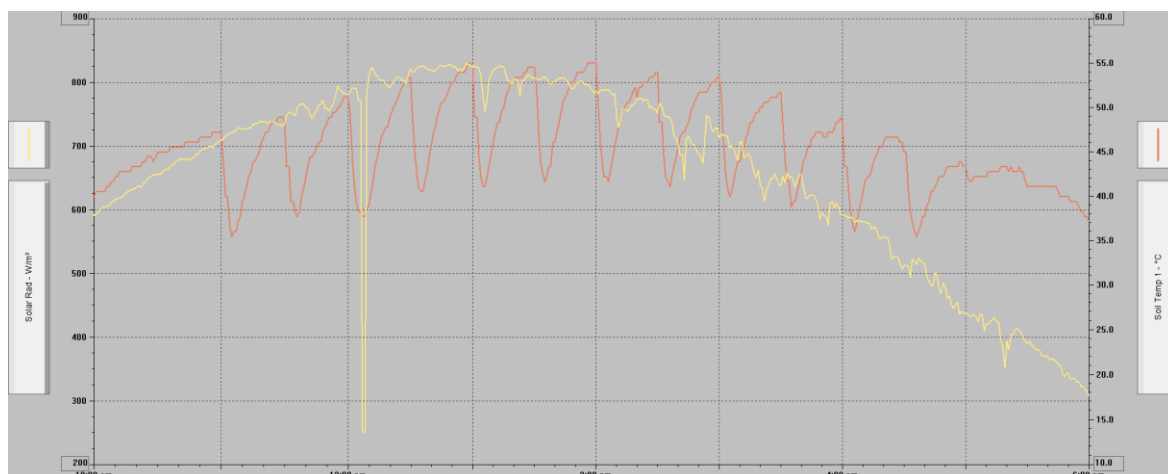


Figura 2-28: Comportamento della Temperatura dei pannelli con sistema di raffreddamento attivo

I dati vengono acquisiti da WeatherLink e da MaxTalk con una frequenza di 1 minuto. I due software hanno, però, un diverso metodo di acquisizione in quanto WeatherLink fornisce un valore mediato su tutto il periodo di rilevazione (1min), mentre MaxTalk estrae i dati puntuali con la frequenza pari a 1 minuto.

Terminata la fase di sperimentazione, si è passati all'elaborazione dei dati raccolti. Per valutare l'influenza che l'impianto di raffreddamento ha sulla produzione di energia elettrica, sono state rapportate la potenza trasmessa dai pannelli all'inverter con la potenza teoricamente sfruttabile. Il motivo per cui è stato deciso di considerare il dato di potenza a monte dell'inverter è dato dal fatto che non si volevano considerare le perdite di carico che avvengono all'interno dell'inverter nel passaggio da corrente continua in corrente alternata.

La potenza teoricamente sfruttabile è il prodotto tra l'irraggiamento solare intercettato dai pannelli fotovoltaici e la superficie complessiva dei moduli caratterizzata dalla sua posizione (Azimut) e dall'inclinazione (Tilt). È stato convertito il dato di irraggiamento solare per un metro quadrato sul piano orizzontale (fornito da WeatherLink) nel piano inclinato e per la superficie effettiva che caratterizzano l'impianto fotovoltaico del progetto Genera, utilizzando il programma di simulazione dinamica Trnsys 16.

In tabella 2.10 vengono riportati i dati utilizzati in questo calcolo:

Nomenclatura	Valore	Unità di misura
Irraggiamento solare sul piano orizzontale	Da WeatherLink	W/m ²
Latitudine	44°29' N	
Costante solare	1353	W/m ²
Spostamento dell'ora solare	-3,84	Gradi
Coefficiente di riflessione del tetto verde	0,2	
Inclinazione pannelli fotovoltaici (Tilt)	6	Gradi
Azimut pannelli solari	9	Gradi

Tabella 2-10: Dati generali per la conversione dell'irraggiamento solare

Determinato l'esatto valore di irraggiamento, minuto per minuto, che incide sui pannelli fotovoltaici è stato possibile calcolare la potenza teoricamente sfruttabile e compararla con la potenza effettivamente sviluppata (figura 2.33).

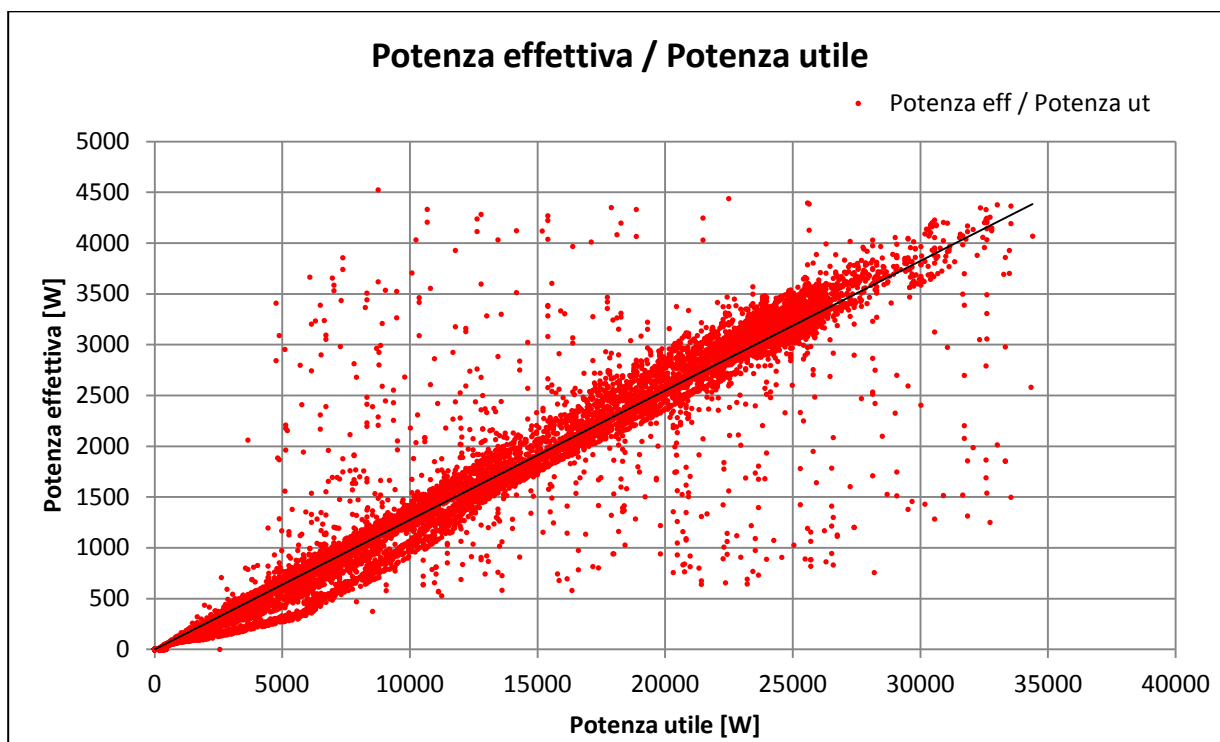


Figura 2-29: Diagramma tra Potenza effettiva e Potenza utile

Il rapporto tra la potenza effettiva e la potenza utile è il rendimento dell'impianto fotovoltaico in quanto:

(1)

dove I e S sono rispettivamente l'irraggiamento solare in W/m^2 e la superficie occupata dai pannelli solari in m^2 ; ed il rendimento dell'impianto fotovoltaico a meno delle perdite che si hanno a valle dei pannelli è:

(2)

dove $P_{\text{effettiva}}$ è il dato reale che viene acquisito, ogni minuto, tramite MaxTalk.

In figura 2.33, ogni punto rosso rappresenta la potenza ottenuta riferita ad una precisa potenza utile. Il rapporto tra le potenze, in un determinato minuto del periodo di esecuzione del test, deve risultare ≤ 1 perché, come sopra dimostrato, rappresentano il rendimento dell'impianto in un certo istante. È possibile quindi affermare che tutti i valori individuati che sono maggiore di 1 sono errori, dovuti alle differenti modalità di acquisizione dati che caratterizzano i software WeatherLink e MaxTalk.

Per capire meglio il motivo della presenza di errori si pensi ad un generico minuto in cui si ha per 50 sec un irraggiamento molto basso dovuto alla presenza di nuvole che oscurano i pannelli solari, mentre gli ultimi 10 sec le nubi si spostano e l'irraggiamento si porta a livel-

li molto elevati. Allo scadere del minuto WeatherLink, che fornisce un dato mediato sul periodo di acquisizione, avrà in output un valore di radiazione solare molto basso rispetto agli ultimi 10 sec di sole, mentre MaxTalk, che rileva il dato puntuale di potenza erogata allo scadere del minuto, fornisce un valore elevato. È immediato capire come il rapporto tra queste due potenze è viziato dal passaggio della nuvola, falsando così il calcolo del rendimento in quel dato periodo. Analogamente si giustificano i picchi negativi di rendimento considerando un minuto di acquisizione caratterizzato da 50 sec di sole e gli ultimi 10 sec di nuvole.

Il valore medio del rendimento dell'impianto fotovoltaico durante l'esperimento FV-1 è stato di:

(3)

2.3.3.2. ESPERIMENTO IN CONDIZIONE DI ASSENZA DI BAGNATURA DEI MODULI FOTOVOLTAICI (FV-2)

Terminato l'esperimento FV-1, sono stati acquisiti i medesimi dati con il sistema di raffreddamento spento, in modo da poter confrontare i risultati e scoprire quanto incida effettivamente l'abbassamento della temperatura delle celle, tramite bagnatura dei moduli, sulla produzione di energia elettrica con pannelli fotovoltaici.

Il periodo di acquisizione scelto va dal 01/06/2012 al 30/06/2012.

Analogamente all'esperimento FV-1, i dati rilevati dell'irraggiamento solare sul piano orizzontale, sono stati convertiti e sono stati calcolati i valori relativi alla posizione geografica ed agli angoli di Tilt e Azimut che caratterizzano i moduli dell'impianto fotovoltaico del progetto Genera.

Di conseguenza è stato possibile calcolare la potenza teoricamente sfruttabile e compararla con la potenza effettivamente sviluppata (figura 2.34):

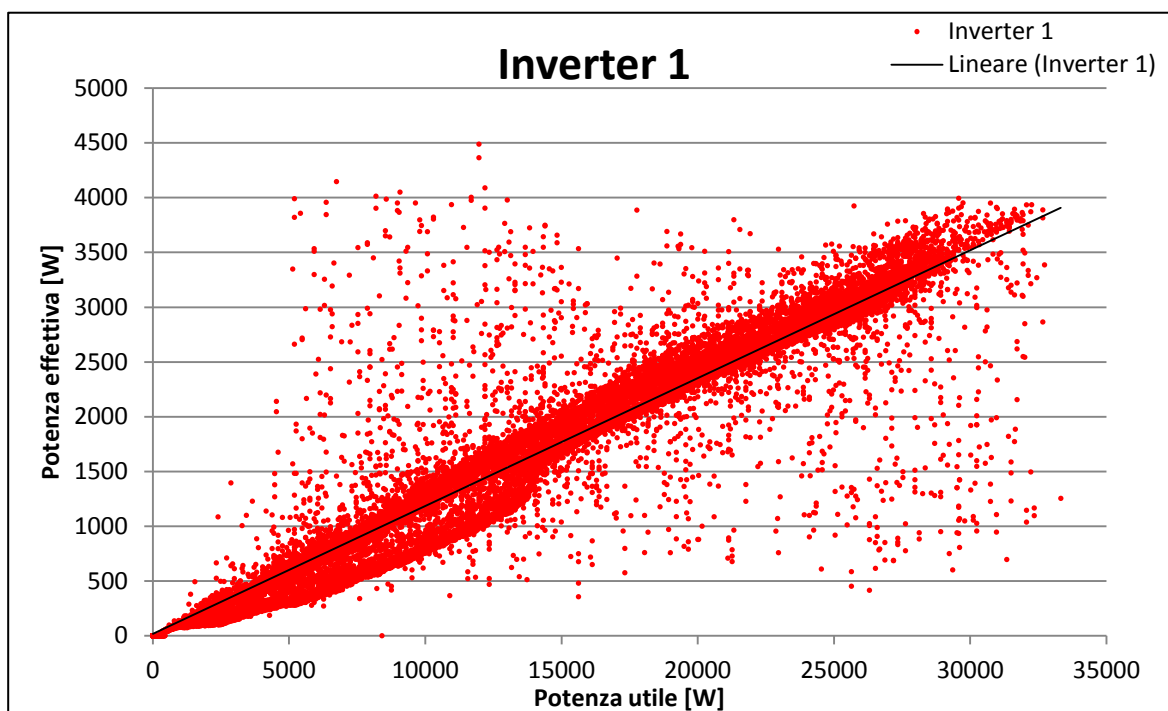


Figura 2-30: Diagramma tra Potenza effettiva e Potenza utile

Il valore medio del rendimento dell'impianto fotovoltaico durante l'esperimento FV-1 è stato di:

(4)

2.3.3.3. CONFRONTO DEGLI ESPERIMENTI FV-1 E FV-2

La differenza tra le medie di rendimento è di 1,85 punti percentuali. Bisogna notare come il miglioramento è spalmato su tutto il periodo di prova, anche sulle ore in cui l'impianto di raffrescamento è spento e che, per i vincoli imposti dalla centralina dell'impianto di irrigazione, la frequenza con cui è stato attivato l'impianto di raffrescamento è molto bassa. Dall'analisi dei dati sperimentali è stato possibile constatare come sia possibile variare la frequenza di bagnatura, accorciando gli intervalli fra una bagnatura e quella successiva, per ottenere degli incrementi di producibilità maggiori. Lo studio della dipendenza della producibilità dalla frequenza di bagnatura, tenendo conto dei consumi idrici, potrà essere oggetto di futuri approfondimenti.

Un altro aspetto che si vuole mettere in evidenza è come la temperatura esterna influisca sulla potenza effettiva erogata dall'impianto. A questo scopo è stato studiato l'andamento della potenza effettiva rispetto alla potenza utile per vari intervalli di temperatura esterna, considerando solamente i periodi della giornata in cui l'irraggiamento solare ha superato il valore di 700W/m^2 (che equivalgono a 22.050 W per inverter).

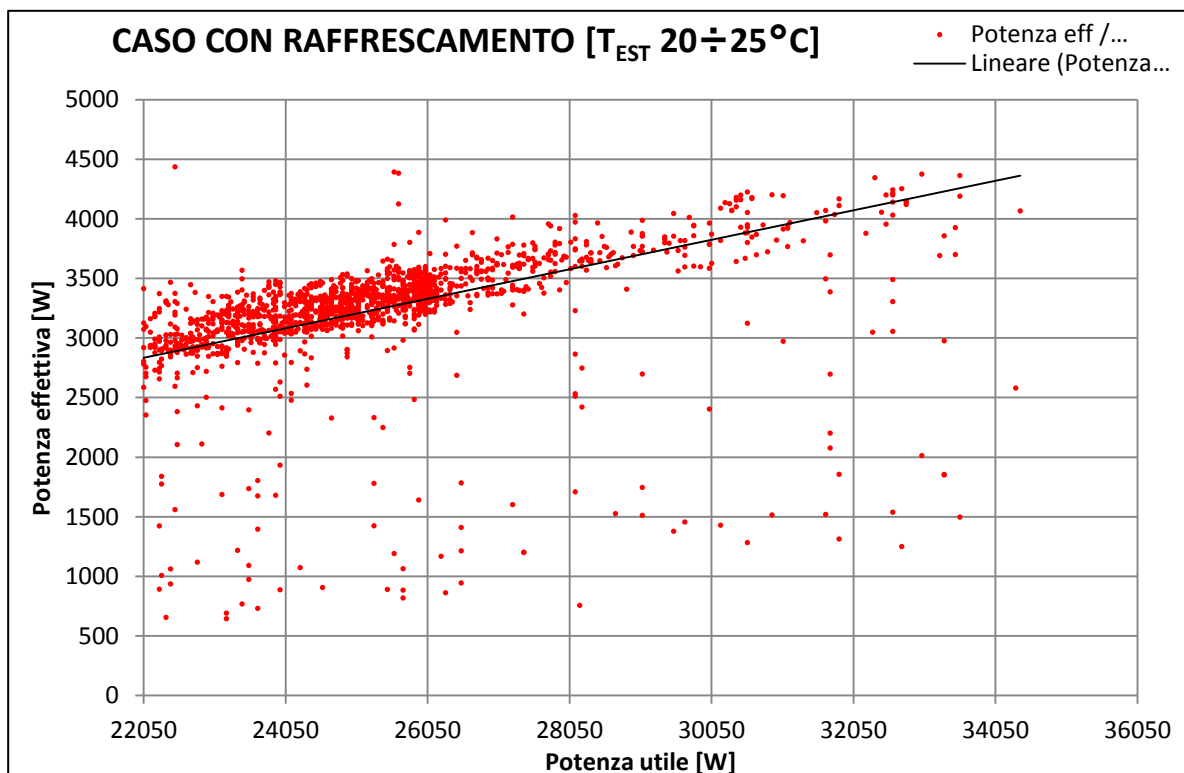


Figura 2-31: Caso con impianto di raffrescamento attivo, tra 20÷25°C

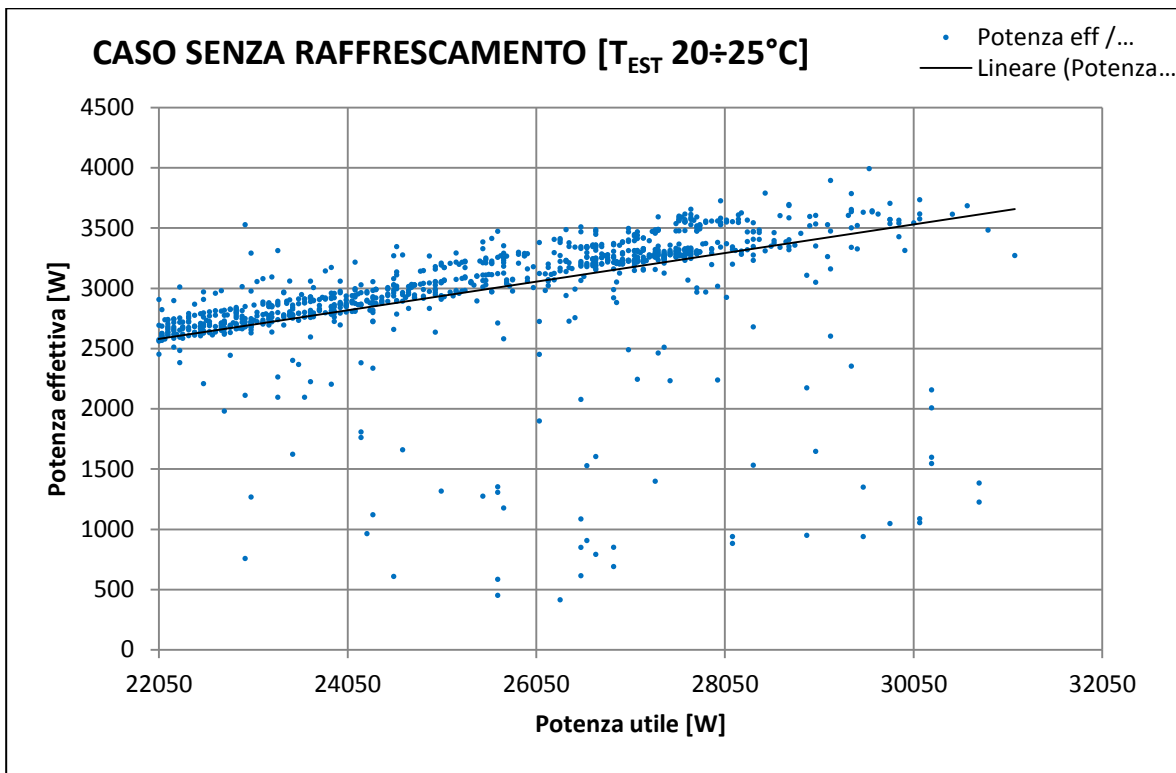


Figura 2-32: Caso con impianto di raffrescamento disattivo, tra 20÷25°C.

