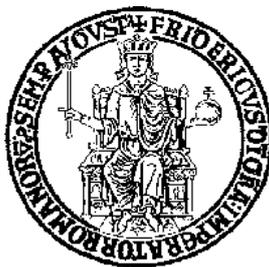


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

TESI DI LAUREA

**PROGETTAZIONE DI UN SET-UP SPERIMENTALE PER L'ANALISI DI PANNELLI
FOTOVOLTAICI COGENERATIVI**

RELATORI

CH.MO PROF. ING. FRANCESCO CALISE
CH.MO PROF.ING. MASSIMO DENTICE D'ACCADIA

CANDIDATO

MELANIA DI DONATO M67/74

CORRELATORI

ING. GABRIELE FERRUZZI
ING. CHRISTIAN SPERANZA
ING. MARIA VICIDOMINI

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

ABSTRACT

Il lavoro di tesi riguarda la progettazione di un set-up sperimentale per l'analisi di collettori fotovoltaici cogenerativi, prevedendone la futura installazione presso il XII piano dell'edificio dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, sito in P.le Tecchio 80, Napoli. L'obiettivo del lavoro è la progettazione di tutti i componenti necessari all'installazione del set-up sperimentale. Parallelamente, è stata effettuata anche una simulazione dinamica in ambiente TRNSYS di un impianto solare per la produzione di energia termica ed elettrica affine a quello progettato, con l'obiettivo di confrontare dal punto di vista energetico ed economico collettori solari fotovoltaici convenzionali con collettori solari fotovoltaici cogenerativi. L'analisi simulativa consentirà di definire con maggiore accuratezza la tipologia di prove sperimentali da effettuare sull'impianto in corso di costruzione.

La progettazione del set-up sperimentale è stata possibile grazie alla collaborazione scientifico-didattica tra il DII-Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e l'azienda AvProject srl, operante dal 2008 nel settore dell'energia nello stabilimento di Manocalzati, in provincia di Avellino

Il set-up si sviluppa secondo due sottosistemi: un primo sottosistema è composto da quattro collettori fotovoltaici piani in silicio policristallino, in grado di fornire energia elettrica, e un secondo sottosistema è composto da quattro collettori fotovoltaici piani cogenerativi, denominati "Janus" (fig.1), in grado di fornire sia energia elettrica che energia termica.



Figura 1-Pannello Fotovoltaico Cogenerativo Janus

Il set-up così progettato consentirà di:

- confrontare le rese del sottosistema fotovoltaico tradizionale con le rese del sottosistema fotovoltaico cogenerativo, allo scopo di evidenziare in quali periodi dell'anno e in quali condizioni climatiche l'uno risulti più conveniente dell'altro;
- analizzare le configurazioni impiantistiche che massimizzano le prestazioni del sottosistema fotovoltaico cogenerativo, in particolare modificando i parametri operativi mediante l'uso dell'apposito applicativo di controllo e determinando i valori di tali parametri che massimizzano le rese termica ed elettrica;
- suggerire possibili modifiche progettuali al produttore dei pannelli allo scopo di migliorare l'efficienza, in funzione delle tipologie di utenza servita.

In generale, le due tecnologie più diffuse con cui è possibile convertire l'energia solare sono quella fotovoltaica e quella solare termica; esse sfruttano in maniera differente la radiazione solare, ottenendo, rispettivamente, energia elettrica ed energia termica. Si è, quindi, pensato di integrare le due tecnologie impiantistiche in un unico collettore ibrido, definito fotovoltaico cogenerativo o dall'inglese photovoltaic thermal collector-PVT, ed avere, simultaneamente, le due forme di energia. Oltre al vantaggio del doppio utilizzo, l'idea di realizzare i PVT ha avuto un riscontro positivo anche grazie ad un altro importante fattore: un normale modulo fotovoltaico è in grado di convertire in energia elettrica solo una piccola porzione della radiazione solare, mentre il resto viene perso per riflessione o viene dissipato sotto forma di calore. Questo