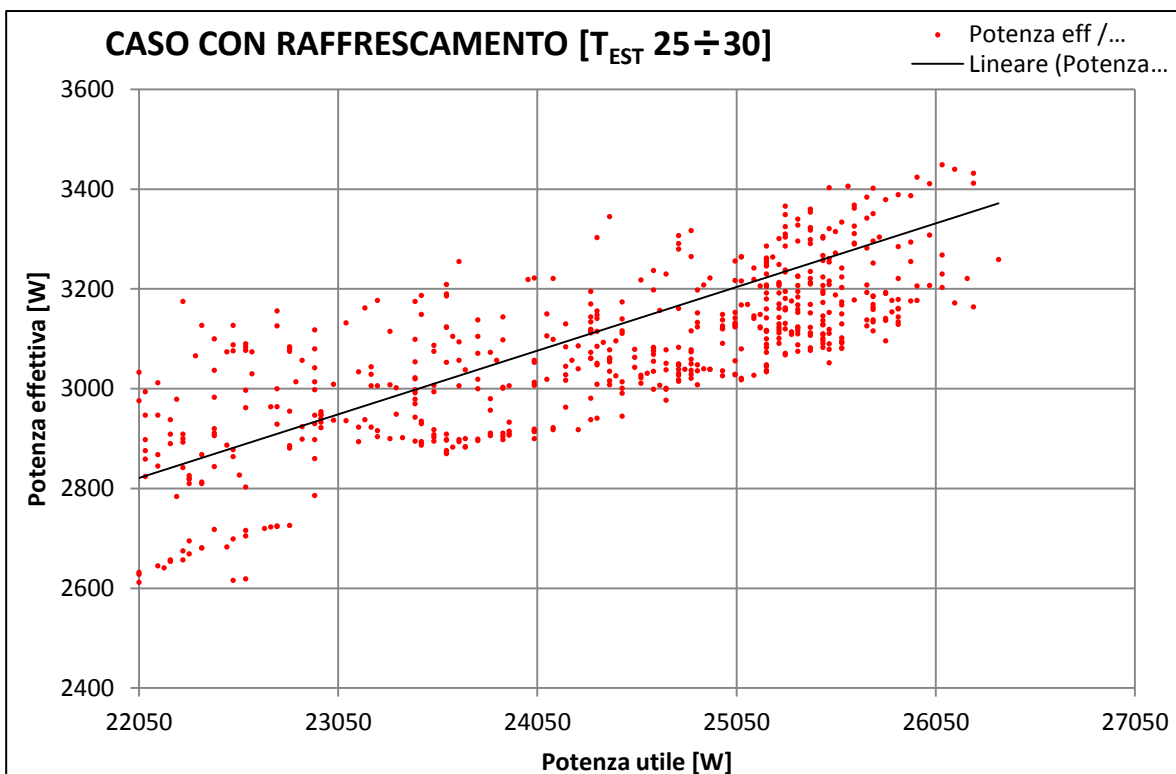


Figura 2-33: Caso con impianto di raffrescamento attivo, tra 25÷30°C

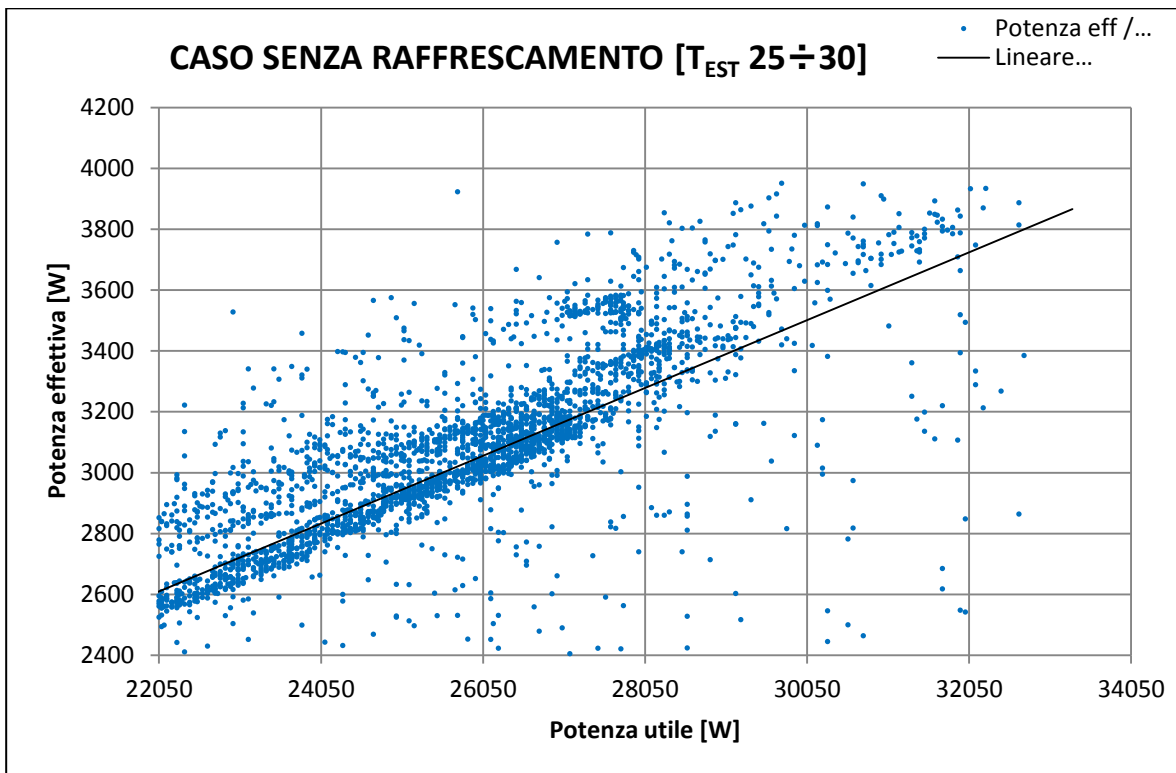


Figura 2-34: Caso con impianto di raffrescamento disattivo, tra 25÷30°C

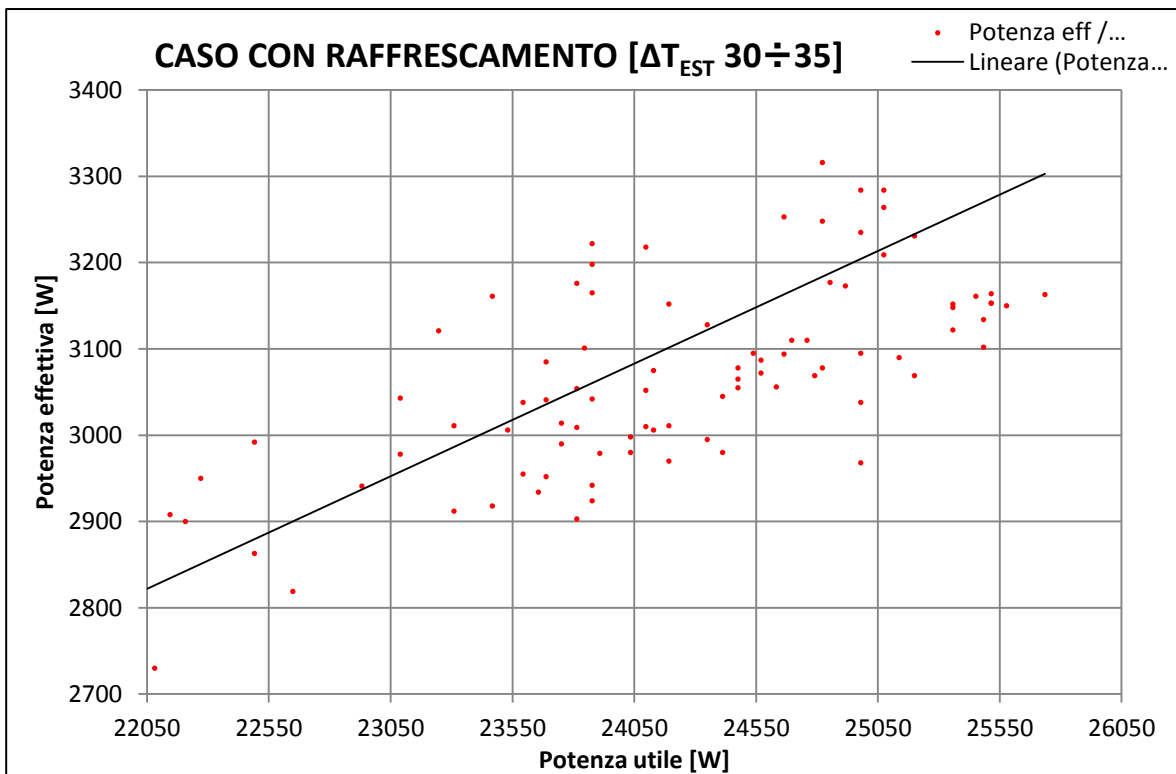


Figura 2-35: Caso con impianto di raffrescamento attivo, tra 30÷35°C

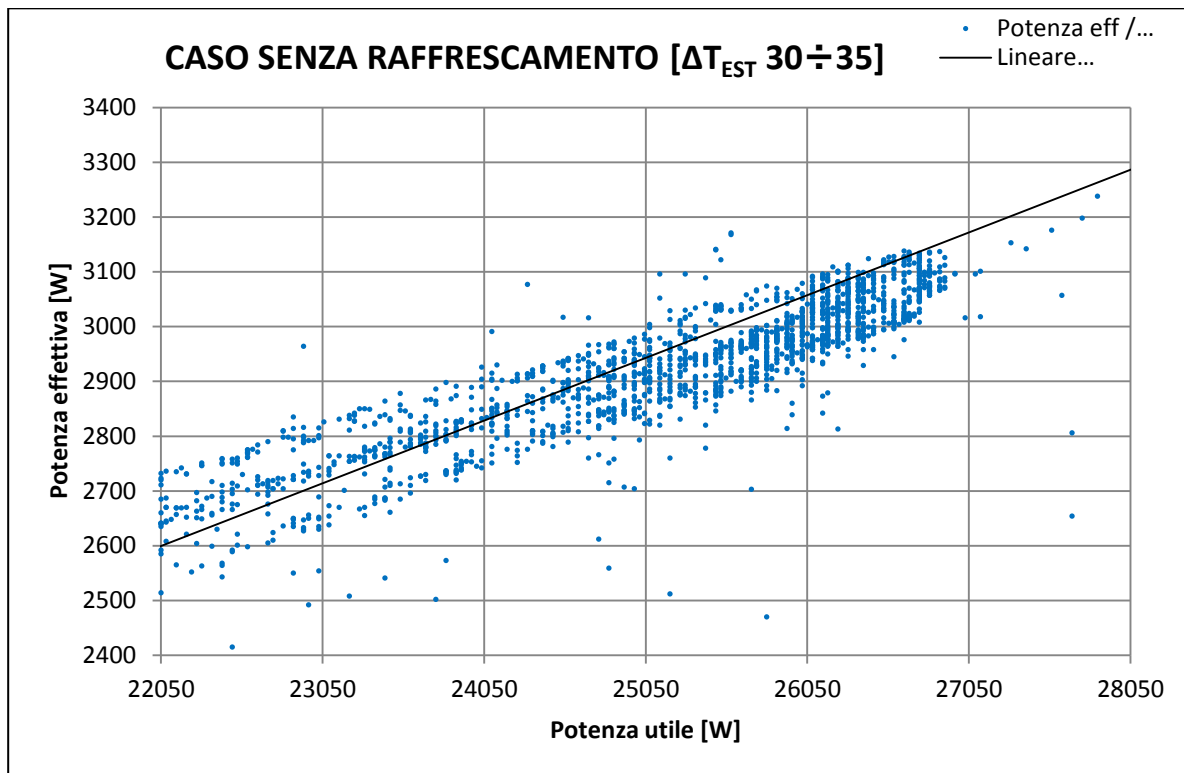


Figura 2-36: Caso con impianto di raffrescamento disattivo, tra 30÷35°C

Per ogni fissato intervallo di temperatura dell'aria esterna, le elaborazioni di seguito riportate, sono state ottenute considerando i dati riferiti a diversi intervalli di radiazione solare:

- Rendimento medio con impianto di raffrescamento attivo (η_m con raff.)
- Rendimento medio con impianto di raffrescamento non attivo (η_m senza raff.)
- Numero di dati considerati per il calcolo del η_m con raff.
- Numero di dati considerati per il calcolo del η_m senza raff.
- Incremento percentuale del rendimento dell'impianto fotovoltaico nelle due modalità di funzionamento.

Così facendo è stato possibile osservare l'andamento dei valori calcolati, a parità di temperatura dell'aria esterna, in funzione della radiazione solare incidente.

20 ÷ 22	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,137	0,121	68	45	13,2
650 ÷ 700	0,138	0,117	84	37	17,9
700 ÷ 750	0,133	0,123	128	15	8,1
750 ÷ 800	0,132	0,129	252	7	2,3
800 ÷ 850	0,131	0,117	312	10	12,0

Tabella 2-11: Intervallo di temperatura 20 ÷ 22 °C

22 ÷ 24	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,139	0,118	84	190	17,8
650 ÷ 700	0,134	0,119	63	87	12,6
700 ÷ 750	0,133	0,12	128	116	10,8
750 ÷ 800	0,131	0,116	180	60	12,9
800 ÷ 850	0,133	0,109	108	37	22,0
850 ÷ 900	0,135	0,116	35	105	16,4
900 ÷ 950	0,131	0,109	16	34	20,2

Tabella 2-12: intervallo di temperatura 22 ÷ 24°C

24 ÷ 26	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,14	0,125	11	189	12,0
650 ÷ 700	0,134	0,118	36	146	13,6
700 ÷ 750	0,132	0,117	54	190	12,8
750 ÷ 800	0,13	0,118	110	292	10,2
800 ÷ 850	0,127	0,117	77	342	8,5

Tabella 2-13: intervallo di temperatura 24 ÷ 26°C

26 ÷ 28	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,134	0,119	36	258	12,6
650 ÷ 700	0,134	0,121	31	233	10,7
700 ÷ 750	0,129	0,121	66	174	6,6
750 ÷ 800	0,124	0,119	159	197	4,2
800 ÷ 850	0,126	0,116	62	326	8,6

Tabella 2-14: intervallo di temperatura 26 ÷ 28°C

28 ÷ 30	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,13	0,121	17	108	7,4
650 ÷ 700	0,131	0,118	44	194	11,0
700 ÷ 750	0,129	0,118	43	253	9,3
750 ÷ 800	0,126	0,117	25	301	7,7
800 ÷ 850	0,125	0,116	95	326	7,8

Tabella 2-15: intervallo di temperatura 28 ÷ 30°C

30 ÷ 32	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,131	0,124	8	70	5,6
650 ÷ 700	0,131	0,12	21	99	9,2
700 ÷ 750	0,129	0,12	18	116	7,5
750 ÷ 800	0,127	0,116	59	275	9,5
800 ÷ 850	0,124	0,115	7	692	7,8

Tabella 2-16: intervallo di temperatura 30 ÷ 32°C

Nelle figura 2-41 e 2-42 sono riportati gli andamenti del rendimento dell'impianto fotovoltaico a parità di temperatura dell'aria esterna ed in funzione dell'irraggiamento solare. Gli andamenti sono stati riportati per differenti valori della temperatura dell'aria. Per maggiore chiarezza si specifica che, per la costruzione dei grafici, sono stati considerati tutti i dati di rendimento che sono stati acquisiti, per il primo nella modalità di funzionamento con il sistema di raffreddamento attivo, mentre, per il secondo grafico, con il sistema spento.

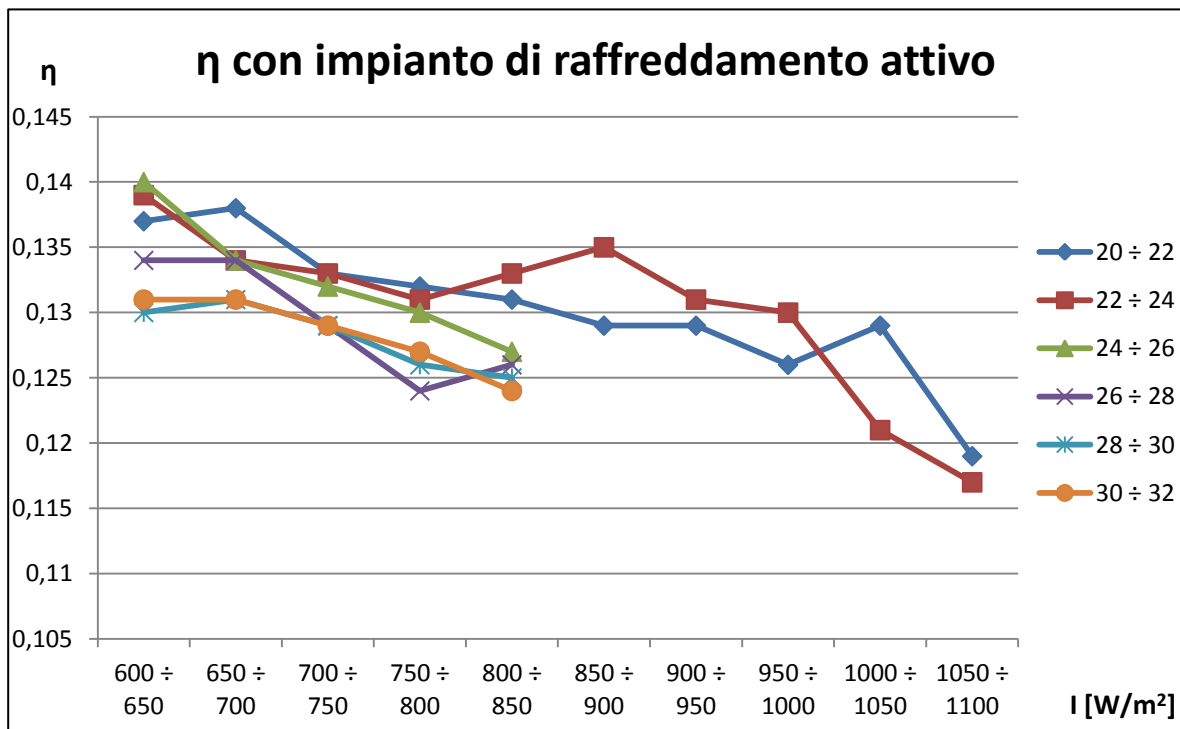


Figura 2-37: Andamenti rendimento con sistema di raffreddamento attivo

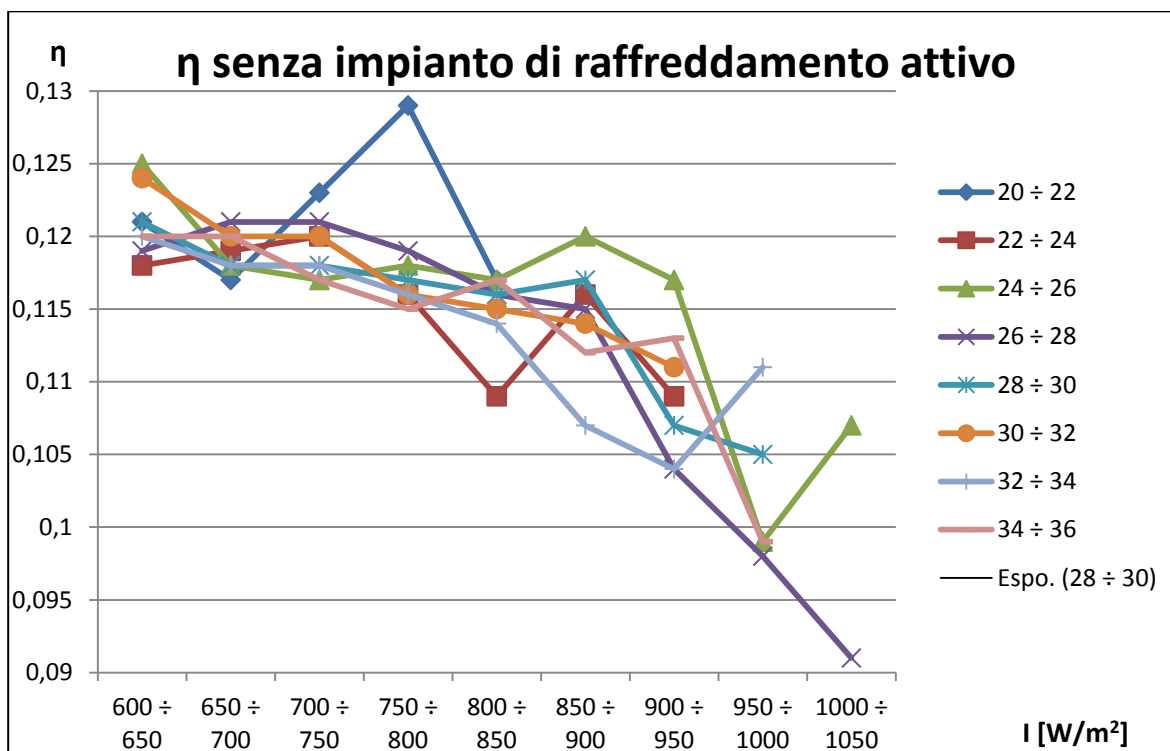


Figura 2-38: Andamenti rendimento con sistema di raffreddamento non attivo

Successivamente sono stati graficati (dalla figura 2-43 alla figura 2-47) gli andamenti dei rendimenti, ottenuti nelle due modalità di funzionamento dell'impianto fotovoltaico, in funzione della temperatura ambiente. In questi grafici vengono evidenziati sia la differenza di rendimento tra impianto di raffreddamento attivo e spento, e l'equazione delle linee di tendenza che approssimano bene gli andamenti in funzione delle temperatura ambiente.

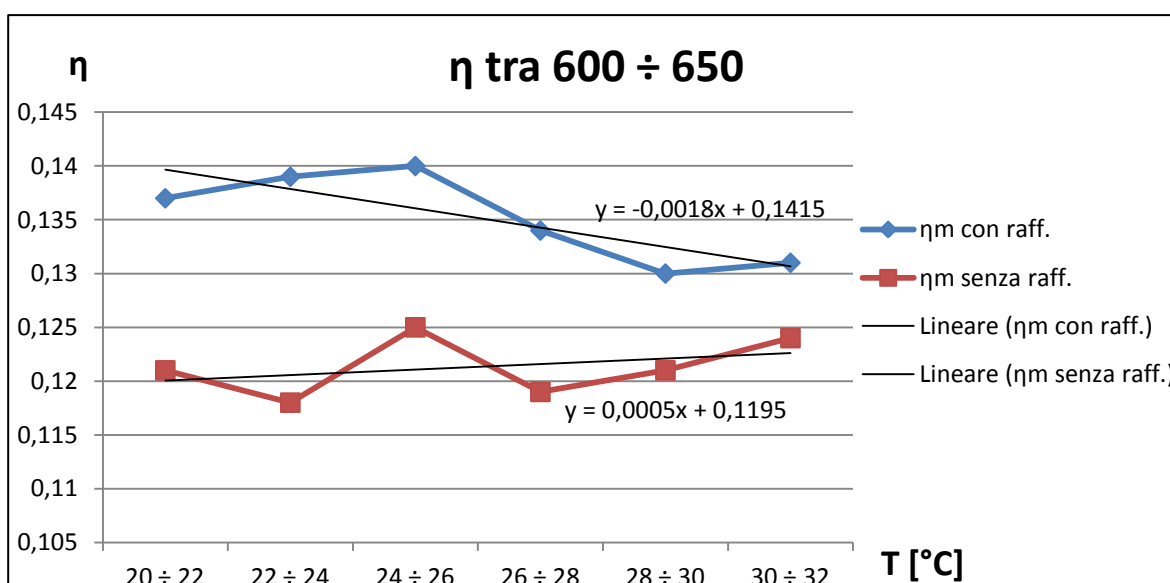


Figura 2-39: Andamento dei rendimenti (con sistema di raffreddamento attivo e spento) nell'intervallo di irraggiamento solare tra 600 e 650, in funzione della temperatura ambientale

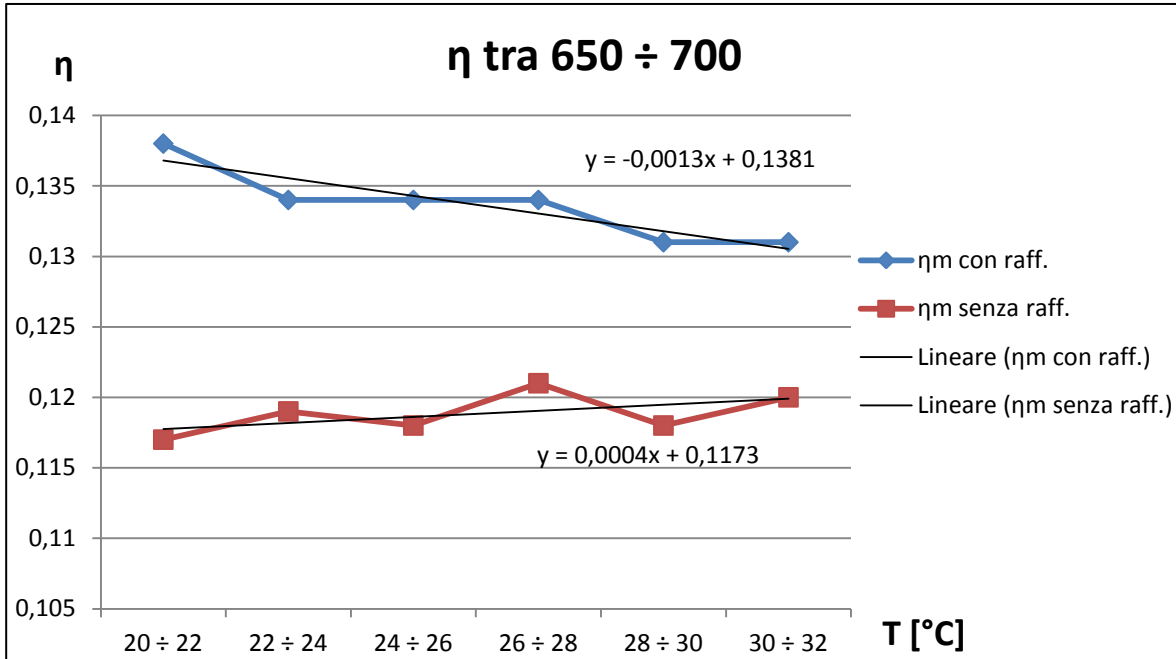


Figura 2-40: Andamento dei rendimenti (con sistema di raffreddamento attivo e spento) nell'intervallo di irraggiamento solare tra 650 e 700, in funzione della temperatura ambientale

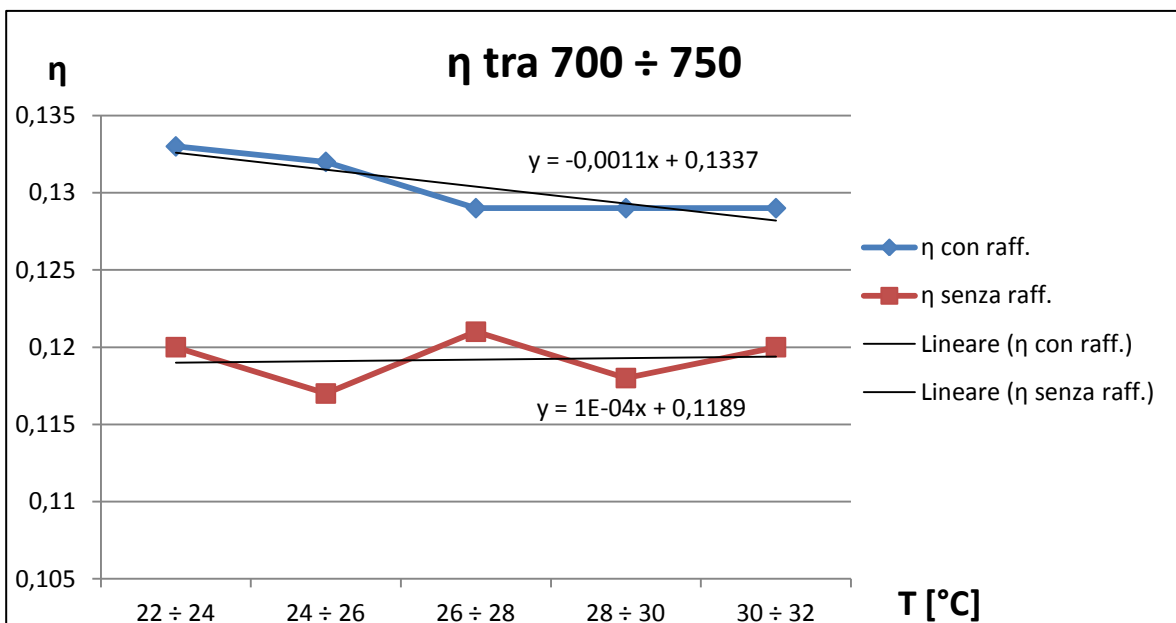


Figura 2-41: Andamento dei rendimenti (con sistema di raffreddamento attivo e spento) nell'intervallo di irraggiamento solare tra 700 e 750, in funzione della temperatura ambientale

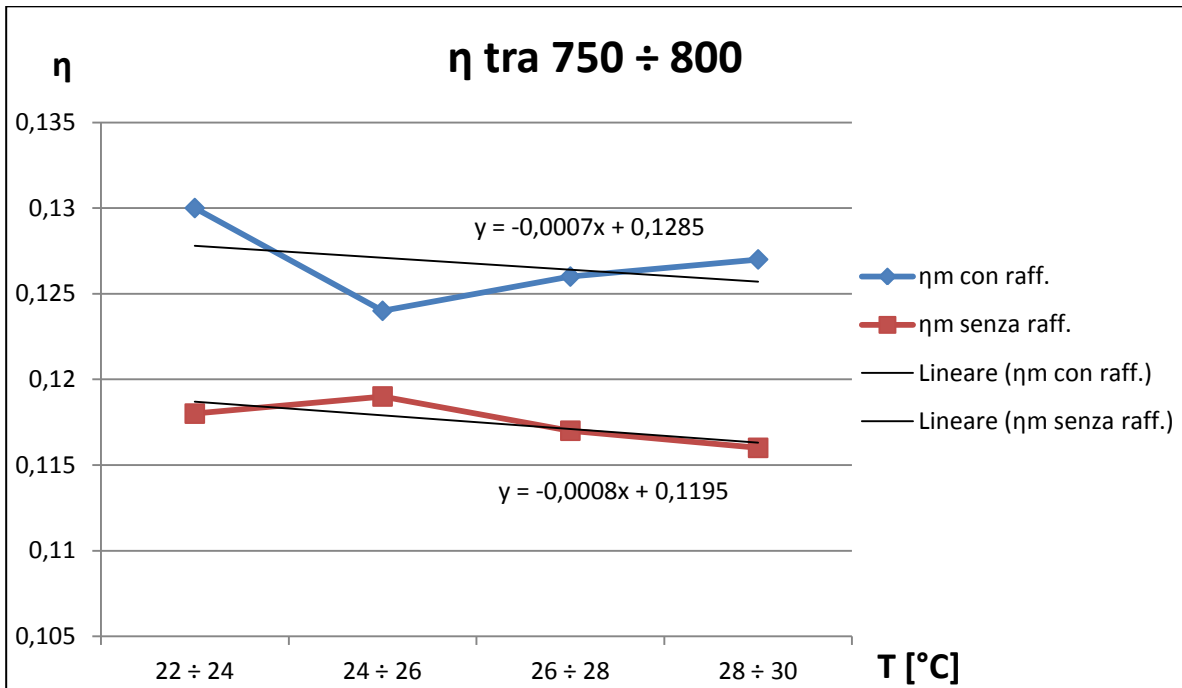


Figura 2-42: Andamento dei rendimenti (con sistema di raffreddamento attivo e spento) nell'intervallo di irraggiamento solare tra 750 e 800, in funzione della temperatura ambientale

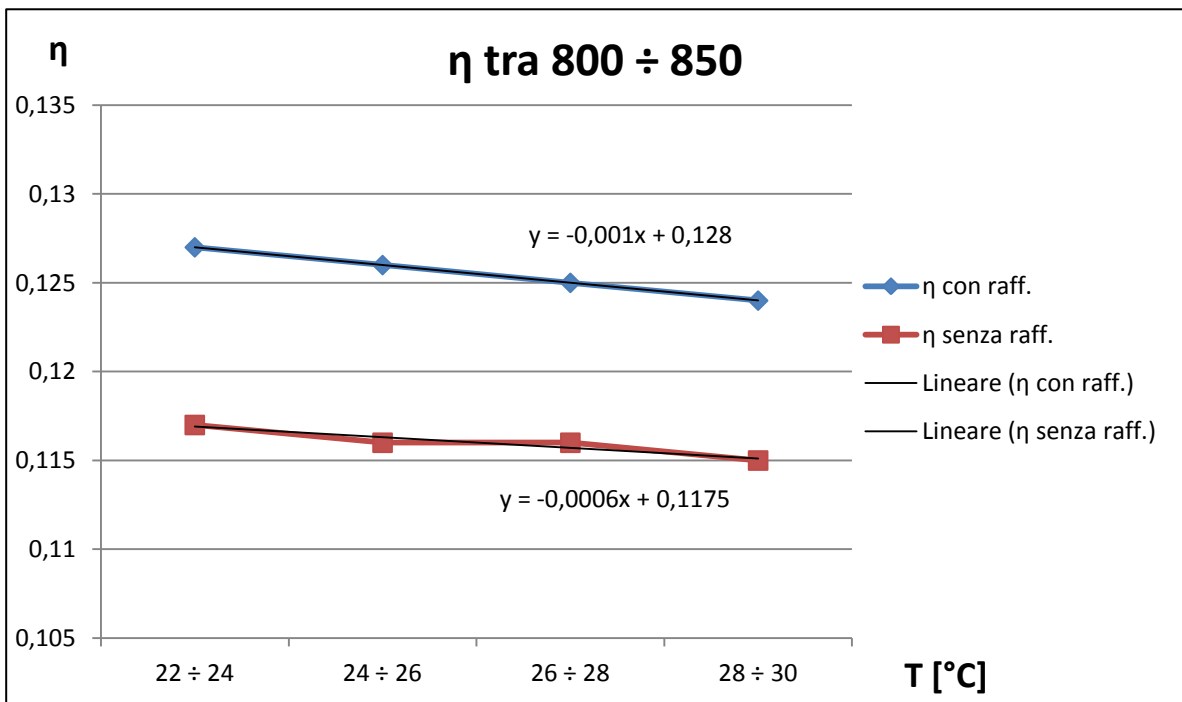


Figura 2-43: Andamento dei rendimenti (con sistema di raffreddamento attivo e spento) nell'intervallo di irraggiamento solare tra 800 e 850, in funzione della temperatura ambientale

Per determinare l'incremento percentuale ottenibile installando il sistema di raffrescamento presente sul prototipo Genera, sono stati tenuti in considerazione i seguenti dati di entrambe le modalità di funzionamento dell'impianto:

- Rendimento medio calcolato in determinati intervalli di irraggiamento solare e temperatura esterna
- Temperatura media esterna
- Numero di dati a disposizione per i singoli intervalli di dati acquisiti
- Temperatura media pesata in base al numero di dati a disposizione nel caso di sistema di raffrescamento attivo e spento.

Le successive cinque tabelle riportano i suddetti dati per gli intervalli d'irraggiamento considerati e vengono accompagnati dai grafici degli andamenti dell'incremento percentuale del rendimento in funzione della temperatura esterna.

600 ÷ 650 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
20 ÷ 22	21,03	20,97	21,01	0,137	0,121	68	45	13,2
22 ÷ 24	23,11	23,31	23,25	0,139	0,118	84	190	17,8
24 ÷ 26	25,48	24,92	24,95	0,14	0,125	11	189	12,0
26 ÷ 28	26,64	26,94	26,90	0,134	0,119	36	258	12,6
28 ÷ 30	28,95	29,1	29,08	0,13	0,121	17	108	7,4
30 ÷ 32	31,09	31,33	31,31	0,131	0,124	8	70	5,6

Tabella 2-17: Intervallo di irraggiamento solare 600 ÷ 650 [W/m²]

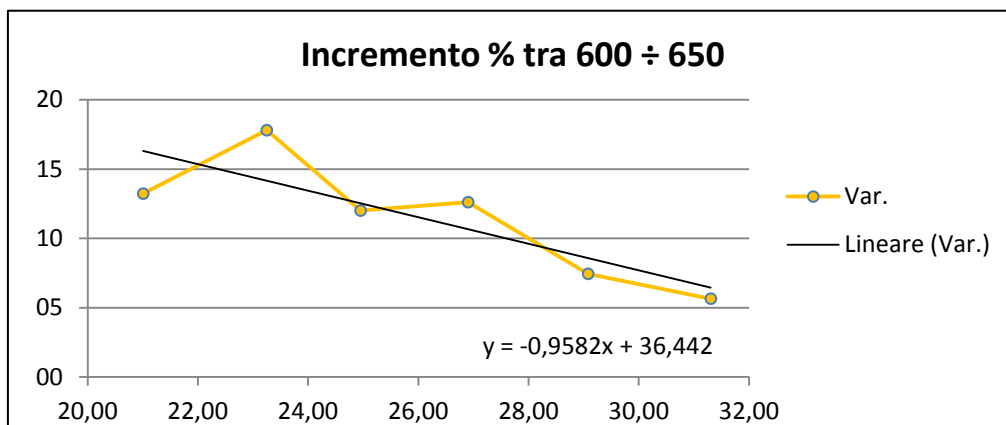


Figura 2-44: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 600 ÷ 650 [W/m²] di irraggiamento solare

650 ÷ 700 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
20 ÷ 22	21,2	21,29	21,23	0,138	0,117	84	37	17,9
22 ÷ 24	22,86	23,42	23,18	0,134	0,119	63	87	12,6
24 ÷ 26	25,05	24,74	24,80	0,134	0,118	36	146	13,6
26 ÷ 28	26,54	27,05	26,99	0,134	0,121	31	233	10,7
28 ÷ 30	28,72	29,11	29,04	0,131	0,118	44	194	11,0
30 ÷ 32	30,96	31,26	31,21	0,131	0,12	21	99	9,2

Tabella 2-18: Intervallo di irraggiamento solare 650 ÷ 700 [W/m²]

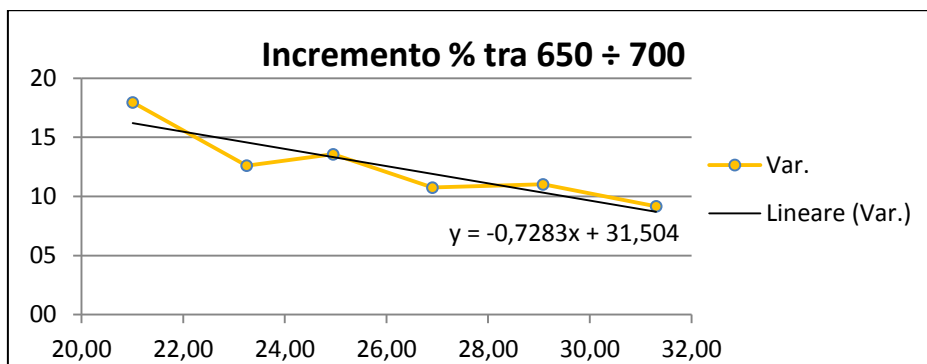


Figura 2-45: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 650 ÷ 700 [W/m²] di irraggiamento solare

700 ÷ 750 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
22 ÷ 24	22,71	23,38	23,03	0,133	0,12	128	116	10,8
24 ÷ 26	25,5	24,9	25,03	0,132	0,117	54	190	12,8
26 ÷ 28	26,65	27,25	27,09	0,129	0,121	66	174	6,6
28 ÷ 30	28,8	29,22	29,16	0,129	0,118	43	253	9,3
30 ÷ 32	30,63	31,24	31,16	0,129	0,12	18	116	7,5

Tabella 2-19: Intervallo di irraggiamento solare 700 ÷ 750 [W/m²]

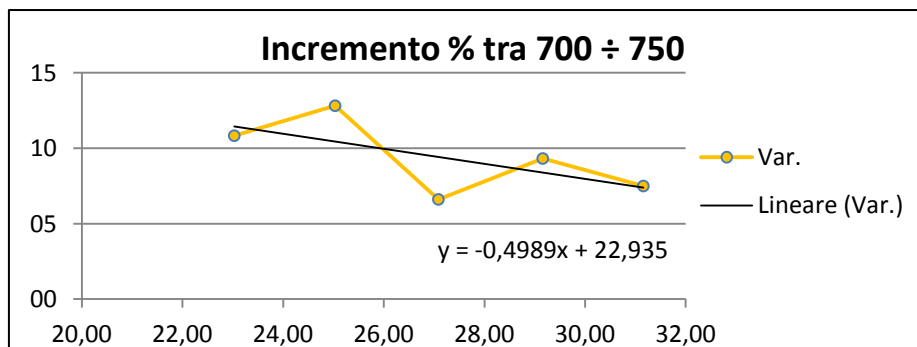


Figura 2-46: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 700 ÷ 750 [W/m²] di irraggiamento solare

750 ÷ 800 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
24 ÷ 26	24,83	25,08	25,01	0,13	0,118	110	292	10,2
26 ÷ 28	27,1	27,12	27,11	0,124	0,119	159	197	4,2
28 ÷ 30	28,62	28,88	28,86	0,126	0,117	25	301	7,7
30 ÷ 32	30,49	30,89	30,82	0,127	0,116	59	275	9,5

Tabella 2-20: Intervallo di irraggiamento solare 750 ÷ 800 [W/m²]

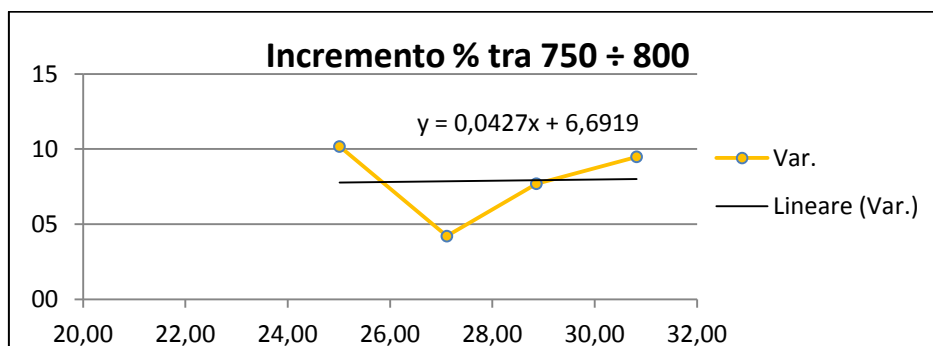


Figura 2-47: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 750 ÷ 800 [W/m²] di irraggiamento solare

800 ÷ 850 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
24 ÷ 26	24,82	25,14	25,08	0,127	0,117	77	342	8,5
26 ÷ 28	27,57	26,96	27,06	0,126	0,116	62	326	8,6
28 ÷ 30	29,06	29,09	29,08	0,125	0,116	95	326	7,8
30 ÷ 32	30,16	31,04	31,03	0,124	0,115	7	692	7,8

Tabella 2-21: Intervallo di irraggiamento solare 800 ÷ 850 [W/m²]

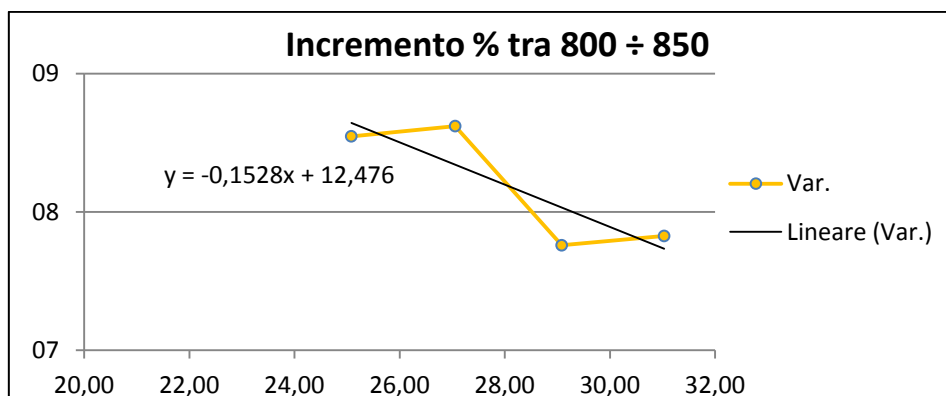


Figura 2-48: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 800 ÷ 850 [W/m²] di irraggiamento solare

Le equazioni trovate saranno riutilizzate nel capitolo 3 (Attività modellistica) per il calcolo dell'incremento di rendimento annuo dell'impianto fotovoltaico ottenibile grazie all'abbattimento della temperatura delle celle per effetto dell'azione del sistema di raffreddamento.

2.3.3.4. ESPERIMENTO IN CONDIZIONE DI ASSENZA DI BAGNATURA DEI MODULI FOTOVOLTAICI E COPERTURA DEL TETTO VERDE FV-3

Volendo dimostrare come il sistema integrato del prototipo Genera incida sulla produttività annua di un impianto fotovoltaico, è stato deciso di monitorare e acquisire i dati per la seguente configurazione del prototipo:

- Sistema di raffreddamento moduli: non attivo
- Irrigazione verde pensile: non attiva
- Verde pensile: è stata applicata una copertura bituminosa per annullare gli effetti.

In questo modo sono state ricreate le condizioni normali in cui generalmente ci si imbatte nel parco fotovoltaico ad oggi installato.

Il periodo di acquisizione scelto va dal 03/08/2012 al 13/09/2012.

Analogamente agli esperimenti precedenti, i dati rilevati dell'irraggiamento solare sul piano orizzontare, sono stati convertiti e sono stati calcolati i valori relativi alla posizione geografica ed agli angoli di Tilt e Azimut che caratterizzano i moduli dell'impianto fotovoltaico del progetto Genera.