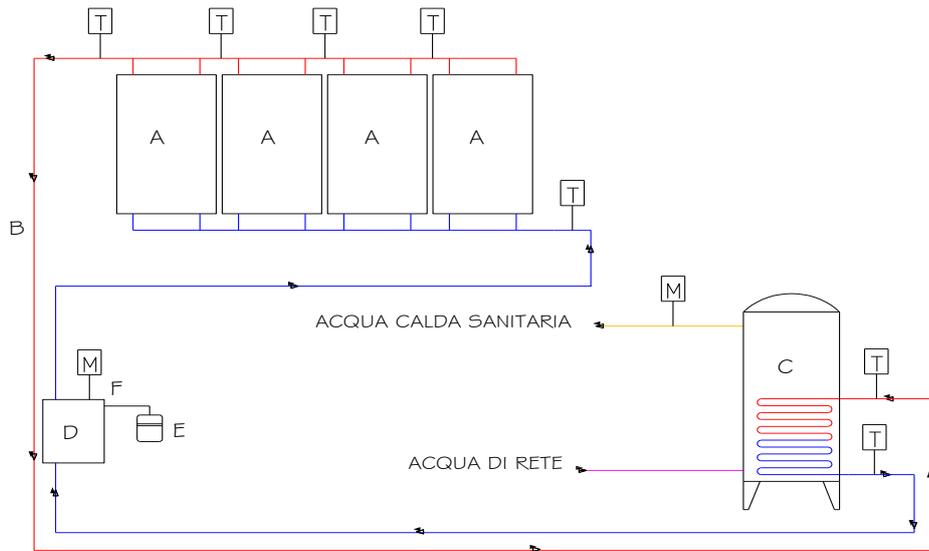
calore, nei moduli convenzionali, viene disperso nell'ambiente e, dunque, sprecato, mentre i moduli ibridi riescono a recuperare buona parte del calore, trasferendolo al fluido termovettore che circola in essi. Inoltre, il rendimento del modulo fotovoltaico tende a decrescere all'aumentare della temperatura di esercizio. Pertanto, nel caso di collettori fotovoltaici cogenerativi operanti in circuiti a bassa temperatura, il rendimento elettrico può essere anche maggiore rispetto a quello dei pannelli fotovoltaici convenzionali.

I componenti principali del sistema termico sono:

- i Collettori fotovoltaici cogenerativi "Janus", che assorbono il calore proveniente dal Sole;
- il Serbatoio di accumulo, all'interno del quale è presente la serpentina che permette lo scambio termico tra il fluido del circuito primario (che circola proprio nella serpentina) e l'acqua di rete (presente nel serbatoio stesso);
- le Tubazioni di collegamento, mandata e ritorno, che connettono i collettori alla serpentina del serbatoio di accumulo;
- la Pompa di circolazione, per la circolazione del fluido termovettore nel circuito primario;
- il Vaso di espansione, che consente al fluido di espandersi, evitando sovrappressioni pericolose dovute all'innalzamento delle temperature e, quindi, all'aumento del volume del fluido;
- il Misuratore di portata, per misurare la portata di fluido;
- le Termoresistenze, per misurare la temperatura.

A partire dalle caratteristiche del collettore fotovoltaico cogenerativo "Janus" è stato effettuato il dimensionamento dei componenti e, nel complesso, dell'impianto termico, il cui schema di funzionamento è rappresentato nella seguente figura 2:

SCHEMA FUNZIONALE IMPIANTO IDRICO E SOLARE TERMICO



LEGENDA	
	MANDATA CIRCUITO SOLARE IN MULTISTRATO CON COIBENTAZIONE ESTERNA
	RITORNO CIRCUITO SOLARE IN MULTISTRATO CON COIBENTAZIONE ESTERNA
	LINEA PRINCIPALE ACQUA FREDDA IN MULTISTRATO
	LINEA PRINCIPALE ACQUA CALDA SANITARIA IN MULTISTRATO
A	COLLETTORI FOTOVOLTAICI COGENERATIVI 'JANUS'
B	KIT DI CONNESSIONE IDRAULICA PER L'INSTALLAZIONE
C	SERBATOIO DI ACCUMULO
D	POMPA DI CIRCOLAZIONE
E	VASO DI ESPANSIONE
F	KIT DI FISSAGGIO PER IL VASO DI ESPANSIONE
	MISURATORE DI PORTATA
	MISURATORE DI TEMPERATURA

Figura 2-Schema impianto termico

Utilizzando le metodiche comuni alla termotecnica sono stati dimensionati tutti i componenti dell'impianto. I principali dati progettuali sono riassunti nelle seguenti tabelle (Tab.1 e Tab.2):