Di conseguenza è stato possibile calcolare la potenza teoricamente sfruttabile e compararla con la potenza effettivamente sviluppata (figura 2.53):

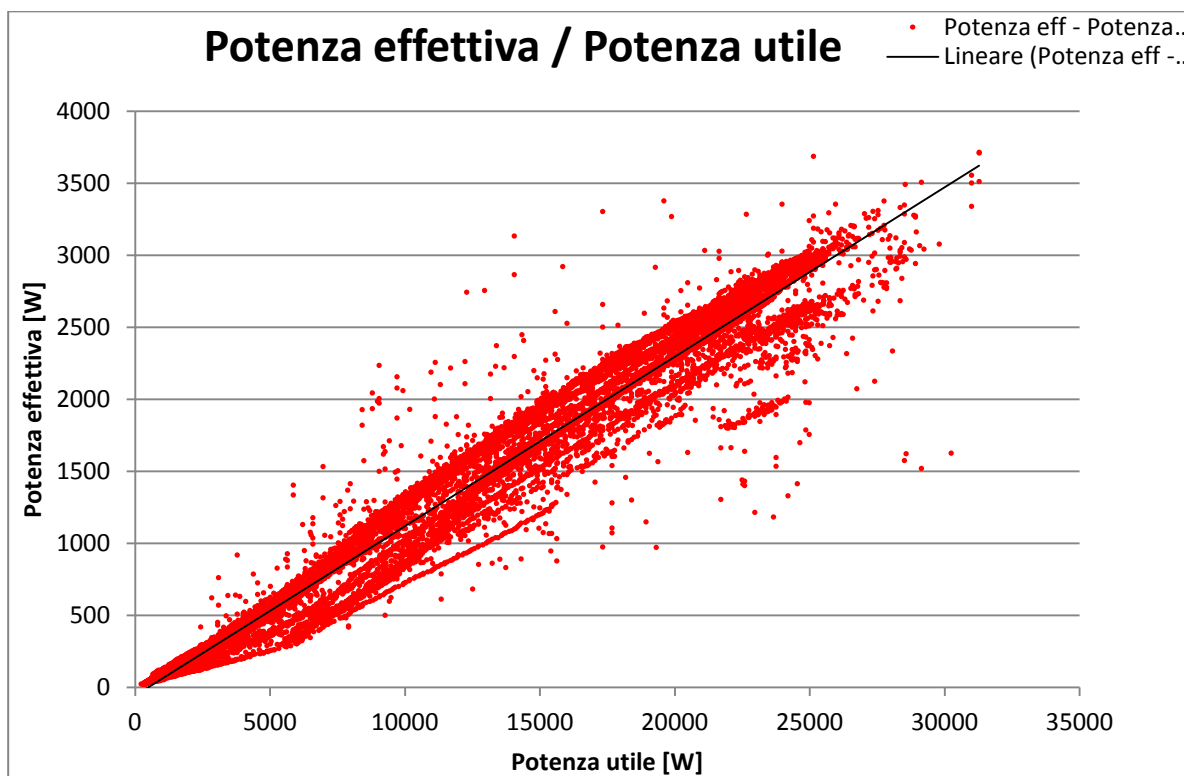


Figura 2-49: Diagramma tra Potenza effettiva e Potenza utile

Il valore medio del rendimento dell'impianto fotovoltaico durante l'esperimento FV-3 è stato di:

2.3.3.5. CONFRONTO TRA GLI ESPERIMENTI FV-1 E FV-3

Per ogni fissato intervallo di temperatura dell'aria esterna, le elaborazioni di seguito riportate, sono state ottenute considerando i dati riferiti a diversi intervalli di radiazione solare:

- Rendimento medio con impianto di raffrescamento attivo (η_m con raff.)
- Rendimento medio con impianto di raffrescamento non attivo (η_m senza raff.)
- Numero di dati considerati per il calcolo del η_m con raff.
- Numero di dati considerati per il calcolo del η_m senza raff.
- Incremento percentuale del rendimento dell'impianto fotovoltaico nelle due modalità di funzionamento.

Così facendo è stato possibile osservare l'andamento dei valori calcolati, a parità di temperatura dell'aria esterna, in funzione della radiazione solare incidente.

20 ÷ 22 [°C]	η_m senza TV	η_m con TV + Raff.	N° dati senza Raff.	N° dati con TV + Raff.	Incremento [%]
500 ÷ 600	0,104	0,139	56	42	33,7
750 ÷ 800	0,11	0,132	3	252	20,0
800 ÷ 850	0,11	0,131	3	312	19,1

Tabella 2-22: Intervallo di temperatura 22 ÷ 24 °C

22 ÷ 24 [°C]	η_m senza TV	η_m con TV + Raff.	N° dati senza Raff.	N° dati con TV + Raff.	Incremento [%]
500 ÷ 600	0,11	0,146	180	124	32,7
600 ÷ 650	0,1	0,139	51	84	39,0
650 ÷ 700	0,101	0,134	19	63	32,7
700 ÷ 750	0,109	0,133	19	128	22,0

Tabella 2-23: Intervallo di temperatura 22 ÷ 24 °C

24 ÷ 26 [°C]	η_m senza TV	η_m con TV + Raff.	N° dati senza Raff.	N° dati con TV + Raff.	Incremento [%]
500 ÷ 600	0,107	0,137	479	12	28,0
600 ÷ 650	0,11	0,14	273	11	27,3
650 ÷ 700	0,111	0,134	106	36	20,7
700 ÷ 750	0,1	0,132	74	54	32,0
750 ÷ 800	0,095	0,13	9	110	36,8

Tabella 2-24: Intervallo di temperatura 24 ÷ 26 °C

26 ÷ 28 [°C]	η_m senza TV	η_m con TV + Raff.	N° dati senza Raff.	N° dati con TV + Raff.	Incremento [%]
500 ÷ 600	0,113	0,138	396	87	22,1
600 ÷ 650	0,114	0,134	394	36	17,5
650 ÷ 700	0,114	0,134	653	31	17,5
700 ÷ 750	0,108	0,129	359	66	19,4
750 ÷ 800	0,101	0,124	77	159	22,8
800 ÷ 850	0,094	0,126	20	62	34,0

Tabella 2-25: Intervallo di temperatura 26 ÷ 28 °C

28 ÷ 30 [°C]	η_m senza TV	η_m con TV + Raff.	N° dati senza Raff.	N° dati con TV + Raff.	Incremento [%]
500 ÷ 600	0,117	0,134	503	44	14,5
600 ÷ 650	0,115	0,13	334	17	13,0
650 ÷ 700	0,112	0,131	382	44	17,0
700 ÷ 750	0,113	0,129	531	43	14,2
750 ÷ 800	0,112	0,126	351	25	12,5
800 ÷ 850	0,106	0,125	66	95	17,9

Tabella 2-26: Intervallo di temperatura 28 ÷ 30 °C

30 ÷ 32 [°C]	η_m senza TV	η_m con TV + Raff.	N° dati senza Raff.	N° dati con TV + Raff.	Incremento [%]
500 ÷ 600	0,12	0,13	301	38	8,3
600 ÷ 650	0,118	0,131	233	8	11,0
650 ÷ 700	0,117	0,131	287	21	12,0
700 ÷ 750	0,113	0,129	312	18	14,2
750 ÷ 800	0,114	0,127	585	59	11,4
800 ÷ 850	0,113	0,124	76	7	9,7

Tabella 2-27: Intervallo di temperatura 30 ÷ 32 °C

Nelle figura 2-54 e 2-55 sono riportati gli andamenti del rendimento dell'impianto fotovoltaico a parità di temperatura dell'aria esterna ed in funzione dell'irraggiamento solare. Gli andamenti sono stati riportati per differenti valori della temperatura dell'aria. Per maggiore chiarezza si specifica che, per la costruzione dei grafici, sono stati considerati tutti i dati di rendimento che sono stati acquisiti, per il primo nella modalità di funzionamento con il sistema di raffrescamento attivo, mentre, per il secondo grafico, con il sistema spento.

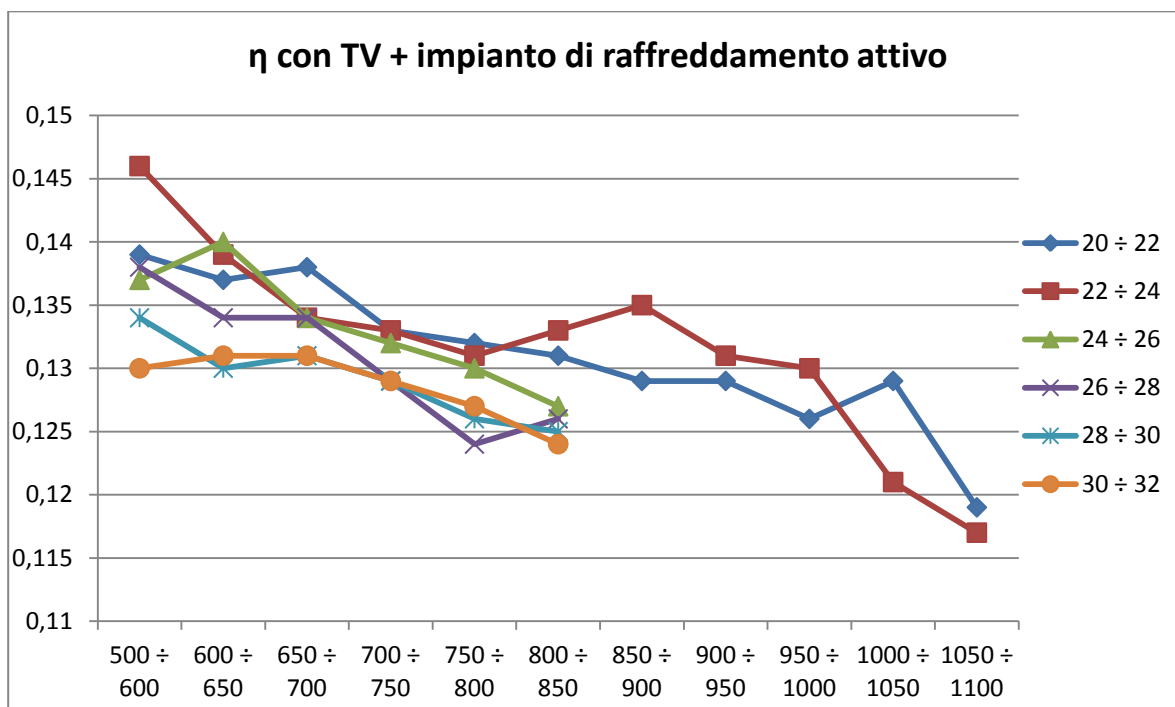


Figura 2-50: Andamenti rendimento con tetto verde e sistema di raffreddamento attivo

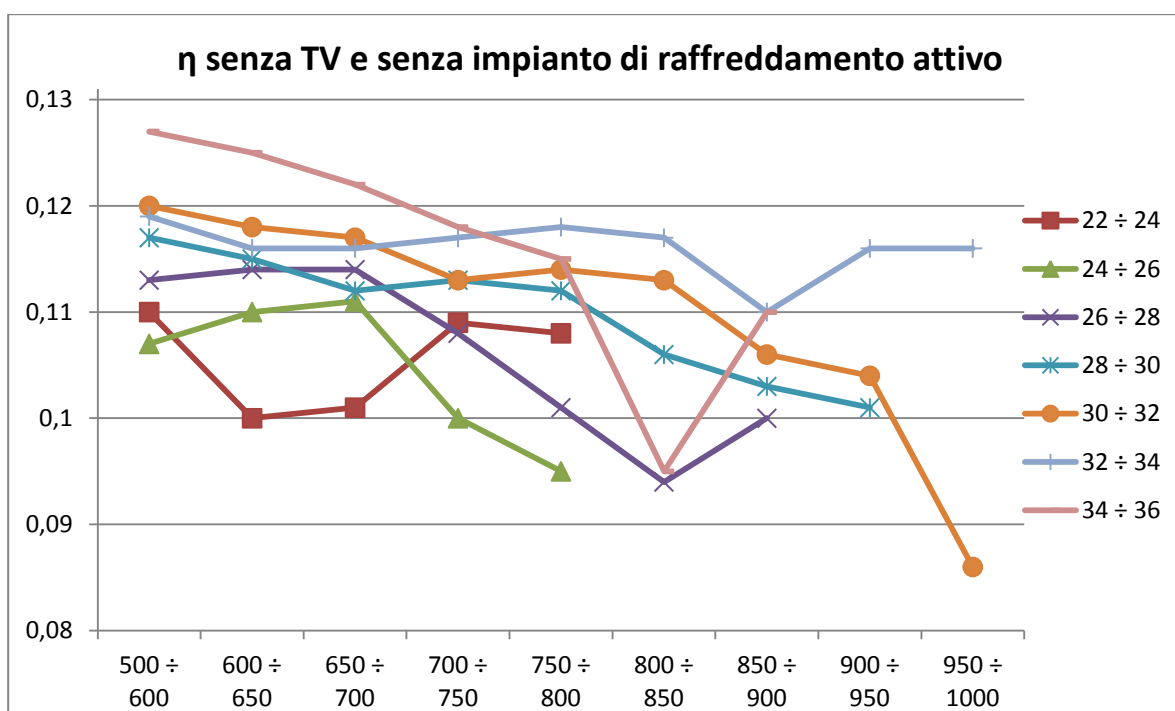


Figura 2-51: Andamenti rendimento con tetto verde e sistema di raffreddamento attivo

Successivamente sono stati graficati (dalla figura 2-56 alla figura 2-61) gli andamenti dei rendimenti, ottenuti nelle due configurazioni dell'impianto fotovoltaico, in funzione della temperatura ambiente. In questi grafici vengono evidenziati sia la differenza di rendimento che le equazioni delle linee di tendenza che approssimano bene gli andamenti in funzione delle temperatura ambiente.

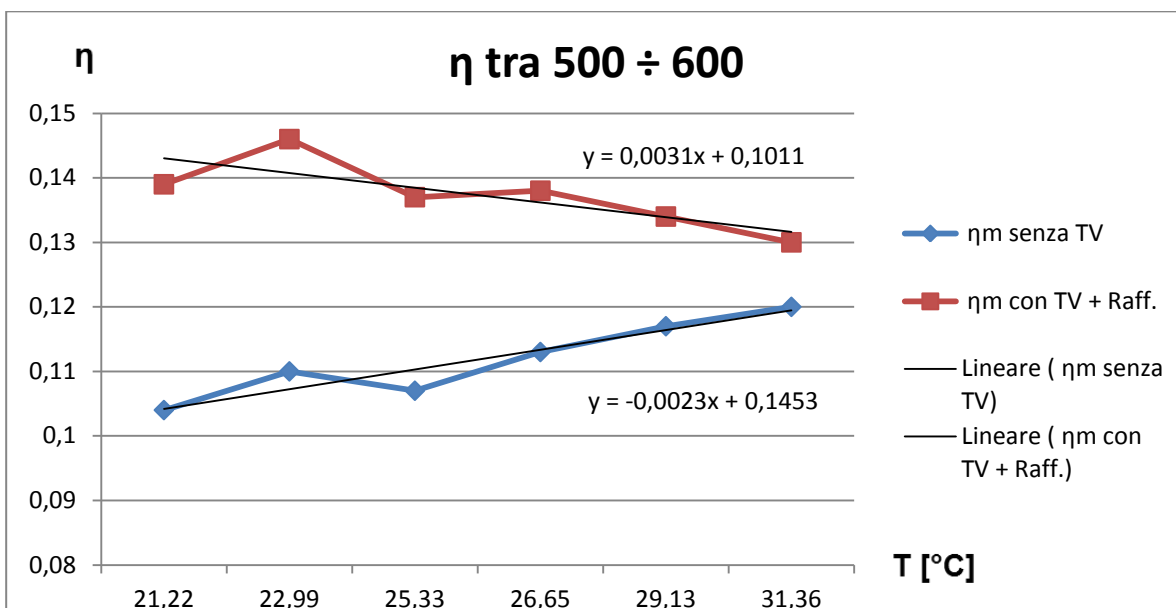


Figura 2-52: Andamento dei rendimenti nell'intervallo di irraggiamento solare tra 500 e 600, in funzione della temperatura ambientale

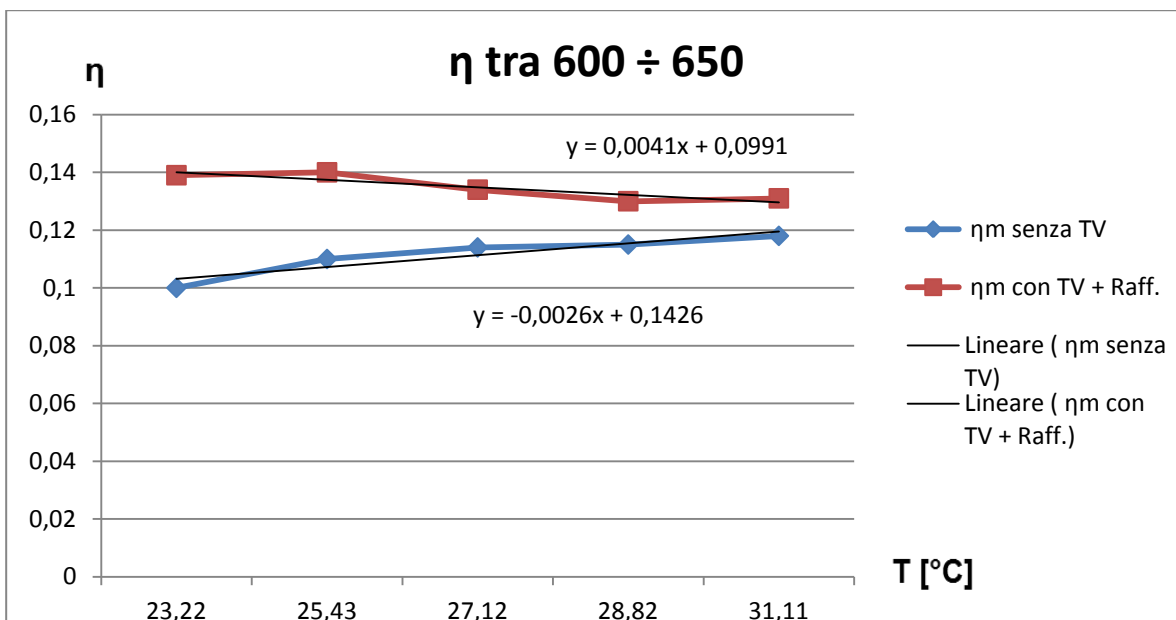


Figura 2-53: Andamento dei rendimenti nell'intervallo di irraggiamento solare tra 600 e 650, in funzione della temperatura ambientale

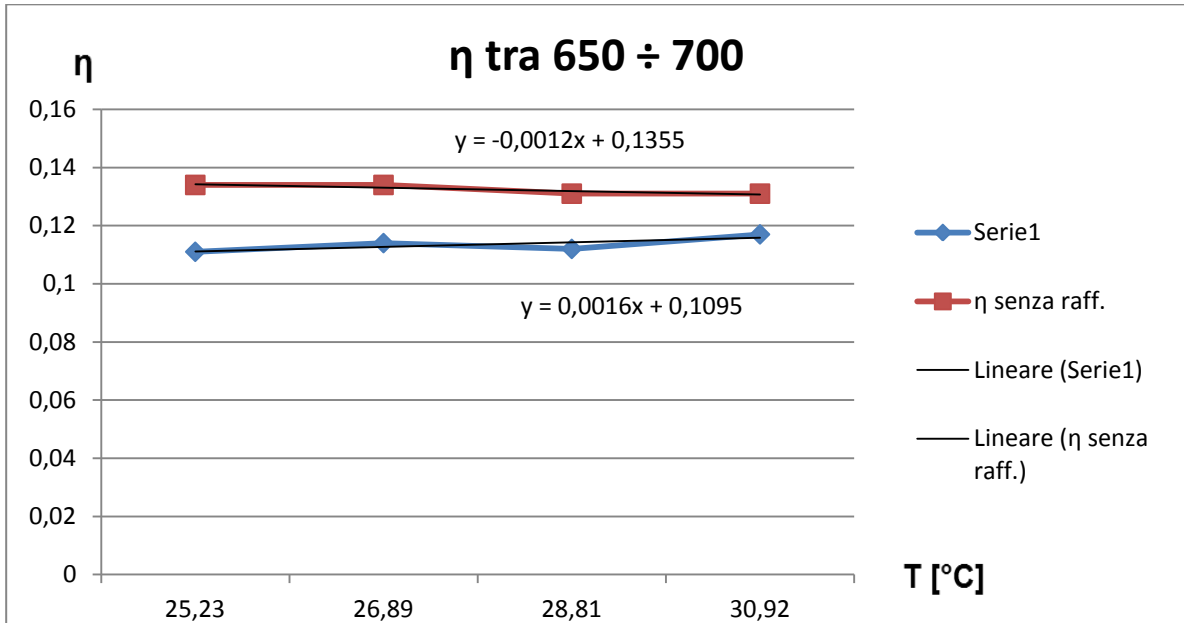


Figura 2-54: Andamento dei rendimenti nell'intervallo di irraggiamento solare tra 650 e 700, in funzione della temperatura ambientale

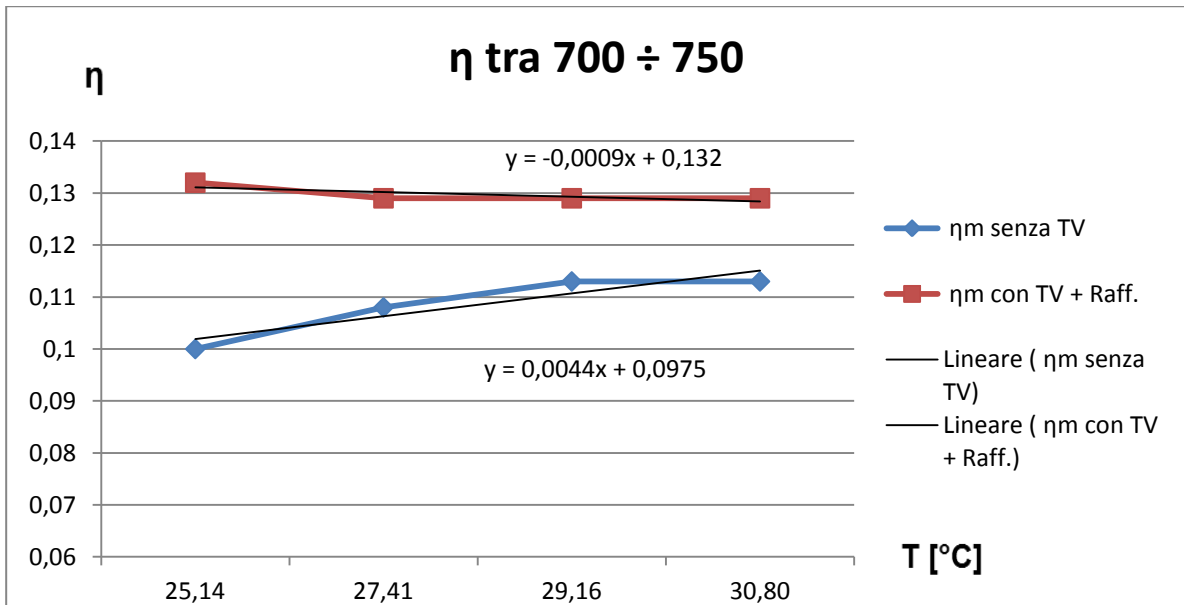


Figura 2-55: Andamento dei rendimenti nell'intervallo di irraggiamento solare tra 700 e 750, in funzione della temperatura ambientale

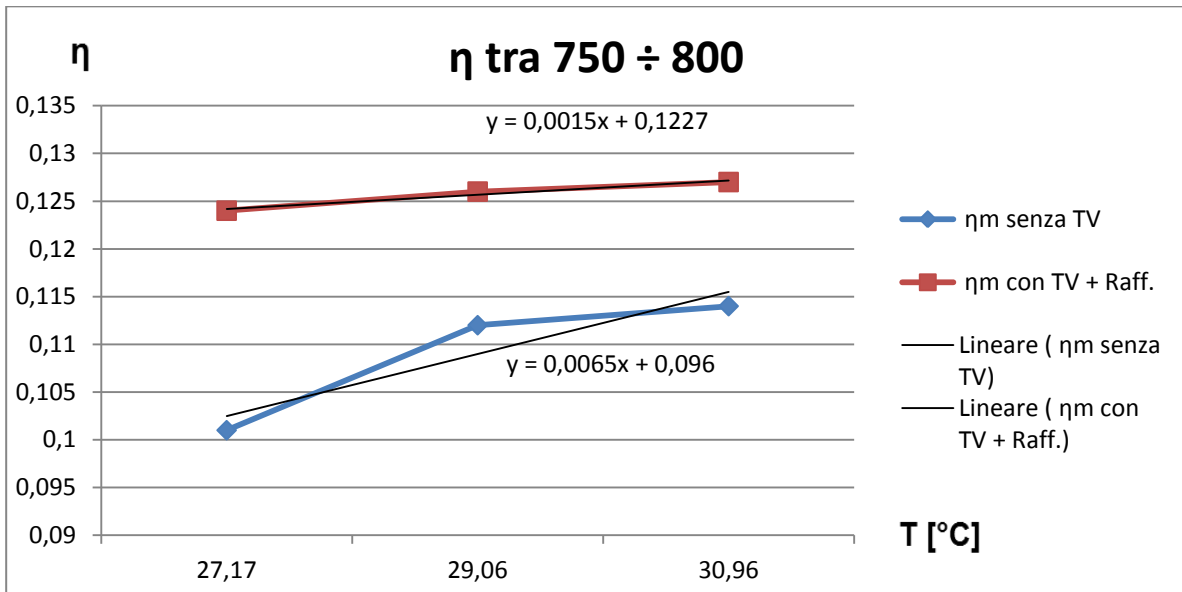


Figura 2-56: Andamento dei rendimenti nell'intervallo di irraggiamento solare tra 750 e 800, in funzione della temperatura ambientale

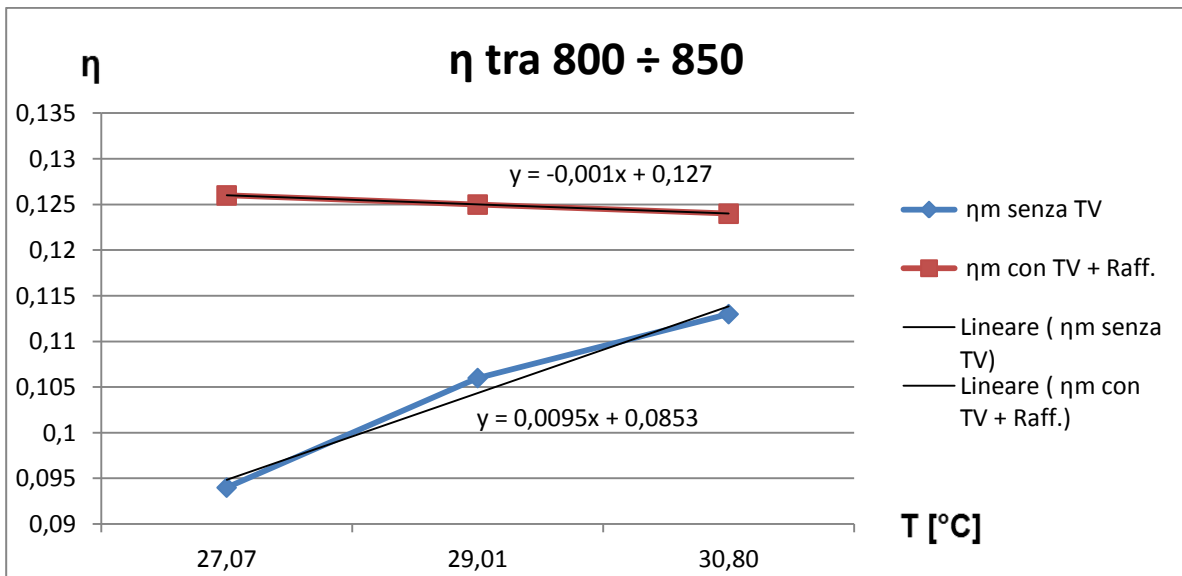


Figura 2-57: Andamento dei rendimenti nell'intervallo di irraggiamento solare tra 750 e 800, in funzione della temperatura ambientale

Per determinare l'incremento percentuale ottenibile installando il verde pensile ed il sistema di raffrescamento presente sul prototipo Genera, sono stati tenuti in considerazione i seguenti dati di entrambe le modalità di funzionamento dell'impianto:

- Rendimento medio calcolato in determinati intervalli di irraggiamento solare e temperatura esterna
- Temperatura media esterna
- Numero di dati a disposizione per i singoli intervalli di dati acquisiti

- Temperatura media pesata in base al numero di dati a disposizione nel caso di sistema di raffrescamento attivo e spento.

Le successive cinque tabelle riportano i suddetti dati per gli intervalli d'irraggiamento considerati e vengono accompagnati dai grafici degli andamenti dell'incremento percentuale del rendimento in funzione della temperatura esterna.

500 ÷ 600 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	η _m con raff.	η _m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
20 ÷ 22	21,33	21,07	21,22	0,104	0,139	56	42	33,7
22 ÷ 24	23,01	22,96	22,99	0,11	0,146	180	124	32,7
24 ÷ 26	25,34	25,09	25,33	0,107	0,137	479	12	28,0
26 ÷ 28	26,59	26,93	26,65	0,113	0,138	396	87	22,1
28 ÷ 30	29,13	29,17	29,13	0,117	0,134	503	44	14,5
30 ÷ 32	31,34	31,52	31,36	0,12	0,13	301	38	8,3

Tabella 2-28: Intervallo di irraggiamento solare 500 ÷ 600 W/m²

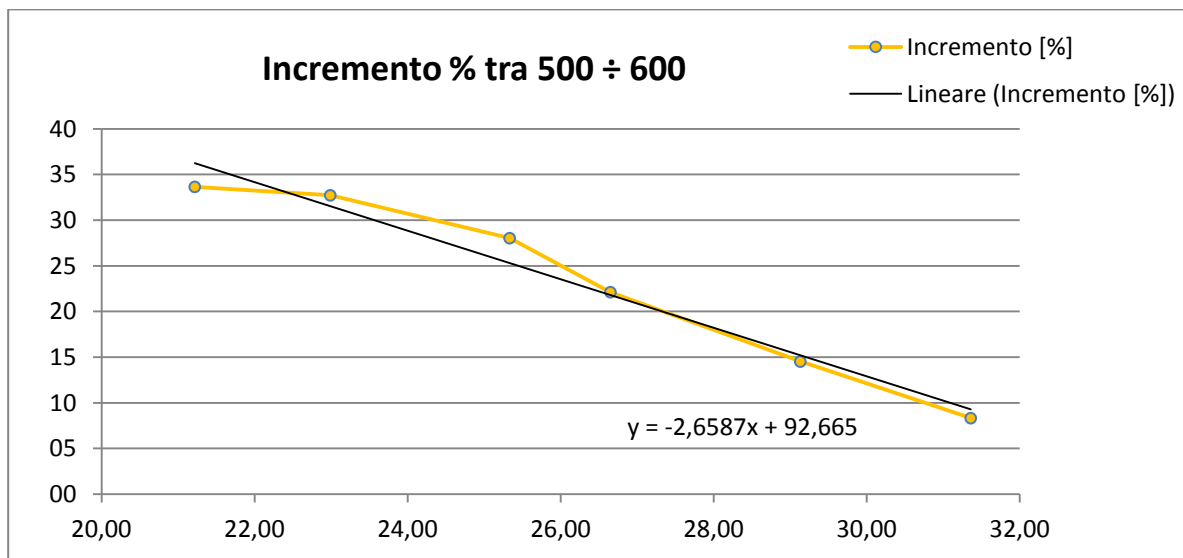


Figura 2-58: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 500 ÷ 600 W/m² di irraggiamento solare

600 ÷ 650 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	η _m con raff.	η _m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
22 ÷ 24	23,08	23,31	23,22	0,1	0,139	51	84	39,0
24 ÷ 26	25,45	24,92	25,43	0,11	0,14	273	11	27,3
26 ÷ 28	27,14	26,94	27,12	0,114	0,134	394	36	17,5
28 ÷ 30	28,81	29,1	28,82	0,115	0,13	334	17	13,0
30 ÷ 32	31,1	31,33	31,11	0,118	0,131	233	8	11,0

Tabella 2-29: Intervallo di irraggiamento solare 600 ÷ 650 W/m²

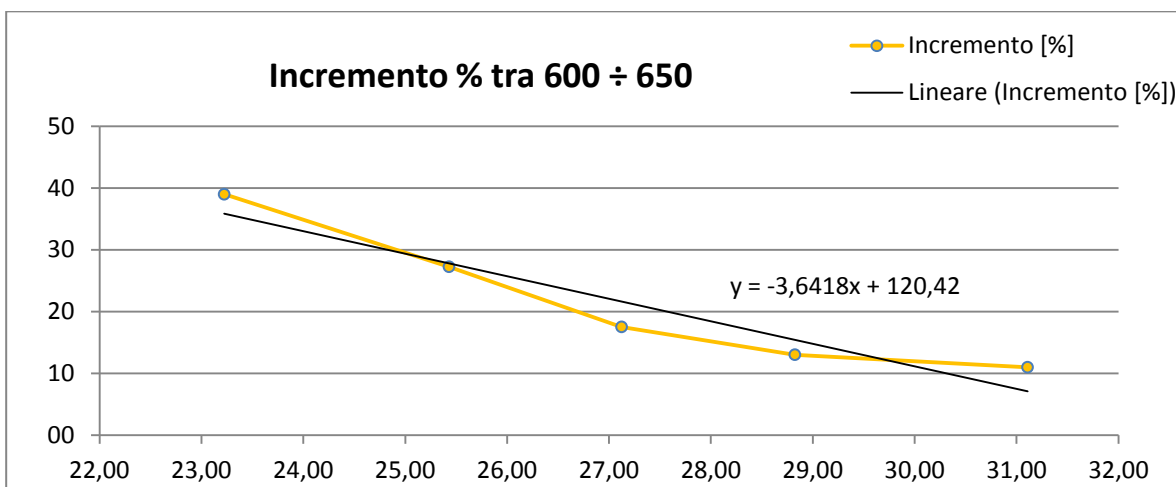


Figura 2-59: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 600 ÷ 650 W/m² di irraggiamento solare

650 ÷ 700 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
24 ÷ 26	25,39	24,74	25,23	0,111	0,134	106	36	20,7
26 ÷ 28	26,88	27,05	26,89	0,114	0,134	653	31	17,5
28 ÷ 30	28,77	29,11	28,81	0,112	0,131	382	44	17,0
30 ÷ 32	30,89	31,26	30,92	0,117	0,131	287	21	12,0

Tabella 2-30: Intervallo di irraggiamento solare 650 ÷ 700 W/m²

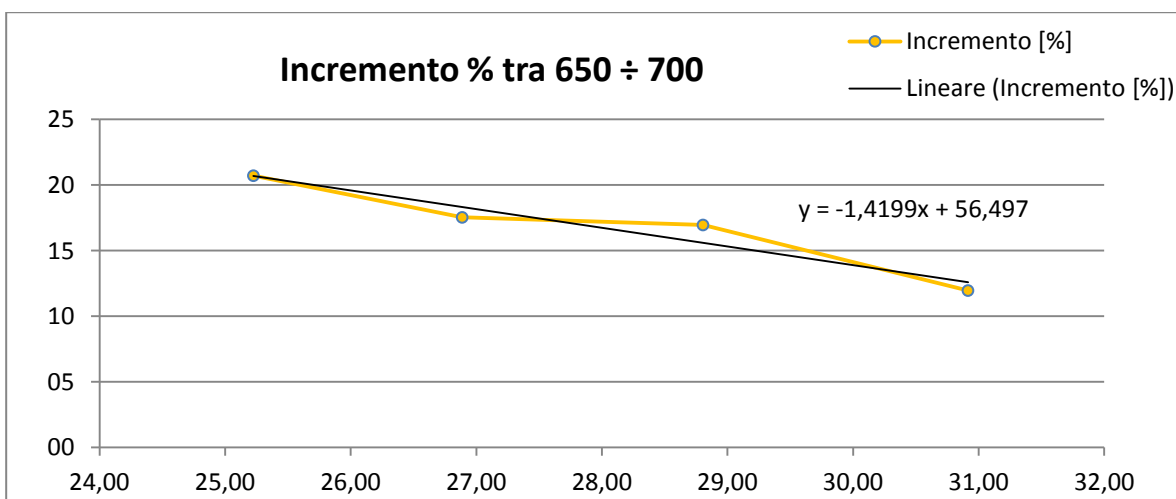


Figura 2-60: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 650 ÷ 700 W/m² di irraggiamento solare

700 ÷ 750 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
24 ÷ 26	25,32	24,9	25,14	0,1	0,132	74	54	32,0
26 ÷ 28	27,44	27,25	27,41	0,108	0,129	359	66	19,4
28 ÷ 30	29,15	29,22	29,16	0,113	0,129	531	43	14,2
30 ÷ 32	30,77	31,24	30,80	0,113	0,129	312	18	14,2

Tabella 2-31: Intervallo di irraggiamento solare 700 ÷ 750 W/m²

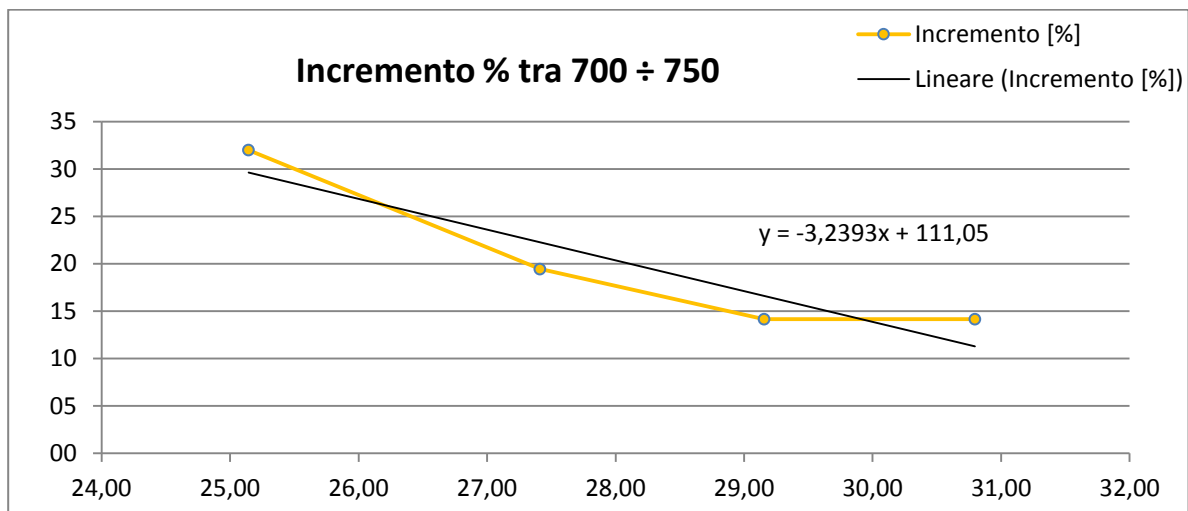


Figura 2-61: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 700 ÷ 750 W/m² di irraggiamento solare

750 ÷ 800 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
26 ÷ 28	27,26	27,12	27,17	0,101	0,124	77	159	22,8
28 ÷ 30	29,07	28,88	29,06	0,112	0,126	351	25	12,5
30 ÷ 32	30,97	30,89	30,96	0,114	0,127	585	59	11,4

Tabella 2-32: Intervallo di irraggiamento solare 750 ÷ 800 W/m²

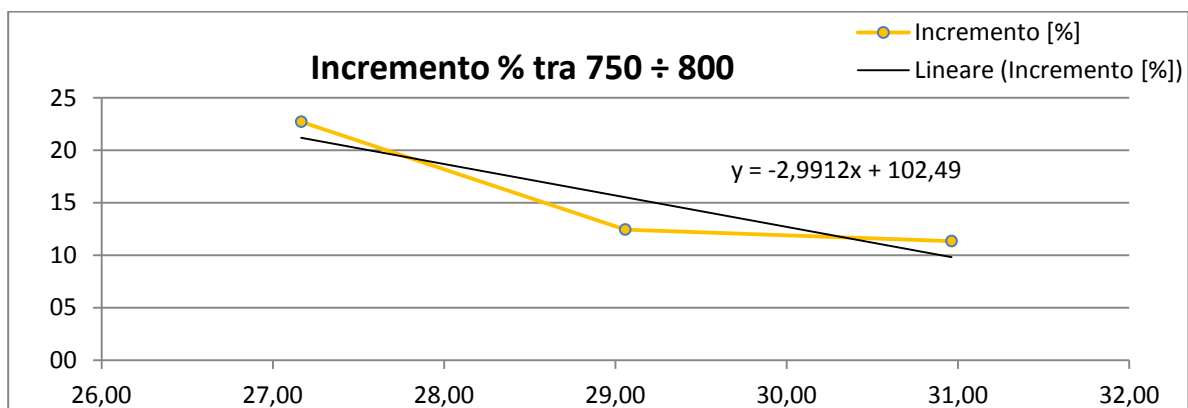


Figura 2-62: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 750 ÷ 800 W/m² di irraggiamento solare

800 ÷ 850 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
26 ÷ 28	27,41	26,96	27,07	0,094	0,126	20	62	34,0
28 ÷ 30	28,89	29,09	29,01	0,106	0,125	66	95	17,9
30 ÷ 32	30,78	31,04	30,80	0,113	0,124	76	7	9,7

Tabella 2-33: Intervallo di irraggiamento solare 800 ÷ 850 W/m²

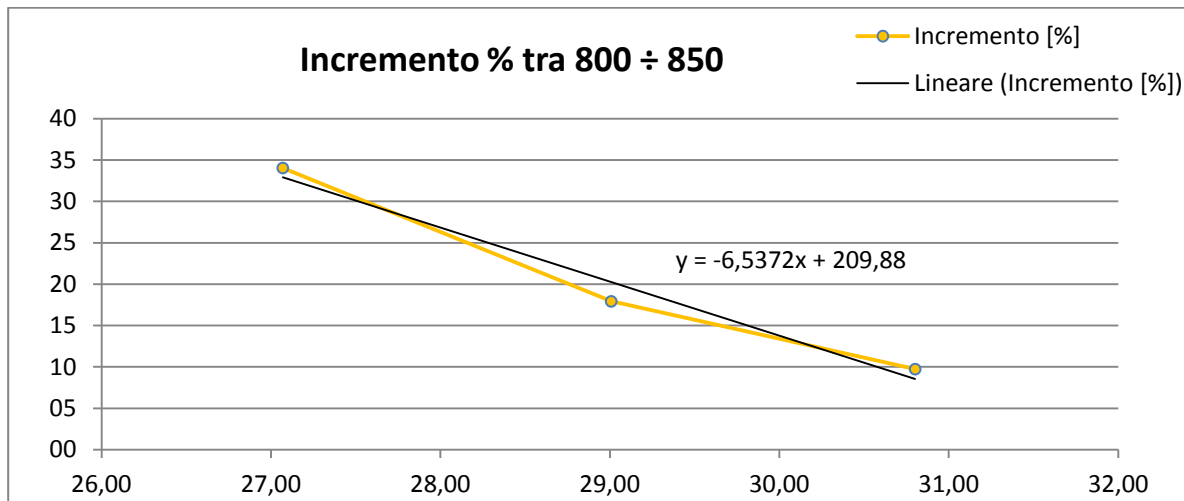


Figura 2-63: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 800 ÷ 850 W/m² di irraggiamento solare

Le equazioni trovate saranno riutilizzate nel capitolo 3 (Attività modellistica) per il calcolo dell'incremento di rendimento annuo dell'impianto fotovoltaico ottenibile grazie all'abbattimento della temperatura delle celle per effetto dell'azione del sistema di raffreddamento.

I risultati ottenuti sono frutto di test vincolati alla frequenza di irrigazione dettata dalla centralina dell'impianto idrico, che non ha permesso di ottimizzare i tempi di bagnatura dei pannelli ed il numero di cicli di irrigazione. Eseguendo un intervento di sostituzione della centralina, in modo da garantire una maggiore flessibilità di programmazione, sarà possibile trovare il set-up ottimale, che consenta di diminuire il salto di temperatura dei moduli fotovoltaici che si verifica tra prima e dopo l'azione di raffreddamento, aumentando così l'incremento percentuale puntuale di rendimento e, di conseguenza, la produzione annua di energia elettrica.

2.3.3.6. ESPERIMENTO SULL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO DI FOTOCROMO

La Fotocromo Emiliana (s.r.l.) è un'azienda di Castel San Pietro Terme che opera nel settore della fotolitografia. Il 25/11/2009 è avvenuta la messa in servizio dell'impianto fotovoltaico, commissionato dalla suddetta azienda e installato sulla copertura dello stabile di proprietà di Fotocromo.