SERBATOIO DI ACCUMULO		Volume= 200l; Pmax=10bar; Tmax=+95°C
TUBAZIONI DI COLLEGAMENTO	Tubazioni in PEX	Portata= 25l/h; $\phi_i=8$; $\phi_e=12$; $v=0,36$ m/s; $r=28$ mm c.a/m; $T_{H_2O}=80^\circ\text{C}$
	Tubazioni in MULTISTRATO	Portata= 200l/h; $\phi_i=15$; $\phi_e=20$; $v=0,57$ m/s; $r=28$ mm c.a/m; $T_{H_2O}=80^\circ\text{C}$
POMPA DI CIRCOLAZIONE		Portata volumetrica=fino a $0,35\text{m}^3/\text{h}$; Pmax=10bar; T fluido=da 2 a 65°C
VASO DI ESPANSIONE		Volume nominale=25 l Pressione iniziale, lato gas= 1,5 bar Pressione finale, lato gas= 5,5 bar

Tab.1-Componenti

MISURATORE DI PORTATA	Campo di misura della portata=0,5-20l/min Campo di misura della temperatura=0-85°C Campo di misura della pressione=0-1MPa Ripetibilità: Valori visualizzati=±2%F.S. Uscita analogica=±1,5%F.S.
MISURATORE DI TEMPERATURA	Pt100:Campo di misura della temperatura=-50°C a 200°C Classe di precisione B a norma IEC60751:2008
PIRANOMETRO	Campo di misura della radiazione solare= 0-2000 W/m ² Campo di misura della temperatura=-40°C a 80°C Sensibilità tipica=10mV/(kW/m ²) Impedenza=5Ω-55Ω Instabilità a lungo termine=<2%
DATALOGGER	Alimentazione in uscita ai sensori=24 Vcc±5% Consumo=250VA Campo di misura della temperatura operativa=0-50°C Campo di misura della temperatura di immagazzinamento=-10°C a 70°C

Tab.2-Strumenti di misura

Il modulo fotovoltaico è costituito da più celle collegate tra di loro in modo da ottenere valori di tensione e di corrente adatti al comune impiego. Nel modulo le celle sono protette da due strati di E.V.A. (etilene vinile acetato), che, oltre a proteggerle per almeno 20 anni, ritardano anche il fenomeno dell'ingiallimento dovuto ai raggi UV. Lo schema di un impianto fotovoltaico, dal punto di vista elettrico, deve garantire il corretto allacciamento in rete e il corretto utilizzo dell'energia prodotta dal sistema. Gli impianti fotovoltaici possono beneficiare dei meccanismi di scambio sul posto. Pertanto l'elettricità prodotta dal pannello potrà essere scorporata dalla fornitura elettrica, anche se la produzione non è contestuale all'utilizzo, a patto che il consuntivo annuo sia tale che l'energia elettrica prodotta dal fotovoltaico sia inferiore a quella richiesta dall'utenza. In caso contrario, la quota eccedente viene ceduta in rete.

Il corretto schema elettrico deve prevedere la misurazione accurata di almeno tre quantità:

- la quantità di energia totale prodotta dall'impianto, misurata da un contatore unidirezionale;
- la quantità di energia totale immessa nella rete, misurata da un contatore bidirezionale;
- la quantità di energia totale prelevata dalla rete, misurata da un contatore bidirezionale.

Lo schema di un impianto fotovoltaico è differente da caso a caso; ad esempio un impianto domestico di 2-3 kW di potenza, realizza uno schema elettrico di connessione relativamente semplice, rispetto a quello di una vera e propria centrale fotovoltaica di 1 o più MW di potenza, che risulta sicuramente più complesso e con più componenti.

I componenti fondamentali di ogni impianto fotovoltaico sono:

- il Generatore o Campo Fotovoltaico, costituito dall'insieme di moduli fotovoltaici;

- il Sezionatore, che rappresenta una misura di sicurezza che permette di scollegare il campo fotovoltaico in caso di interventi sulla rete o sull'impianto;
- l'Inverter, che trasforma la corrente continua prodotta dai moduli fotovoltaici in corrente alternata;
- il Contatore di produzione unidirezionale, che misura l'energia prodotta dal campo fotovoltaico;
- il Contatore bidirezionale, che misura due flussi di elettricità ovvero tutta quella immessa in rete e tutta quella prelevata dalla rete.