In tabella 2-34 sono riportati i dati generali dell'impianto fotovoltaico:

DATI GENERALI IMPIANTO FOTOVOLTAICO FOTOCROMO		
Potenza nominale totale	464,80	kW
Messa in servizio dell'impianto	25/11/2009	
Latitudine	44°43' N	
Longitudine	11°52' E	
Altitudine	0,0	m. s. m.
Numero inverter	3	
Numero falde	3	
Inclinazione falda numero 1	30°	
Inclinazione falda numero 2	44°	
Inclinazione falda numero 3	10°	

Tabella 2-34: Dati generali impianto fotovoltaico Fotocromo

Inoltre l'impianto è fornito di un impianto d'irrigazione che copre la totalità dei moduli fotovoltaici, i quali hanno le seguenti caratteristiche:

SUNPOWER: MODULO FOTOVOLTAICO 225		
DATI ELETTRICI		
Potenza di picco (Pmax)	225	Wp
Tensione nominale (Vmp)	41,0	V
Corrente nominale (Imp)	5,49	A
Tensione a circuito aperto (Voc)	48,5	V
Corrente di cortocircuito (Isc)	5,87	A
Tensione massima del sistema (IEC)	1000	V
Coefficienti di temperatura Potenza	-0,38	%/°C
Coefficienti di temperatura Tensione (Voc)	-132,5	mV/°C
Coefficienti di temperatura Corrente (Isc)	3,5	mA/°C
Tensione nominale del fusibile	20	A
Potenza di picco per area unitaria	181	W/m ²

DATI MECCANICI		
Celle solari	72 celle solari SunPower in silicio monocristallino con tecnologia back-contact	
Vetro anteriore	3,2 mm temprato	
Scatola di giunzione	IP-65 con 3 diodi bypass	
Cavi di uscita	Lunghezza dei cavi 900 mm / connettori Multi-Contact	
Telaio	In lega di alluminio anodizzato tipo 6063	
Peso	15	kg
DIMENSIONI		
Altezza	1559	mm
Larghezza	798	mm
Spessore	46	mm

Tabella 2-35: Modulo fotovoltaico SunPower

Il sistema di raffrescamento presenta irrigatori che irrigano lungo una linea retta e ruotano per coprire l'intera superficie. In questo modo i pannelli non subiranno una bagnatura continua durante un ciclo di irrigazione, ma beneficeranno dell'acqua solo per il tempo di passaggio legato alla rotazione dell'irrigatore.

Come è possibile osservare in tabella 2-34, l'impianto fotovoltaico è composto da tre differenti falde inclinate con un angolazione differente. Per lo studio di ricerca è stato deciso di considerare solamente la falda inclinata a 30° per le seguenti motivazioni:

- La falda a 30° è collegata all'inverter st24 che è completamente dedicato ad essa. Questo permette di avere dati omogenei e di immediata interpretazione in quanto la produzione di energia elettrica è eseguita da pannelli che hanno tutti le stesse caratteristiche fisiche e di posizione
- Per la zona geografica in cui è installato l'impianto, la falda a 30° è quella che più si avvicina all'inclinazione ideale a cui devono essere montati i pannelli per sfruttare al massimo l'irraggiamento solare lungo l'anno solare (inclinazione ideale a Bologna: 33°)
- Essendo la falda con minor numero di pannelli, utilizzando quella a 30° si ha il minor consumo idrico.

Nella seguente tabella sono riportati i dati generali del test effettuato sulla falda a 30° dell'impianto fotovoltaico di Fotocromo:

ESPERIMENTO FOTOCROMO	
Periodo svolgimento esperimento	Dal 12/07/2012 al 20/07/2012 e dal 28/07/2012 al 11/08/2012
Accensione impianto	Ore 12.00
Spegnimento impianto	Ore 15.30
N° cicli di irrigazione giornalieri	21
Durata ciclo di irrigazione	2'
Frequenza accensioni	Ogni 10'

Tabella 2-36: Esperimento impianto fotovoltaico Fotocromo con sistema di raffrescamento attivo

Analogamente allo studio effettuato per il prototipo Genera, per ogni fissato intervallo di temperatura dell'aria esterna, le elaborazioni di seguito riportate, sono state ottenute considerando i dati riferiti a diversi intervalli di radiazione solare:

- Rendimento medio con impianto di raffrescamento attivo (η_m con raff.)
- Rendimento medio con impianto di raffrescamento non attivo (η_m senza raff.)
- Numero di dati considerati per il calcolo del η_m con raff.
- Numero di dati considerati per il calcolo del η_m senza raff.
- Incremento percentuale del rendimento dell'impianto fotovoltaico nelle due modalità di funzionamento.

A differenza dello studio effettuato per il prototipo Genera, il numero di dati acquisiti in Fotocromo è molto limitato e ciò si ripercuote sull'accuratezza dei risultati che si vogliono ottenere. Questo problema è dipeso dal sistema di acquisizione dati, caratterizzato da una frequenza massima pari ad un dato ogni 15 minuti. Il fatto che il valore di potenza elettrica venga rilevato puntualmente e quello di radiazione solare mediato sull'intervallo di 15 minuti, comporta l'impossibilità di monitorare con precisione l'andamento delle variabili ed i cambiamenti dovuti all'azione di raffrescamento compiuta dal sistema in fase di studio. Di conseguenza si verificano errori grossolani, i quali vengono riconosciuti, esclusi e barrati in fase di analisi dei dati (vedi tabelle successive).

24 ÷ 26	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	-	0,149	-	3	-
650 ÷ 700	0,018	0,149	4	8	87,9
700 ÷ 750	0,147	0,147	2	2	0,0
750 ÷ 800	-	0,145	-	4	-
800 ÷ 850	0,123	0,15	2	3	18,0
850 ÷ 900	0,156	-	1	-	-
900 ÷ 950	-	0,152	-	1	-
950 ÷ 1000	-	0,135	-	3	-
1000 ÷ 1050	-	0,136	-	6	-
1050 ÷ 1100	-	0,14	-	1	-

Tabella 2-37: Intervallo di temperatura 24 ÷ 26°C

26 ÷ 28	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,144	0,142	5	12	1,4
650 ÷ 700	0,146	0,15	2	11	2,7
700 ÷ 750	0,144	0,134	2	5	7,5
750 ÷ 800	0,142	0,142	1	3	0,0
800 ÷ 850	0,14	0,14	1	3	0,0
850 ÷ 900	0,142	0,138	1	4	2,9
900 ÷ 950	0,104	0,138	2	3	24,6
950 ÷ 1000	0,137	0,137	2	2	0,0
1000 ÷ 1050	0,134	0,133	3	3	0,8

Tabella 2-38: Intervallo di temperatura 26 ÷ 28°C

28 ÷ 30	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,144	0,148	14	18	2,7
650 ÷ 700	0,146	0,142	13	22	2,8
700 ÷ 750	0,142	0,139	11	17	2,2
750 ÷ 800	0,143	0,145	10	17	1,4
800 ÷ 850	0,142	0,142	13	18	0,0
850 ÷ 900	0,145	0,14	6	18	3,6
900 ÷ 950	0,143	0,14	9	17	2,1
950 ÷ 1000	0,14	0,136	7	22	2,9
1000 ÷ 1050	0,133	0,134	1	5	0,7

Tabella 2-39: Intervallo di temperatura 28 ÷ 30°C

30 ÷ 32	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,14	0,142	10	16	1,4
650 ÷ 700	0,145	0,138	15	16	5,1
700 ÷ 750	0,141	0,138	22	18	2,2
750 ÷ 800	0,143	0,14	16	21	2,1
800 ÷ 850	0,143	0,14	19	19	2,1
850 ÷ 900	0,143	0,136	21	25	5,1
900 ÷ 950	0,138	0,134	21	35	3,0
950 ÷ 1000	0,142	0,13	35	41	9,2
1000 ÷ 1050	0,138	0,126	15	7	9,5

Tabella 2-40: Intervallo di temperatura 30 ÷ 32°C

32 ÷ 34	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,12	0,148	10	12	-18,9
650 ÷ 700	0,15	0,138	10	15	8,7
700 ÷ 750	0,145	0,139	6	11	4,3
750 ÷ 800	0,135	0,132	16	17	2,3
800 ÷ 850	0,131	0,138	11	22	-5,1
850 ÷ 900	0,145	0,141	17	25	2,8
900 ÷ 950	0,141	0,137	32	56	2,9
950 ÷ 1000	0,144	0,131	54	55	9,9
1000 ÷ 1050	0,143	0,101	2	1	41,6

Tabella 2-41: Intervallo di temperatura 32 ÷ 34°C

34 ÷ 36	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,144	0,138	7	12	4,3
650 ÷ 700	0,137	0,134	6	13	2,2
700 ÷ 750	0,14	0,133	13	11	5,3
750 ÷ 800	0,14	0,135	11	15	3,7
800 ÷ 850	0,142	0,139	12	15	2,2
850 ÷ 900	0,136	0,133	10	22	2,3
900 ÷ 950	0,142	0,131	17	39	8,4
950 ÷ 1000	0,142	0,132	36	31	7,6
1000 ÷ 1050	0,137	0,097	4	1	41,2

Tabella 2-42: Intervallo di temperatura 34 ÷ 36°C

36 ÷ 38	η_m con raff.	η_m senza raff.	N° dati con raff	N° dati senza raff.	Incremento [%]
600 ÷ 650	0,139	0,144	1	6	-3,5
650 ÷ 700	0,137	0,143	1	4	-4,2
700 ÷ 750	-	0,131	-	2	-
750 ÷ 800	0,136	0,131	1	1	3,8
800 ÷ 850	0,139	0,138	1	14	0,7
850 ÷ 900	0,12	0,133	4	2	-9,8
900 ÷ 950	0,129	0,132	10	1	-2,3

Tabella 2-43: Intervallo di temperatura 36 ÷ 38°C

Nelle figura 2-68 e 2-69 sono riportati gli andamenti del rendimento della falda a 30° a parità di temperatura dell'aria esterna ed in funzione dell'irraggiamento solare. Gli andamenti sono stati riportati per differenti valori della temperatura dell'aria. Per maggiore chiarezza si specifica che, per la costruzione dei grafici, sono stati considerati tutti i dati di rendimen-

to che sono stati acquisiti, per il primo nella modalità di funzionamento con il sistema di raffrescamento attivo, mentre, per il secondo grafico, con il sistema spento.

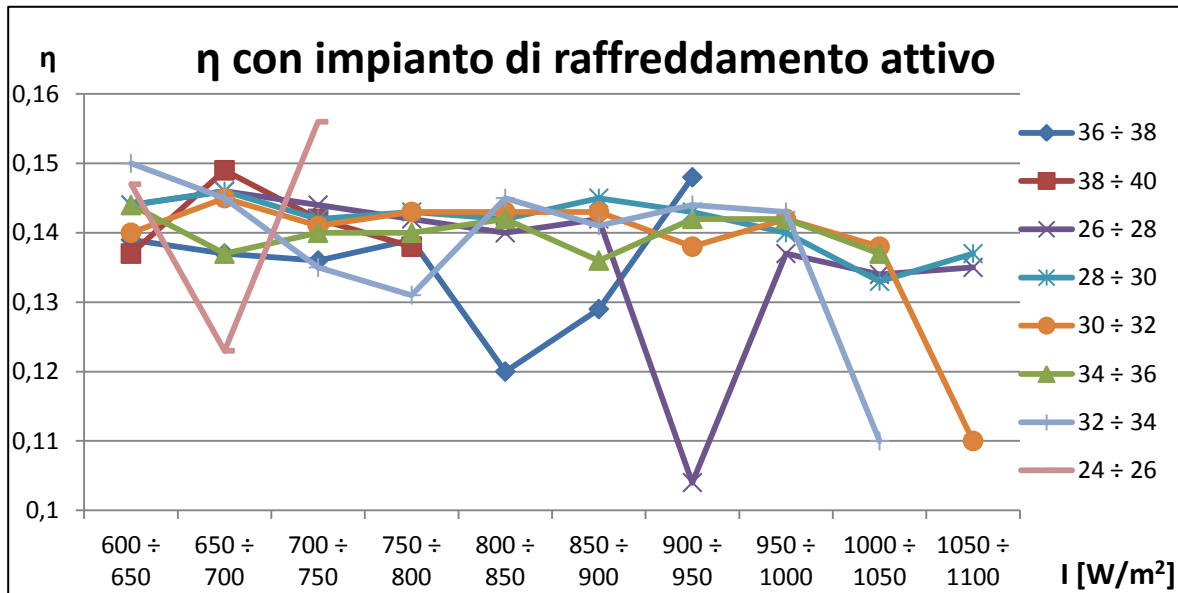


Figura 2-64: Andamenti rendimento con sistema di raffrescamento attivo

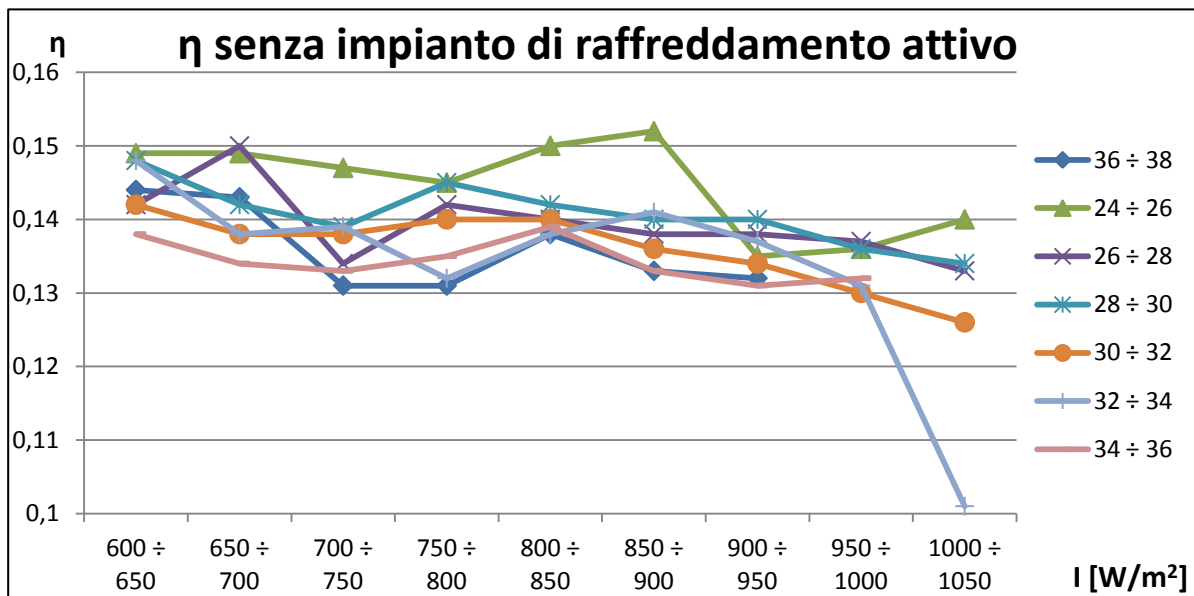


Figura 2-65: Andamenti rendimento con sistema di raffrescamento spento

Successivamente sono stati graficati (dalla figura 2-70 alla figura 2-73) gli andamenti dei rendimenti, ottenuti nelle due modalità di funzionamento dell'impianto fotovoltaico, in funzione della temperatura ambiente. In questi grafici vengono evidenziati sia la differenza di rendimento tra impianto di raffrescamento attivo e spento, sia l'equazione delle linee di tendenza che approssimano bene gli andamenti in funzione delle temperatura ambiente.

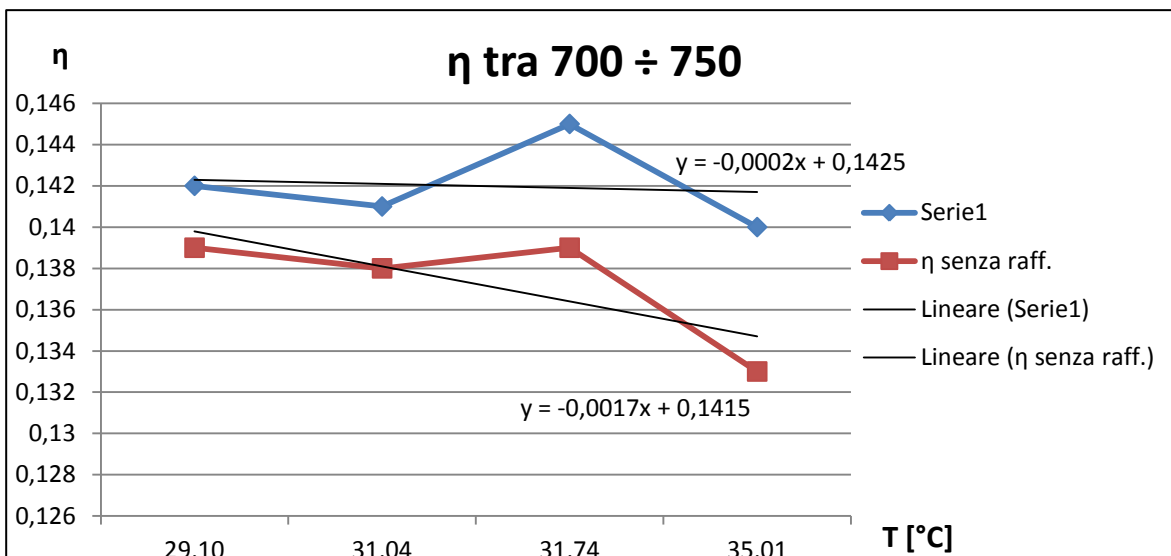


Figura 2-66: Andamento dei rendimenti (con sistema di raffreddamento attivo e spento) nell'intervallo di irraggiamento solare tra 700 e 750, in funzione della temperatura ambientale

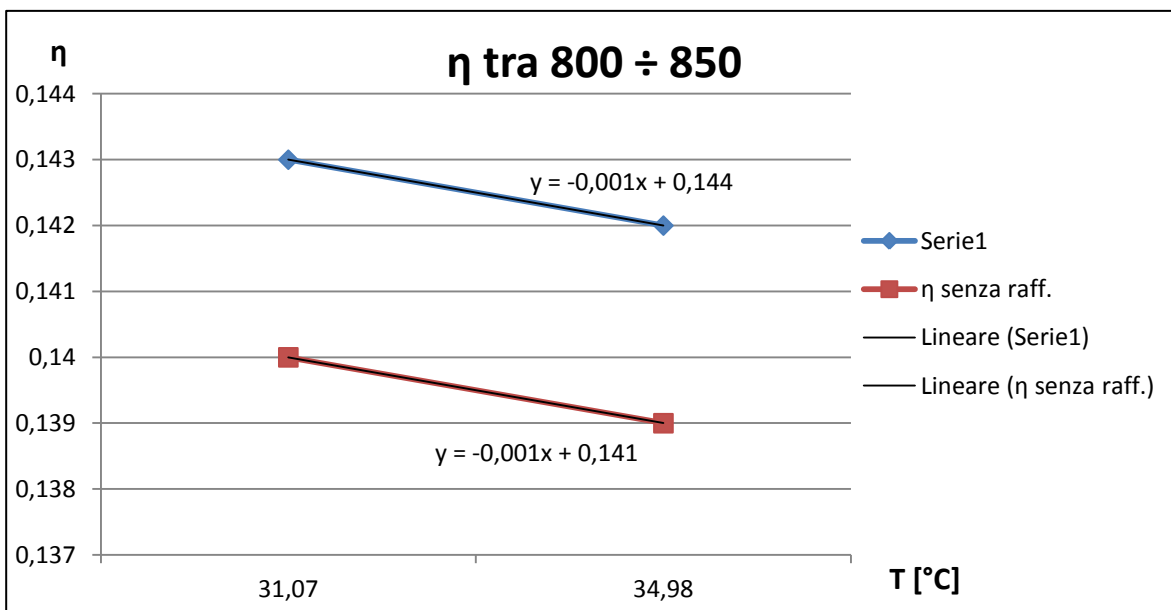


Figura 2-67: Andamento dei rendimenti (con sistema di raffreddamento attivo e spento) nell'intervallo di irraggiamento solare tra 800 e 850, in funzione della temperatura ambientale

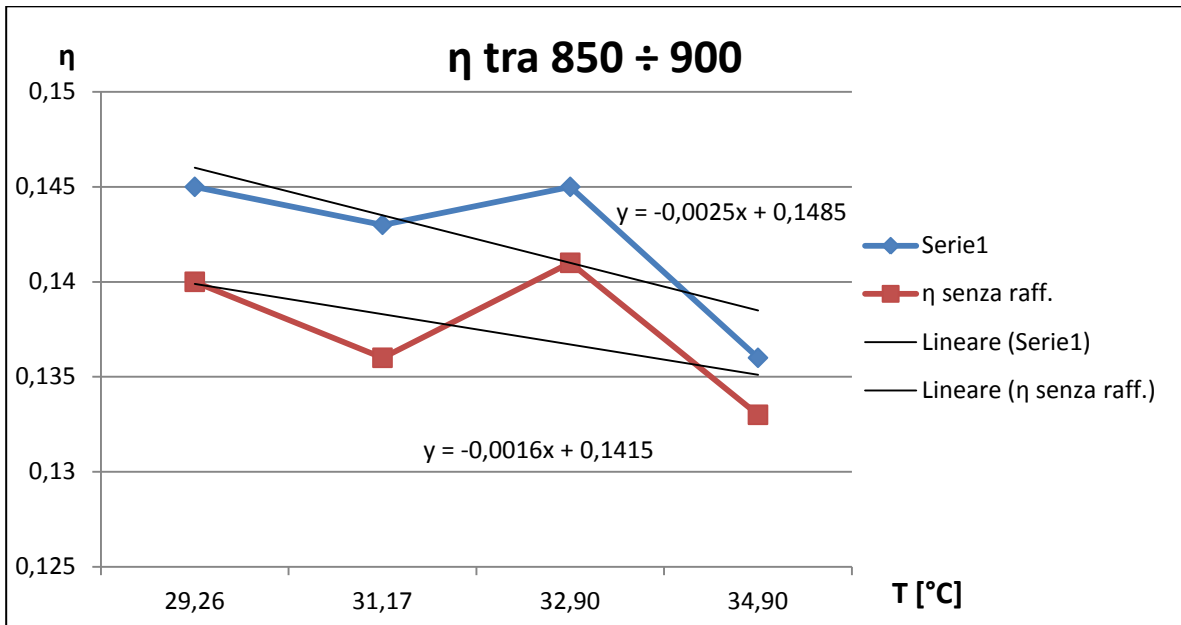


Figura 2-68: Andamento dei rendimenti (con sistema di raffreddamento attivo e spento) nell'intervallo di irraggiamento solare tra 850 e 900, in funzione della temperatura ambientale

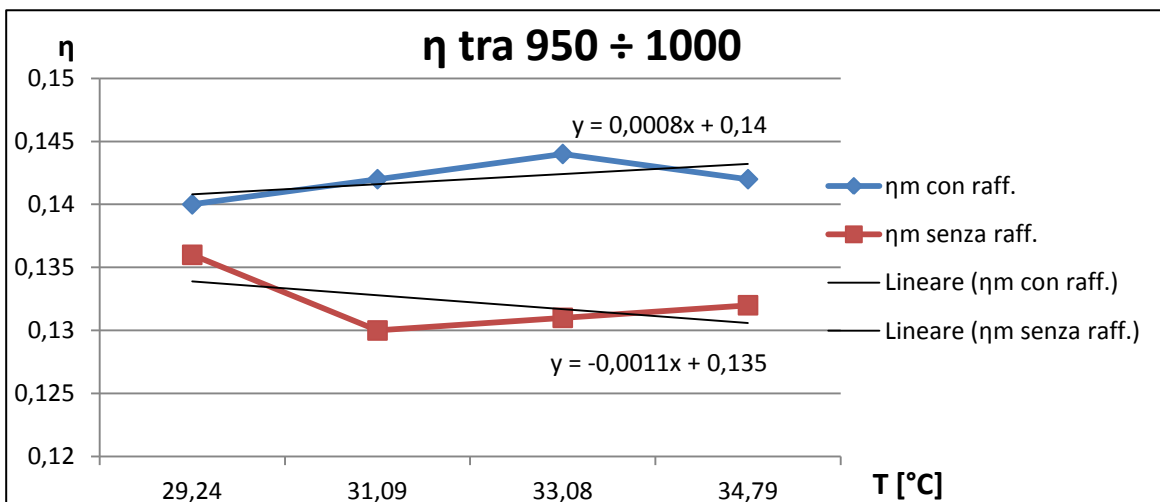


Figura 2-69: Andamento dei rendimenti (con sistema di raffreddamento attivo e spento) nell'intervallo di irraggiamento solare tra 950 e 1000, in funzione della temperatura ambientale

Per determinare l'incremento percentuale che si ottiene installando il sistema di raffreddamento presente sull'impianto fotovoltaico di Fotocromo, sono stati tenuti in considerazione i seguenti dati di entrambe le modalità di funzionamento dell'impianto:

- Rendimento medio calcolato in determinati intervalli di irraggiamento solare e temperatura esterna
- Temperatura media esterna
- Numero di dati a disposizione per i singoli intervalli di dati acquisiti

- Temperatura media pesata in base al numero di dati a disposizione nel caso di sistema di raffrescamento attivo e spento.