Analogamente a quanto fatto per la parte termica, si è proceduto a dimensionare anche tutti i componenti del sottosistema elettrico. Di seguito è riportato lo schema elettrico unifilare risultante dall'elaborazione:

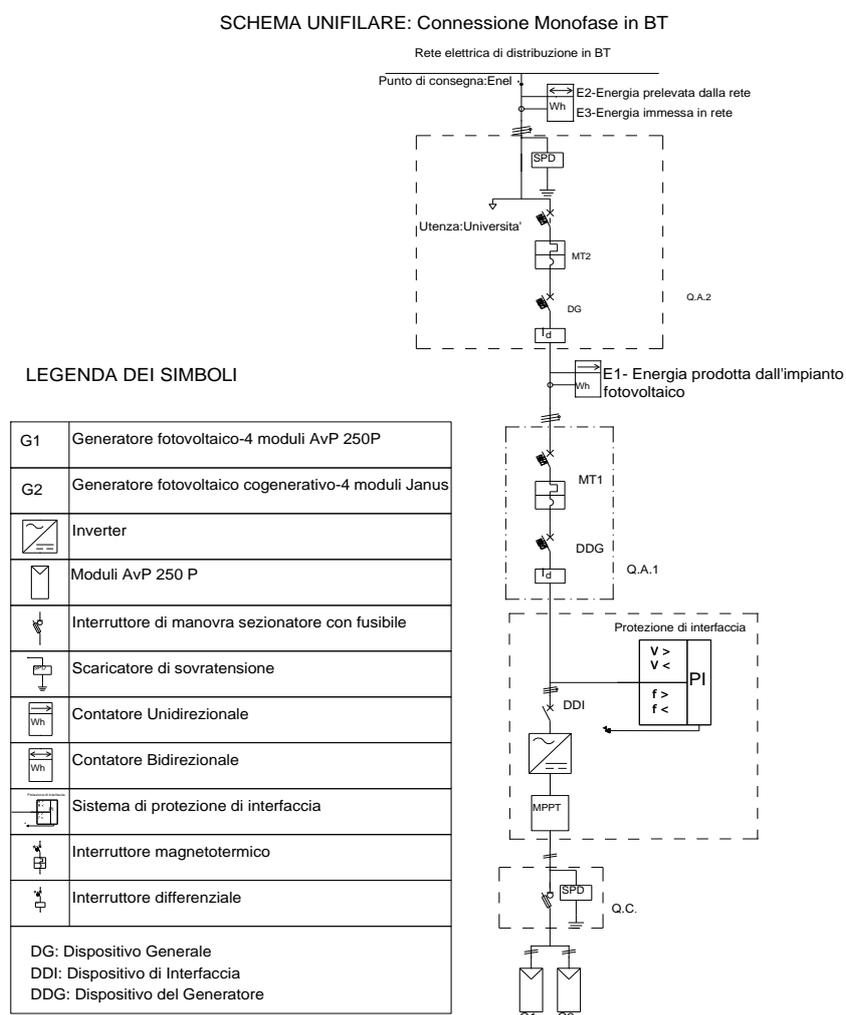


Figura 3-Schema elettrico

In particolare il sistema di trasformazione della corrente continua in corrente alternata è composto da ottimizzatori posti su ciascun modulo collegati all'inverter, i quali presentano le seguenti caratteristiche in ingresso (Tab.3):

POTENZA NOMINALE IN INGRESSO	250 W
TENSIONE IN INGRESSO MASSIMA ASSOLUTA (Voc)	55 Vcc
CORRENTE CONTINUA MASSIMA DI INGRESSO (Isc)	10 Acc
INTERVALLO OPERATIVO DELL'MPPT	5-55 Vcc
MASSIMA EFFICIENZA	99,5%
EFFICIENZA PONDERATA	98,8%

Tab.3 Ottimizzatore di potenza

Per poter avere risposte in tempo reale sulle performance di un impianto alimentato da energia solare, è possibile avvalersi di un particolare software, TRNSYS (Transient System Simulation Program), disponibile in commercio dal 1975. E' un software di simulazione completo ed estensibile pensato per l'analisi e la simulazione delle prestazioni transitorie di sistemi energetici, il cui comportamento sia variabile nel tempo. L'impianto simulato con il software TRNSYS ha caratteristiche affini al set-up sperimentale progettato, per il quale è prevista una futura realizzazione e successive prove sperimentali. Riguardo al modello sviluppato con TRNSYS sono state applicate le condizioni meteorologiche di Napoli, le quali possono essere prese come riferimento per una parte cospicua del Sud Italia. Lo schema di progetto dell'impianto in TRNSYS è riportato nella figura 4:

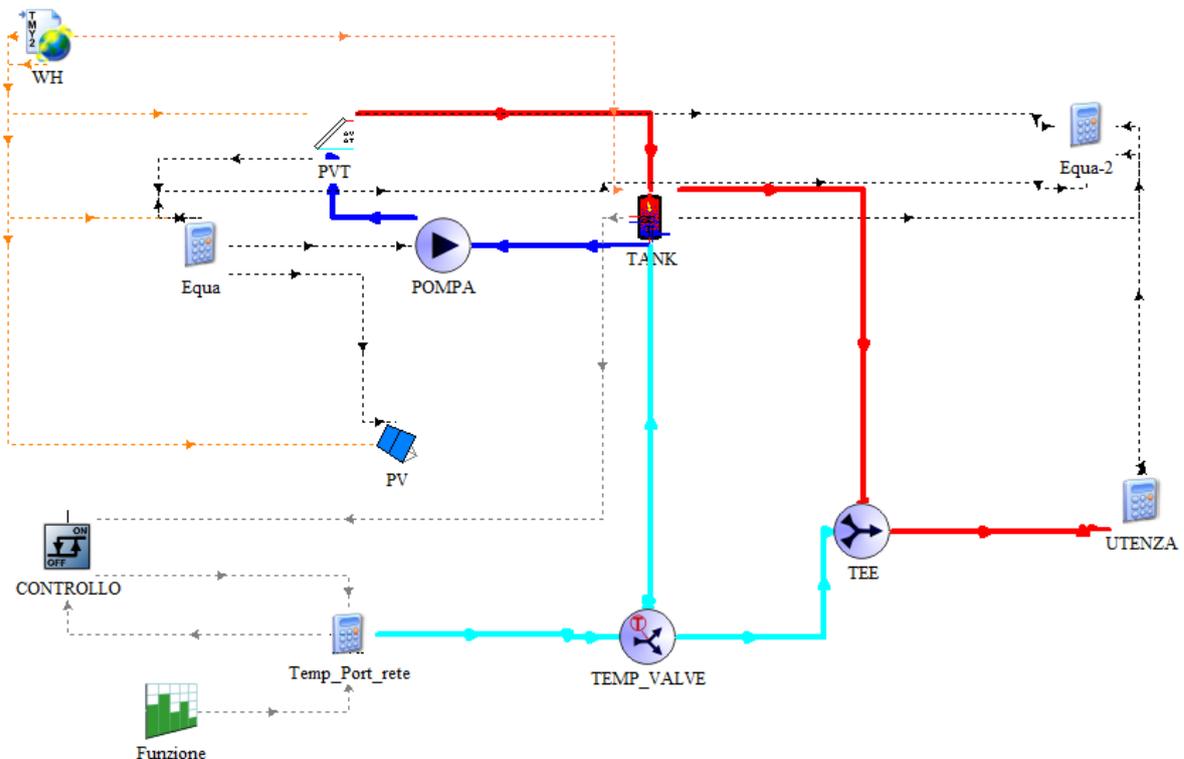


Figura 4-Modello dell'impianto sperimentale simulato con il software TRNSYS

Per completare il modello dell'impianto simulato in TRNSYS sono state effettuate delle simulazioni, i cui risultati sono stati analizzati su base annuale, settimanale e giornaliera, per valutare l'impianto dal punto di vista funzionale ed economico. Di seguito è riportata la figura 5 relativa alla produzione di energia elettrica

e termica dei PV e dei PVT nelle settimane dell'anno e la tabella 4 che riassume i risultati annuali delle simulazioni, in cui sono mostrati i parametri sia termici che economici:

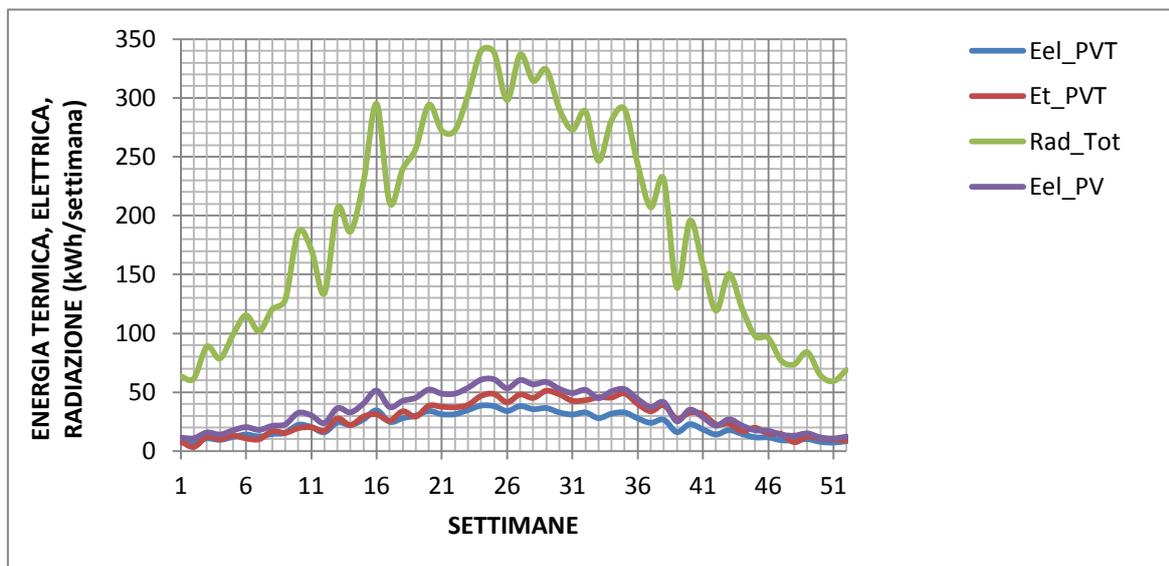


Figura 5-Andamento nel tempo della radiazione totale (Rad_Tot), dell'energia elettrica e termica prodotta dai collettori fotovoltaici cogenerativi (Eel_PVT e Et_PVT) e dell'energia elettrica prodotta dai collettori fotovoltaici (Eel_PV), espresse in kWh/settimana

Eel_PVT	ENERGIA ELETTRICA PVT	1,2 MWh/anno
Et_PVT	ENERGIA TERMICA PVT	1,4 MWh/anno
Eel_PV	ENERGIA ELETTRICA PV	1,8 MWh/anno
Et_TK	ENERGIA TERMICA SERBATOIO	1,4 MWh/anno
Et_HE	ENERGIA TERMICA ALLO SCAMBIATORE DI CALORE	1,4 MWh/anno
Consumo_pompa	CONSUMO POMPA	1,2 MWh/anno
Rad_Tot	RADIAZIONE TOTALE	9,9 MWh/anno
η_{el_PVT}	RENDIMENTO ELETTRICO PVT	11,6%
η_{t_PVT}	RENDIMENTO TERMICO PVT	14,4%
η_{el_PV}	RENDIMENTO ELETTRICO PV	17,9%
I_o	INVESTIMENTO INIZIALE	7855€
Δ_{costo}	DELTA COSTO	404,75 €/anno
Detr_fiscale	DETRAZIONE FISCALE	50%
SPB_detr	SPB con detrazione	9,7 anni
VAN_detr	VAN con detrazione	1131,9 €
IP_detr	IP con detrazione	30%