Le successive otto tabelle riportano i suddetti dati per gli intervalli d'irraggiamento considerati e vengono accompagnati dai grafici degli andamenti dell'incremento percentuale del rendimento in funzione della temperatura esterna.

600 ÷ 650 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	ηm con raff.	ηm senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
26 ÷ 28	27,36	27,14	27,20	0,144	0,142	5	12	1,4
34 ÷ 36	34,91	34,74	34,80	0,144	0,138	7	12	4,3

Tabella 2-44: Intervallo di irraggiamento solare 600 ÷ 650 [W/m²]

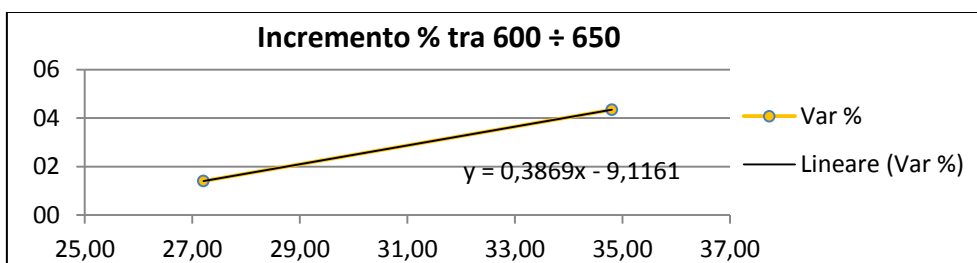


Figura 2-70: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 600 ÷ 650 [W/m²] di irraggiamento solare

650 ÷ 700 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	ηm con raff.	ηm senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
28 ÷ 30	29,15	29,13	29,14	0,146	0,142	13	22	2,8
30 ÷ 32	30,77	30,92	30,85	0,145	0,138	15	16	5,1
32 ÷ 34	33,07	32,95	33,00	0,15	0,138	10	15	8,7
34 ÷ 36	34,98	34,9	34,93	0,137	0,134	6	13	2,2

Tabella 2-45: Intervallo di irraggiamento solare 650 ÷ 700 [W/m²]

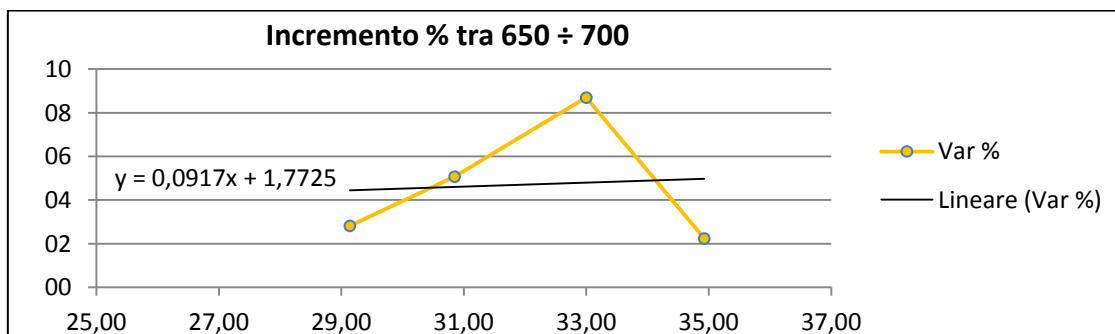


Figura 2-71: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 650 ÷ 700 [W/m²] di irraggiamento solare

700 ÷ 750 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	ηm con raff.	ηm senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
28 ÷ 30	29,06	29,13	29,10	0,142	0,139	11	17	2,2
30 ÷ 32	30,96	31,14	31,04	0,141	0,138	22	18	2,2
32 ÷ 34	32,9	31,1	31,74	0,145	0,139	6	11	4,3
34 ÷ 36	35,07	34,93	35,01	0,14	0,133	13	11	5,3

Tabella 2-46: Intervallo di irraggiamento solare 700 ÷ 750 [W/m²]

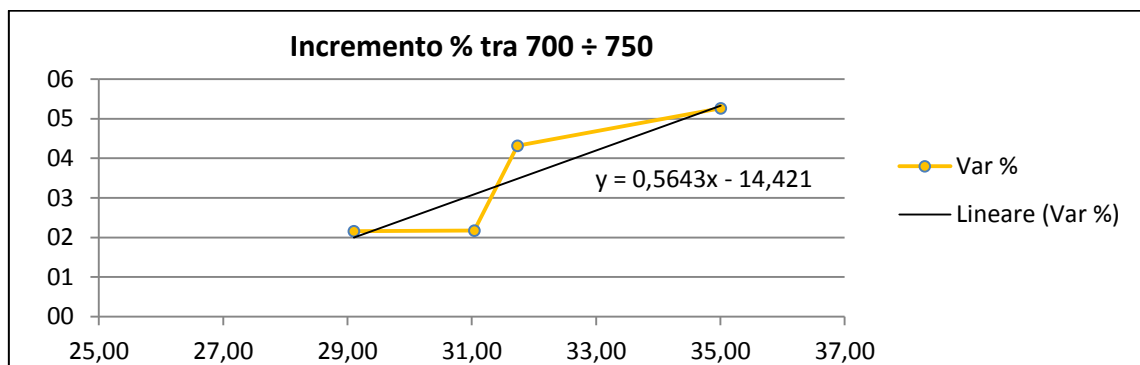


Figura 2-72: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 700 ÷ 750 [W/m²] di irraggiamento solare

750 ÷ 800 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	ηm con raff.	ηm senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
30 ÷ 32	30,89	30,92	30,91	0,143	0,14	16	21	2,14
32 ÷ 34	33,16	33	33,08	0,135	0,132	16	17	2,27
34 ÷ 36	35,1	34,79	34,92	0,14	0,135	11	15	3,70

Tabella 2-47: Intervallo di irraggiamento solare 750 ÷ 800 [W/m²]

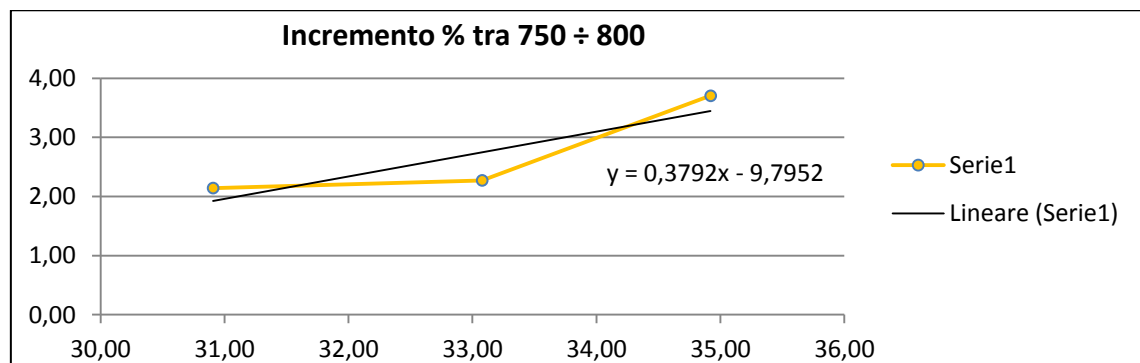


Figura 2-73: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 750 ÷ 800 [W/m²] di irraggiamento solare

800 ÷ 850 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	ηm con raff.	ηm senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
30 ÷ 32	31,07	31,06	31,07	0,143	0,14	19	19	2,1
34 ÷ 36	35,02	34,95	34,98	0,142	0,139	12	15	2,2

Tabella 2-48: Intervallo di irraggiamento solare 800 ÷ 850 [W/m²]

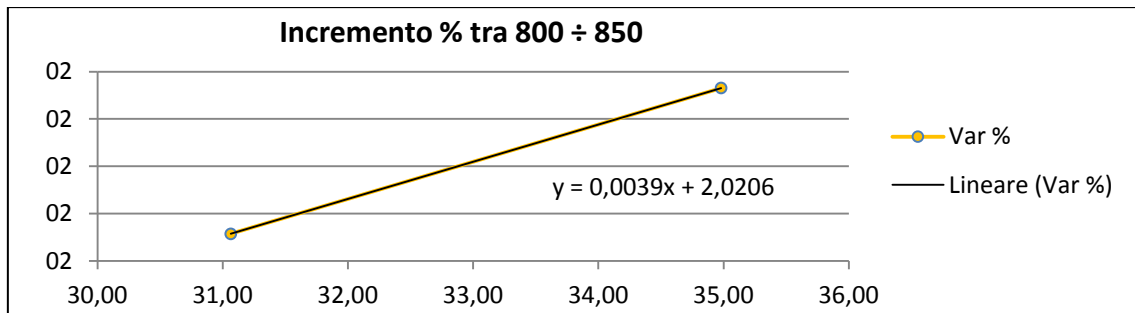


Figura 2-74: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 800 ÷ 850 [W/m²] di irraggiamento solare

850 ÷ 900 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	ηm con raff.	ηm senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
28 ÷ 30	29,12	29,3	29,26	0,145	0,14	6	18	3,6
30 ÷ 32	31,15	31,19	31,17	0,143	0,136	21	25	5,1
32 ÷ 34	32,75	33,01	32,90	0,145	0,141	17	25	2,8
34 ÷ 36	35,06	34,82	34,90	0,136	0,133	10	22	2,3

Tabella 2-49: Intervallo di irraggiamento solare 850 ÷ 900 [W/m²]

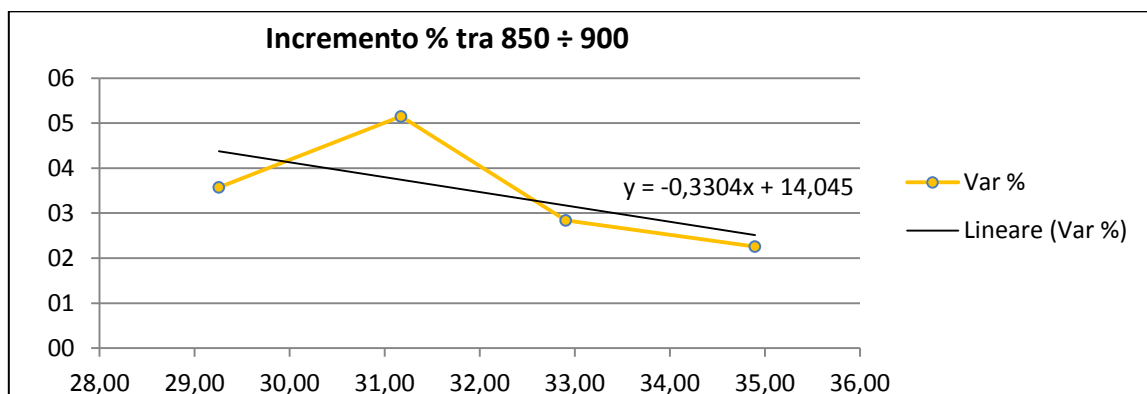


Figura 2-75: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 850 ÷ 900 [W/m²] di irraggiamento solare

900 ÷ 950 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	ηm con raff.	ηm senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
28 ÷ 30	29,12	28,96	29,02	0,143	0,14	9	17	2,1
30 ÷ 32	31,27	31	31,10	0,138	0,134	21	35	3,0
32 ÷ 34	33,11	33,06	33,08	0,141	0,137	32	56	2,9
34 ÷ 36	35,34	34,93	35,05	0,142	0,131	17	39	8,4

Tabella 2-50: Intervallo di irraggiamento solare 900 ÷ 950 [W/m²]

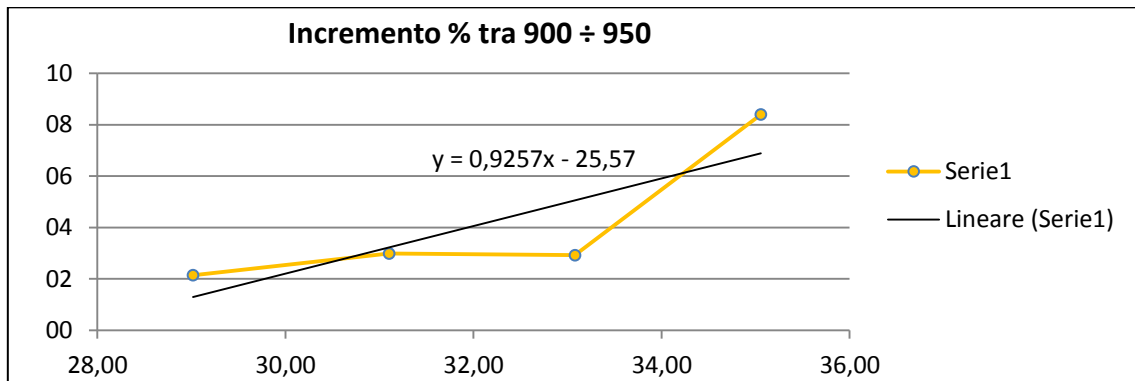


Figura 2-76: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 900 ÷ 950 [W/m²] di irraggiamento solare

950 ÷ 1000 [W/m ²]	Tmedia con raff.	Tmedia senza raff.	Tmedia pesata	ηm con raff.	ηm senza raff.	N° dati con raff.	N° dati senza raff.	Incremento [%]
28 ÷ 30	29,69	29,1	29,24	0,14	0,136	7	22	2,9
30 ÷ 32	30,99	31,18	31,09	0,142	0,13	35	41	9,2
32 ÷ 34	33,16	33	33,08	0,144	0,131	54	55	9,9
34 ÷ 36	34,74	34,85	34,79	0,142	0,132	36	31	7,6

Tabella 2-51: Intervallo di irraggiamento solare 950 ÷ 1000 [W/m²]

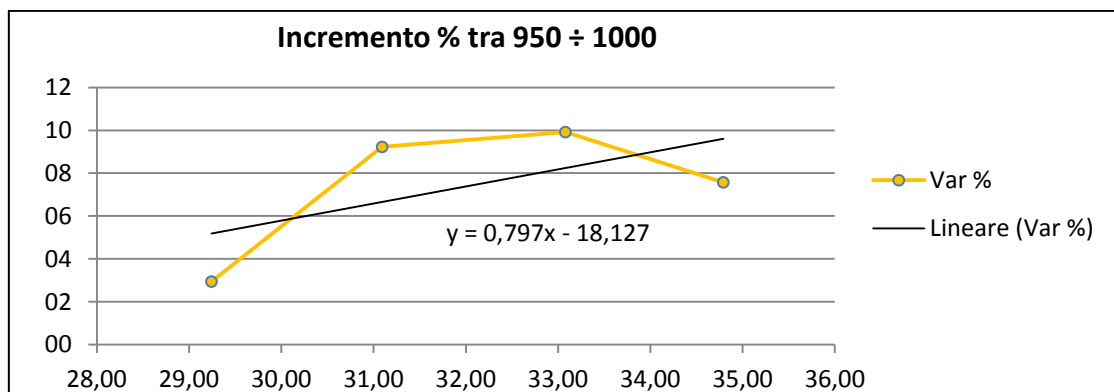


Figura 2-77: Andamento dell'incremento percentuale del rendimento tra 950 ÷ 1000 [W/m²] di irraggiamento solare

I grafici e le equazioni, che descrivono la linea di tendenza, evidenziano che, con la quantità di dati a disposizione per l'impianto Fotocromo, i valori di incremento del rendimento sono falsati dal fatto che non si riesce a rilevare l'andamento del rendimento correttamente. Di conseguenza si consiglia di utilizzare i risultati ottenuti dagli esperimenti FV-1, FV-2 e FV-3, eseguiti sul prototipo Genera, i quali possono essere considerati validi, a parità di condizioni di funzionamento, per impianti fotovoltaici di taglie differenti.

3. ATTIVITA' MODELLISTICA

Lo studio di ricerca relativo all'influenza del sistema di raffrescamento sulla produzione annua di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico, si conclude con l'attività modellistica. Essa è composta da tre fasi distinte:

- Creazione del modello dinamico (tramite TRNSYS 16) dell'impianto idrico per determinare la gestione dell'acqua e dimensionare la cisterna da interrare per la raccolta delle acque meteorologiche e di quelle di sistema
- Creazione del modello dinamico (tramite TRNSYS 16) dell'impianto fotovoltaico del prototipo Genera per valutare la produzione di energia elettrica in un anno meteorologico tipo (Test Reference Year)
- Estensione dei dati trovati durante la fase di sperimentazione ed estenderli a tutto l'anno, calcolando l'incremento di produzione annua che si ottiene con la presenza del sistema di raffrescamento dei moduli fotovoltaici.

3.1. TRNSYS

TRNSYS è un programma di simulazione dinamica con una struttura modulare. Esso riconosce un linguaggio di descrizione di sistema in cui l'utente specifica i componenti che costituiscono il sistema ed il modo in cui sono collegati. La biblioteca TRNSYS include molti dei componenti che si trovano comunemente nei sistemi di energia termica ed elettrica, nonché di componenti per gestire l'input dei dati meteorologici e l'output dei risultati della simulazione. La natura modulare del programma garantisce una grande flessibilità e facilita l'integrazione di modelli matematici non inclusi nella libreria standard di TRNSYS. Il software è adatto ad analisi dettagliate di ogni sistema il cui comportamento dipende dal trascorrere del tempo. TRNSYS è diventato uno dei programmi di riferimento per i ricercatori e gli ingegneri di tutto il mondo e le principali applicazioni sono:

- Sistemi solari (solare termico e fotovoltaico)
- Edifici a basso consumo energetico
- Sistemi HVAC
- Sistemi energie rinnovabili
- Cogenerazione
- Celle
- Combustibile

3.2. GESTIONE ACQUA E DIMENSIONAMENTO CISTERNA

L'intero sistema non può prescindere dall'utilizzo dell'acqua raccolta dalle precipitazioni atmosferiche e da quella che si riesce a recuperare quando si è nelle condizioni di impianto di raffrescamento attivo. Per questo motivo si è deciso di creare un modello che simuli il fabbisogno idrico orario che caratterizza il prototipo Genera durante un anno tipo.

Facendo riferimento al ciclo dell'acqua descritto al paragrafo 2.1.7., in figura 3-1 è possibile osservare l'interfaccia grafica del software TRNSYS che descrive esattamente il prototipo Genera.