Tab.4-Valori annuali dei parametri energetici ed economici

Il software TRNSYS ha, dunque, consentito di effettuare la simulazione dinamica di un impianto composto da collettori fotovoltaici cogenerativi e da collettori fotovoltaici, le cui caratteristiche sono analoghe ai collettori previsti nel set-up sperimentale progettato, realizzati dall'AVProject. Confrontando le due tecnologie fotovoltaiche, ovviamente dal punto di vista elettrico, i collettori fotovoltaici tradizionali sono in grado di fornire valori di energia elettrica maggiori rispetto a quelli cogenerativi, ossia 1,8 MWh/anno contro 1,1 MWh/anno. Questo fatto si rispecchia anche nei rendimenti elettrici annuali, che sono rispettivamente pari a 17,9% e a 11,6%, a parità di radiazione captata in quanto l'area delle due tecnologie è la stessa. Però, il grande vantaggio dei collettori fotovoltaici cogenerativi è la loro capacità di sfruttare la radiazione solare anche per produrre energia termica, che arriva ad valore di 1,4 MWh/anno e ad un rendimento termico annuale del 14,4%. Per cui, globalmente, i collettori fotovoltaici cogenerativi hanno un resa energetica maggiore rispetto a quelli fotovoltaici, con il pregio di riscaldare anche l'acqua di rete, utilizzandola a scopi sanitari.

L'analisi giornaliera ha mostrato che, durante il funzionamento invernale (fig.6), le temperature dei PVT, superano di poco i 25 °C; in particolare l'energia termica prodotta dal serbatoio non è sufficiente a riscaldare l'acqua sanitaria oltre i 27°C, fungendo quindi da preriscaldamento dell'acqua ulteriormente riscaldata dalla resistenza elettrica con termostato prevista nel set-up sperimentale che verrà in futuro installato. Durante il funzionamento estivo, invece (fig.7), i valori sono più elevati sia per le potenze sia, soprattutto, per le temperature, che, nel caso dei PVT, superano i 40 °C.

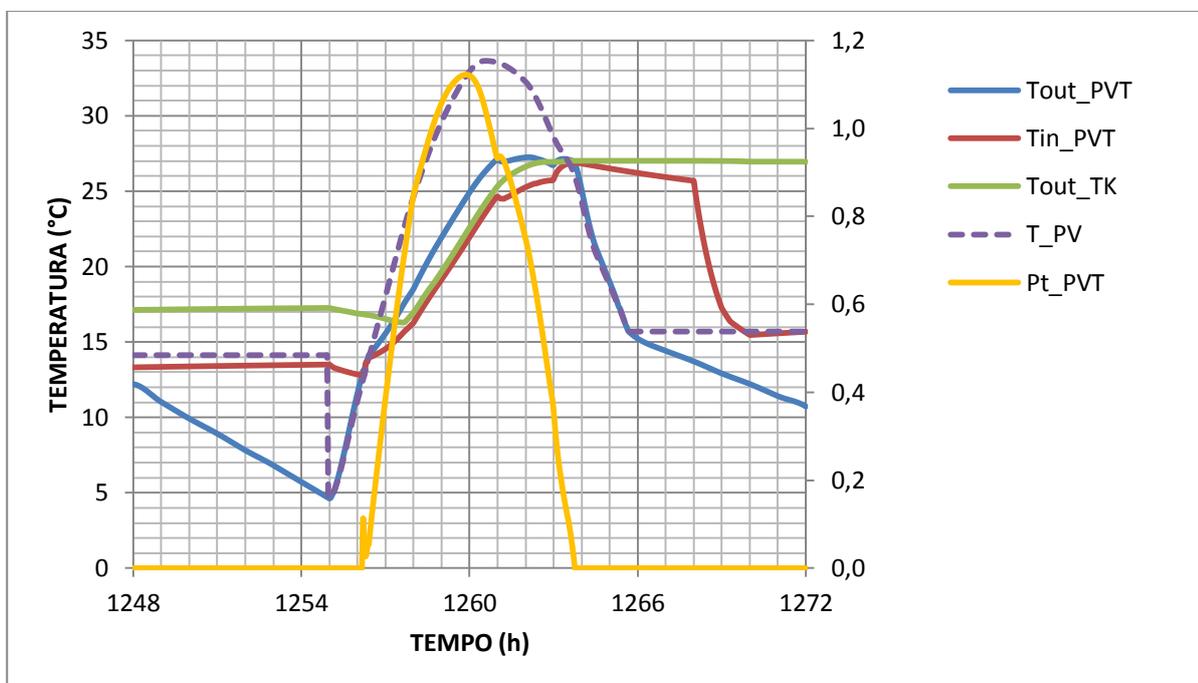


Figura 6- Andamento nell'arco della giornata invernale delle temperature in ingresso e in uscita dai collettori fotovoltaici cogenerativi (Tin_PVT e Tout_PVT), del collettore fotovoltaico (T_PV), in uscita dal serbatoio di accumulo (Tout_TK) e della potenza termica dei collettori fotovoltaici cogenerativi(Pt_PVT)