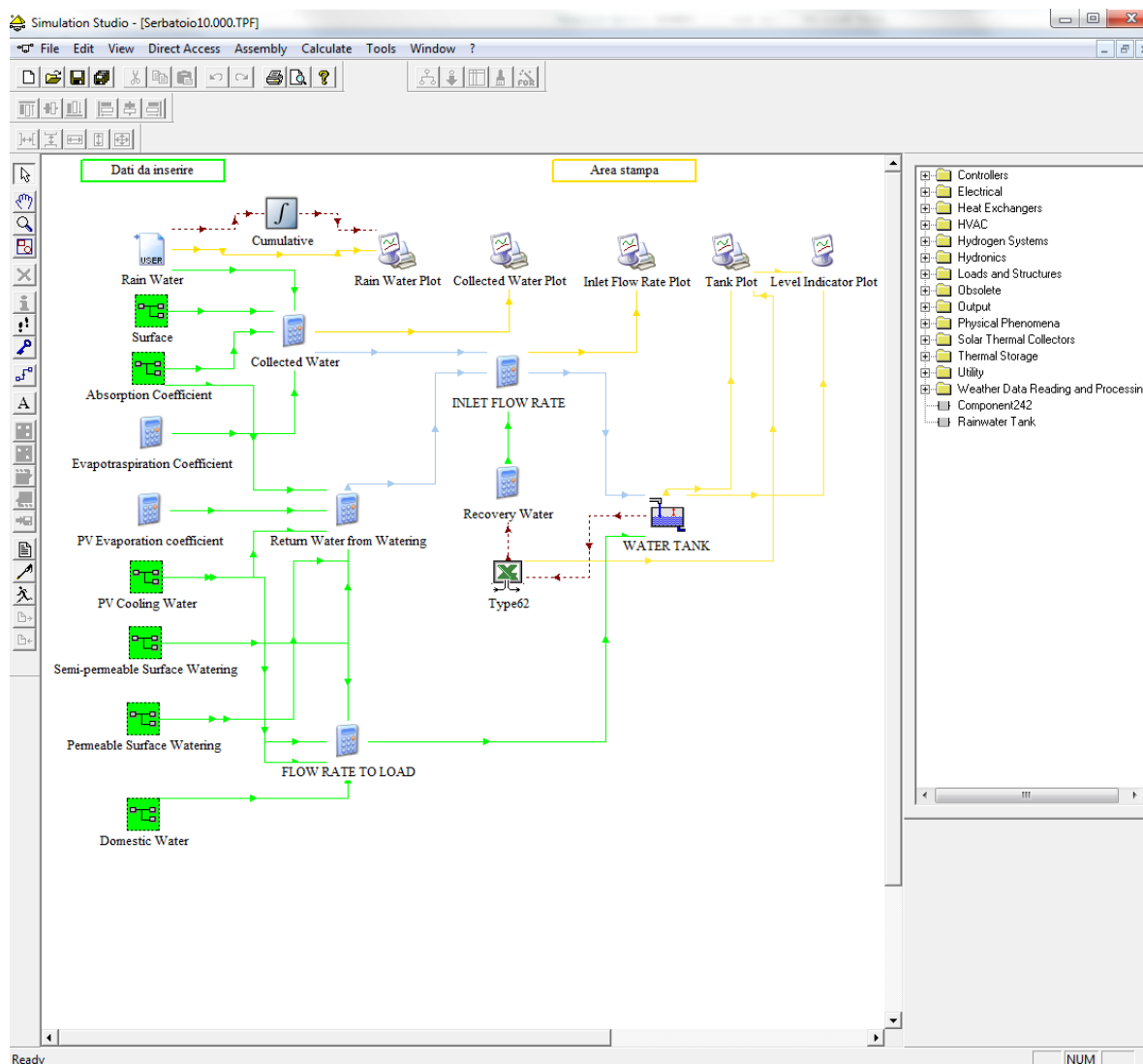


Figura 3-1: Modello dinamico che simula la gestione dell'acqua del prototipo Genera

Il modello è suddivisibile in tre macro-aree:

- Area di inserimento dati, la quale è composta da tutti i type (il type è il nome che viene utilizzato per identificare ogni componente all'interno del software, es. type62 identifica una interfaccia Excel di calcolo) da cui partono le frecce di colore verde
- Area di stampa, la quale è composta da tutti i type a cui arrivano le frecce di colore giallo
- Area di processo o di calcolo, la quale è composta dal type che simula il funzionamento della cisterna (Water Tank) e dai type da cui partono le frecce di colore azzurro.

L'area di inserimento dati è la zona in cui vengono inseriti tutti i coefficienti che descrivono i fenomeni fisici nelle condizioni in cui il sistema dovrà lavorare. Di seguito si elencano i principali fattori da inserire:

- Il dato orario delle precipitazioni atmosferiche dell'anno tipo (TRY)
- Le superfici interessate: sup. pannelli fotovoltaici, sup. giardino che deve essere irrigato, sup. tetto verde, etc.
- Il coefficiente di assorbimento per le differenti stratigrafie di terreno
- I coefficienti di evapotraspirazione del tetto verde e di evaporazione dei pannelli fotovoltaici
- I fabbisogni idrici necessari a: irrigazione giardino e tetto verde nei mesi primaverili ed estivi, raffrescamento fotovoltaico nei periodi in cui il sistema è attivo e i fabbisogni di acqua sanitaria durante tutta la durata dell'anno tipo.

Tutti questi dati sono gli input che entrano nelle equazioni contenute nei type dell'area di processo e di calcolo:

- Collected Water: type che simula la portata oraria di acqua raccolta in cisterna dalle precipitazioni atmosferiche
- Return Water from Watering: type che simula la portata oraria di acqua raccolta in cisterna proveniente dall'irrigazione del giardino, del tetto verde e dal raffrescamento dei pannelli fotovoltaici
- Flow Rate to Load: type che simula la portata oraria di acqua richiesta alla cisterna per soddisfare i fabbisogni sopra descritti
- Inlet Flow Rate: type che simula la portata oraria di acqua raccolta in cisterna
- Water Tank: type che simula il funzionamento orario della cisterna regolando il troppo pieno ed il reintegro dall'acquedotto

L'area di stampa include type in grado di rappresentare graficamente gli andamenti di maggior interesse. In figura 3-2 si può osservare il grafico rappresentante le precipitazioni atmosferiche che caratterizzano l'anno tipo: le linee rosse rappresentano i mm di pioggia caduti in un m², caduti in una determinata ora dell'anno; mentre la linea blu rappresenta la cumulata dell'intero anno di precipitazioni in mm.

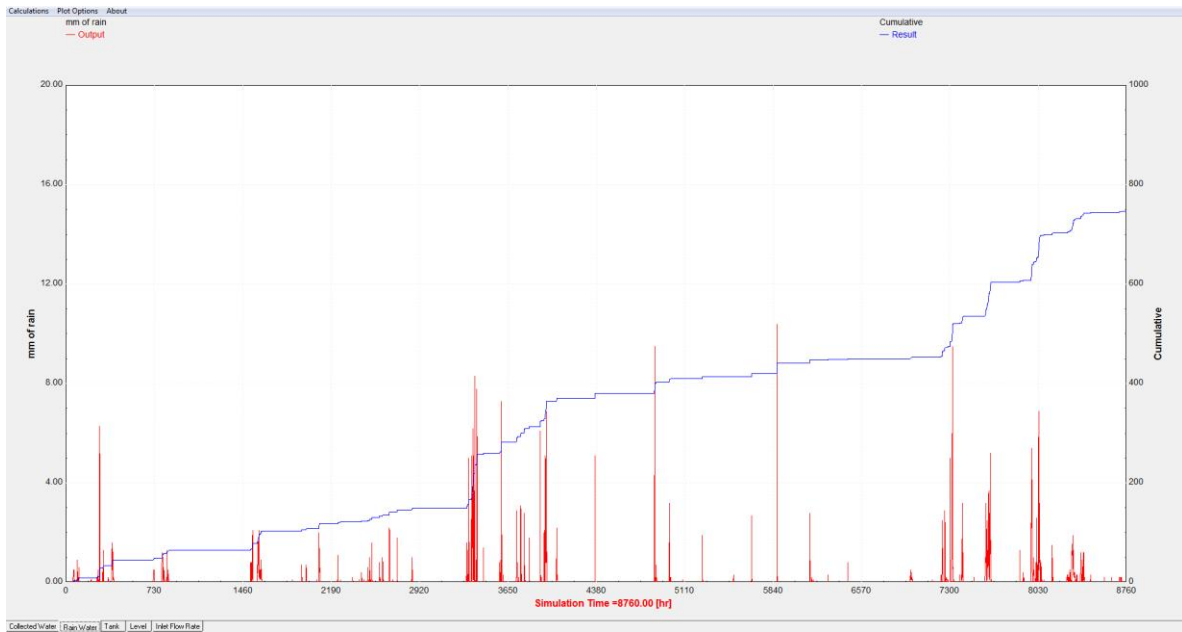


Figura 3-2: Andamento delle precipitazioni anno tipo

3.3. MODELLO DI SIMULAZIONE IMPIANTO FOTOVOLTAICO

Per la modellazione dell'impianto fotovoltaico nella libreria di TRNSYS sono presenti type che simulano le varie tipologie di pannelli.

È stato quindi scelto il componente che rappresenta i moduli in Silicio monocristallino ed è stato settato con i dati della scheda tecnica dei pannelli costituenti l'impianto fotovoltaico nel prototipo Genera. In figura 3-3 è possibile osservare l'interfaccia grafica del progetto fotovoltaico:

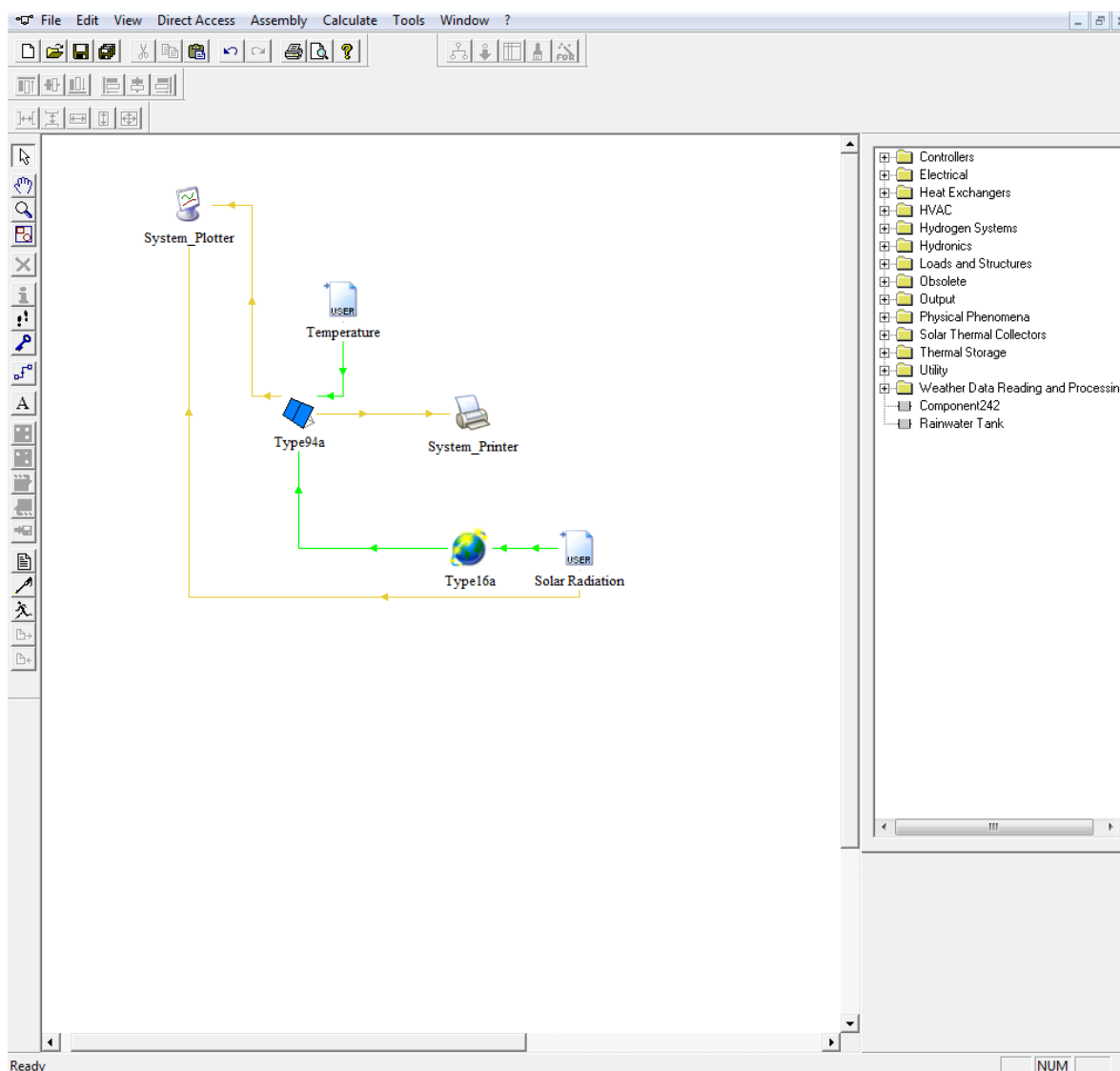


Figura 3-3: Modello dinamico che l'impianto fotovoltaico del prototipo Genera

Il type94a rappresenta l'impianto fotovoltaico il quale, come già illustrato per il modello esposto nel precedente paragrafo, in ingresso ha le frecce di colore verde, che rappresentano gli input forniti al type (irradiazione solare e temperatura esterna) ed in uscita ha le grandezze fisiche che si desiderano graficare (linee di colore giallo).

È di estrema importanza sottolineare che il sistema è stato tarato con i dati storici raccolti tramite i sistemi di misura e acquisizione di cui il prototipo è fornito. Ovvero sono stati inseriti i dati di irraggiamento solare e temperatura esterna di un determinato periodo

dell'anno e si è confrontato lo scostamento fra i dati misurati in situ di produzione fotovoltaica ed il risultato della simulazione. Al fine di ridurre tale scostamento e quindi tarare il modello di simulazione, si è effettuato un "fine tuning", ossia una messa a punto de parametri descrittivi dell'impianto. Eseguita la taratura si è di fronte ad un modello che risponde alle sollecitazioni esterne, quali irraggiamento solare e temperatura aria, fornendo dati di produzione solare prossimi a quelli realmente misurati.

Successivamente, inserendo i dati di irraggiamento solare e di temperatura esterna dell'anno tipo (TRY), si è calcolata la produzione oraria annua di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico del prototipo Genera.

3.4. CALCOLO DELL'INCREMENTO ANNUO DI PRODUZIONE

Per il calcolo dell'incremento annuo di produzione sono state seguite due strade: la prima per valutare il beneficio derivante l'azione di abbassamento della temperatura dei moduli fotovoltaici, grazie alla presenza dell'impianto di raffrescamento, la seconda per ottenere l'incremento di produzione nel caso in cui, oltre al sistema di raffrescamento dei moduli, sia presente il verde pensile in prossimità dell'impianto fotovoltaico. Per tale scopo, è stato preparato un foglio di calcolo Excel che permette di variare le modalità di funzionamento dello stesso.

Nel programma sono stati inseriti i seguenti valori:

- Dati relativi all'anno tipo (TRY) con frequenza oraria: data, ora, temperatura esterna ed irraggiamento solare
- Risultati simulazione dinamica (TRNSYS): sono stati inseriti i dati di potenza oraria, simulati con il modello spiegato nel precedente paragrafo, riferiti all'anno tipo.

Inoltre sono stati inseriti tre fattori che vengono utilizzati per modificare le condizioni di funzionamento del sistema di raffrescamento. Per le ore in cui il sistema risulta attivo, alla rispettiva potenza generata dai pannelli, viene aggiunto un incremento che, seguendo le equazioni che descrivono l'andamento dell'incremento percentuale di produzione di energia elettrica, ed in base all'irraggiamento e alla temperatura esterna in cui ci si trova nella specifica ora del dato giorno, permette di ottenere il valore di potenza generata dai pannelli raffrescati.

I tre fattori con i quali si è in grado di modificare le condizioni di lavoro sono:

- Fattore data
- Fattore ora
- Fattore temperatura.

Per determinare la modalità migliore con cui settare l'impianto di raffrescamento, sono stati verificati cinque differenti casi studio (le condizioni che variano da caso a caso verranno scritte in grassetto):

3.4.1. CASO STUDIO 1 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)

Le condizioni di funzionamento sono:

- Giorni dell'anno in cui il sistema di raffrescamento è attivo: dal 1 aprile al 30 settembre
- Orari in cui il sistema di raffrescamento è attivo: dalle 11:00 alle 16:00
- Il sistema si attiva se e solo se la radiazione solare supera i 600 W/m^2 .

Il calcolo dell'aumento di produzione viene eseguito paragonando l'energia elettrica prodotta dall'impianto con e senza l'impianto di raffrescamento attivo, come è possibile visionare di seguito:

quindi

3.4.2. CASO STUDIO 2 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)

Le condizioni di funzionamento sono:

- Giorni dell'anno in cui il sistema di raffrescamento è attivo: **dal 1 gennaio al 31 dicembre**
- Orari in cui il sistema di raffrescamento è attivo: dalle 11:00 alle 16:00
- Il sistema si attiva se e solo se la radiazione solare supera i 600 W/m^2 .

quindi

3.4.3. CASO STUDIO 3 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)

Le condizioni di funzionamento sono:

- Giorni dell'anno in cui il sistema di raffrescamento è attivo: dal 1 gennaio al 31 dicembre
- Orari in cui il sistema di raffrescamento è attivo: **dalle 06:00 alle 21:00**
- Il sistema si attiva se e solo se la radiazione solare supera i 600 [W/m²].

quindi

3.4.4. CASO STUDIO 4 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)

Le condizioni di funzionamento sono:

- Giorni dell'anno in cui il sistema di raffrescamento è attivo: dal 1 gennaio al 31 dicembre
- Orari in cui il sistema di raffrescamento è attivo: **dalle 11:00 alle 16:00**
- Il sistema si attiva se e solo se la radiazione solare supera i **500 [W/m²]**
- Il sistema si attiva se e solo se la temperatura esterna è maggiore o uguale a **25 [°C]**.

quindi

3.4.5. CASO STUDIO 5 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)

Le condizioni di funzionamento sono:

- Giorni dell'anno in cui il sistema di raffrescamento è attivo: dal 1 gennaio al 31 dicembre
- Orari in cui il sistema di raffrescamento è attivo: **dalle 06:00 alle 21:00**
- Il sistema si attiva se e solo se la radiazione solare supera i 500 [W/m²]
- Il sistema si attiva se e solo se la temperatura esterna è maggiore o uguale a 25 [°C].

quindi

3.4.6. CASO STUDIO 6 (SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)

Le condizioni di funzionamento sono:

- Giorni dell'anno in cui il sistema di raffrescamento è attivo: dal 1 gennaio al 31 dicembre
- Orari in cui il sistema di raffrescamento è attivo: dalle 06:00 alle 21:00
- Il sistema si attiva se e solo se la radiazione solare supera i 500 [W/m²]
- Il sistema si attiva se e solo se la temperatura esterna è maggiore o uguale a **20** [°C].

quindi

3.4.7. CASO STUDIO 7 (PRESENZA DEL VERDE PENSILE E SISTEMA DI RAFFRESCAMENTO ATTIVO)

Le condizioni di funzionamento sono:

- Giorni dell'anno in cui il sistema di raffrescamento è attivo: dal 1 gennaio al 31 dicembre
- Orari in cui il sistema di raffrescamento è attivo: dalle 06:00 alle 21:00
- Il sistema si attiva se e solo se la radiazione solare supera i 500 [W/m²]
- Il sistema si attiva se e solo se la temperatura esterna è maggiore o uguale a 20 [°C].

quindi

4. CONCLUSIONI

Il presente studio di ricerca evidenzia come l'azione di abbassamento della temperatura delle celle fotovoltaiche, dovuta alla presenza del verde pensile e all'azione del sistema di raffrescamento installato sul prototipo Genera, comporti un aumento di produttività dell'impianto fotovoltaico. L'incremento percentuale varia secondo la frequenza ed il tempo di bagnatura.

Dai test e dalle elaborazioni effettuati sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- Incremento di produzione annua di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico munito di sistema di raffrescamento dei moduli, rispetto allo stesso in configurazione tradizionale:

- Incremento di produzione annua di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico munito di sistema di raffrescamento e circondato da verde pensile estensivo, rispetto allo stesso in configurazione tradizionale:

I risultati sono stati ottenuti considerando che il sistema di raffrescamento si attivi al verificarsi di due condizioni: la temperatura esterna deve essere maggiore o uguale di 20°C e la radiazione solare deve essere superiore a 500 W/m². Solo il verificarsi della combinazione di queste due condizioni consente l'attivazione del sistema di raffrescamento che rimane in funzione, nella modalità di irrigazione registrata e gestita dalla centralina dell'impianto idrico, fino a quando una delle due non è più verificata.

Sia per un aspetto economico che per uno deontologico, trattandosi di energia da fonti rinnovabile, il sistema può entrare in funzione solo nel momento in cui l'acqua utilizzata per raffreddare i moduli viene rifornita dalla cisterna di accumulo e non acquistata dall'acquedotto.

I risultati ottenuti non tengono conto della spesa energetica per il funzionamento della pompa dell'impianto idrico che si attiva ad ogni ciclo di raffrescamento.

Se questo fattore influenzerà negativamente il risultato, bisogna mettere in evidenza un altro fattore che, al contrario, porta in sé un ulteriore incremento di produzione. Infatti, per i problemi già menzionati di flessibilità della centralina, lo studio di ricerca è rimasto vincolato alla frequenza dei cicli di irrigazione pari a 1 min ogni 30 min. Aumentandola ed ottimizzandola si riuscirà ad ottenere una temperatura media dei pannelli minore di quella attuale, incrementando così il risultato finale.

5. BIBLIOGRAFIA

- Abdolzadeh - Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells - 2009
- Cox Bryce Kevin - The influence of ambient temperature on green roof R-values - 2010
- Czemieli Berndtsson Justyna - Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review - 2009
- Del Barrio Elena Palomo - Analysis of the green roofs cooling potential in buildings - 1997
- Diem Alfred - Integrated rainwater management with green roof - building site "Hohlgrabenaecker" in Stuttgart-Zuffenhausen - 2009
- Eumorfopoulou Ekaterini - The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece 1997
- Hui Sam - Integration of green roof and solar photovoltaic systems 2011
- Jianqiang Gao - Study on the temperature Variation of the water-cooled photovoltaic solar template – 2010
- Koehler Manfred - Energetic aspects of green roofs - 2009
- Koehler Manfred - Energetic effects of green roof to the urban climate near to the ground and to the building surfaces - 2004
- Koehler Manfred - Interaction between pv-systems and extensive green roofs - 2007
- Koehler Manfred - Photovoltaic-panels on greened roofs - positive interaction between two elements of sustainable architecture - 2002
- Koehler Manfred - Urban water retention by greened roofs in temperate and tropical climate
- Koehler Manfred - Using rainwater to cool buildings
- Liu - Thermal performance of green roofs through field evaluation 2003
- Mentens Jeroen - Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? - 2005
- Niachou - Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance - 2001
- Odeh Saad - Improving photovoltaic module efficiency using water cooling - 2009
- Onmura - Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens - 2000
- Roth-Kleyer Stephan - Green roofs as a module of urban water management - 2009
- Sailor David - A green roof model for building energy simulation programs - 2008
- Santamouris - Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green

roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece - 2007

Sarhaddi - Exegetic performance evaluation of a solar photovoltaic (PV) array -2010

Scherba Adam - Modeling the impact of green roof reflectivity, intergrated photovoltaic panels and green roof systems on the summertime heat island - 2011

Schmidt Marco - Rainwater harvesting for mitigating local and global warming - 2009

Sonne Jeffrey - Evaluating green roof energy performance - 2006

Takakuka - Cooling effect of greenery cover over a building - 1998

Wong - The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore - 2002