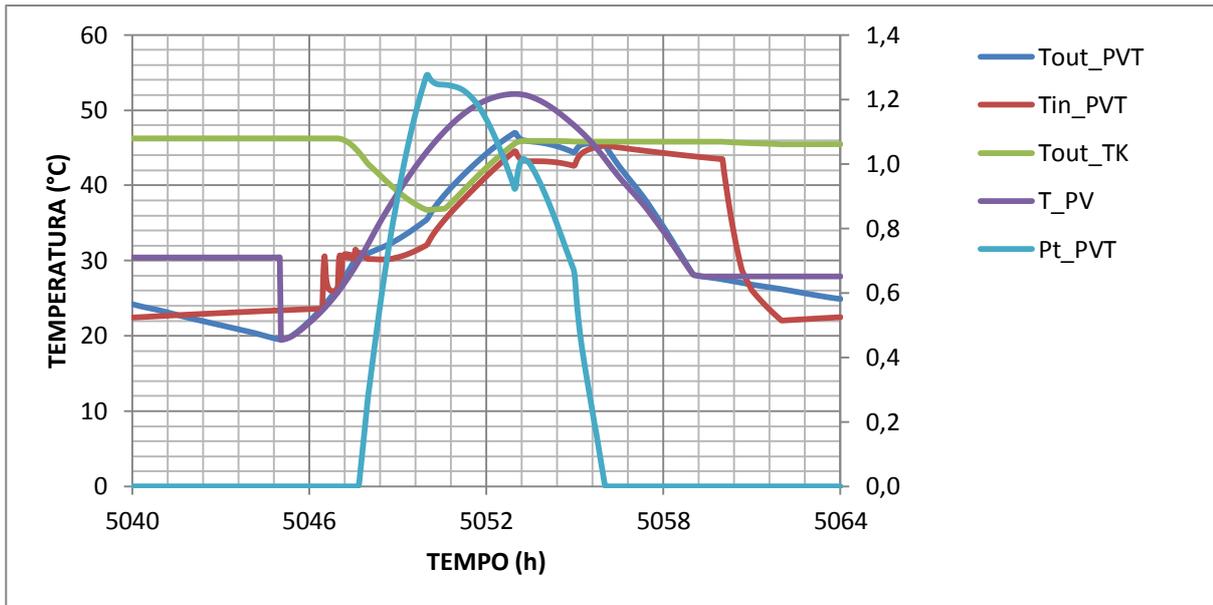


Figura 7-Andamento nell'arco della giornata estiva delle temperature in ingresso e in uscita dai collettori fotovoltaici cogenerativi (Tin_PVT e Tout_PVT), del collettore fotovoltaico (T_PV), in uscita dal serbatoio di accumulo (Tout_TK) e della potenza termica dei collettori fotovoltaici cogenerativi(Pt_PVT)

Dal punto di vista economico il sistema è conveniente se ci sono delle incentivazioni. Nonostante per l'anno in corso non sia più possibile beneficiare degli incentivi del Conto Energia, attualmente è ancora conveniente investire nel fotovoltaico, anche se a certe condizioni.

Per quanto concerne il fotovoltaico cogenerativo, i risultati mostrano che questa tecnologia ha buone potenzialità. Innanzitutto il collettore fotovoltaico cogenerativo mantiene bassa la temperatura della parte fotovoltaica, contrastando la perdita di efficienza estiva dovuta all'innalzamento della temperatura del collettore. Inoltre, il collettore recupera buona parte dell'energia termica che viene normalmente dissipata, generando diversi vantaggi secondari, tra cui un'usura più lenta grazie alle temperature di lavoro più basse. In secondo luogo, anche se l'efficienza elettrica del collettore fotovoltaico cogenerativo è minore dell'efficienza elettrica di un collettore fotovoltaico tradizionale, questa tecnologia può risultare comunque conveniente, in quanto ha il vantaggio di incorporare due finalità diverse in un unico elemento, con una notevole riduzione di ingombro, rendendo così l'impianto più flessibile e adattabile in qualsiasi situazione, ed un costo relativamente basso rispetto all'installazione di un modulo fotovoltaico ed un collettore termico separati.