

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

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

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

ELABORATO DI LAUREA

**ANALISI DINAMICA DI COLLETTORI FOTOVOLTAICI
COGENERATIVI ACCOPPIATI A CICLI ORC**

RELATORE:

CH.MO PROF. ING. FRANCESCO CALISE

CANDIDATO:

MARGHERITA SEPE

MATR. M 67/115

CORRELATORE:

ING. MARIA VICIDOMINI

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

È ampiamente riconosciuto che l'energia solare è una delle più importanti fonti energetiche rinnovabili e che la sua disponibilità è significativamente superiore alla domanda mondiale di energia globale. Purtroppo, per molti anni questa fonte di energia rinnovabile è stata sottoutilizzata per diverse ragioni. In primo luogo, il costo di capitale per gli impianti solari era significativamente superiore a quello dei sistemi tradizionali a combustibili fossili, a basso costo ed ampiamente disponibili. Inoltre, i sistemi solari sono stati penalizzati da una bassissima densità di potenza, soprattutto se paragonati ai sistemi tradizionali. Tuttavia, durante gli ultimi anni, come conseguenza delle politiche emergenti di diversi governi che promuovono le fonti di energia eco-compatibili diverse dai combustibili fossili, un nuovo impulso sta spingendo la ricerca verso l'energia solare.

L'energia solare può essere utilizzata per produrre energia elettrica e/o termica, rispettivamente dai collettori fotovoltaici (PV) e dai collettori solari termici (SC). Pertanto, la produzione di entrambe le energie, termica ed elettrica, richiederebbe l'installazione di due sistemi solari separati. Questa circostanza è spesso impraticabile a causa dell'elevata superficie necessaria.

Per aumentare la densità di potenza complessiva di entrambe le tecnologie si è pensato ad una combinazione di PV e di SC. Ciò si verifica nei collettori fotovoltaici/termici (PVT), rappresentati da un collettore termico convenzionale ricoperto da uno strato PV, che fornisce contemporaneamente elettricità e calore. L'energia termica viene fornita ad un fluido (aria, acqua o olio diatermico). Il risultato di questo processo comporta un possibile miglioramento dell'efficienza PV (rendimento elettrico). Per la maggior parte dei materiali fotovoltaici, il rendimento elettrico diminuisce linearmente all'aumentare della temperatura; pertanto, quando la temperatura media del fluido è relativamente bassa (di solito $< 40^{\circ}\text{C}$), la temperatura di funzionamento dello strato fotovoltaico può essere inferiore a quella raggiunta da un collettore PV convenzionale. In questo caso il rendimento elettrico del PVT sarebbe superiore al quello del PV.

A parità di potenza di picco, il costo del capitale di sistemi PVT può essere ridotto significativamente aumentando il flusso di radiazione incidente sulla ricevente PV. In questo caso ci sarebbe una cospicua riduzione dell'area totale di PV per kWp raggiunto. Questa riduzione si traduce anche in una riduzione proporzionale dei costi di capitale del sistema. È noto che un aumento del flusso di radiazione può essere ottenuto mediante sistemi a concentrazione. I collettori a concentrazione PVT (CPVT) consistono in collettori PVT posizionati nel fuoco di alcuni riflettori (Fresnel, parabolici, a disco, ecc...), in grado di convertire solo la frazione diretta della radiazione totale.

L'aumento del flusso di radiazione ottenuto nel caso di sistemi CPVT permette anche di innalzare le temperature medie del fluido. Per i sistemi CPVT che lavorano ad alta temperatura il materiale fotovoltaico più adatto è il PV a tripla giunzione, che, grazie ad una sovrapposizione di più strati, riesce a coprire un range delle frequenze dello spettro solare più grande rispetto ai tradizionali materiali; i materiali a tripla giunzione hanno un'efficienza nominale del 40% (a 25°C), ma può scendere al 20% (a 240°C). La prospettiva di utilizzare PVT ad alta temperatura è molto interessante poiché estende il numero di possibili

applicazioni. Un esempio consiste nell'uso del calore ad alta temperatura fornita dal PVT per guidare un motore termico o un Ciclo Rankine Organico (ORC) o un sistema di raffreddamento e riscaldamento solare contemporaneamente (Solar Heating and Cooling).

In questo lavoro di tesi si è analizzato il comportamento di collettori fotovoltaici a concentrazione accoppiati con due possibili sistemi, messi a confronto, con la finalità di individuarne il migliore, inteso come quello con la capacità di aumentare la produzione di energia elettrica.

Le argomentazioni esposte giustificano la scelta di analizzare un primo sistema, CPVT a tripla giunzione accoppiato ad uno scambiatore di calore, che permette al CPVT di lavorare ad una più bassa temperatura con un'efficienza elettrica maggiore, ed un secondo sistema, CPVT a tripla giunzione accoppiato ad un ciclo Rankine Organico (ORC) produttore quindi ulteriore energia elettrica, oltre a quella prodotta dal CPVT, e quindi in grado di aumentare il rendimento elettrico totale del sistema. Interesse di studio è stato valutare quali dei due sistemi fosse il migliore da un punto di vista dell'efficienza energetica globale e dal punto di vista economico.

Per poter avere risposte in tempo reale sulle performance dell'impianto si è utilizzato il software TRNSYS, un programma di simulazione dinamica pensato per l'analisi delle prestazioni di sistemi energetici. L'impianto così modellato è costituito da una serie di componenti i cui modelli matematici di base derivano sia dalla libreria standard del software TRNSYS sia da modelli elaborati esternamente e poi implementati.

I componenti vengono collegati tra loro in modo opportuno, al fine di poter simulare le prestazioni e il funzionamento dell'impianto, definendo tutti i parametri di input/costanti. Mediante i modelli alla base di ogni componente è possibile ottenere e visualizzare in modo dinamico i parametri di output oggetto di interesse.

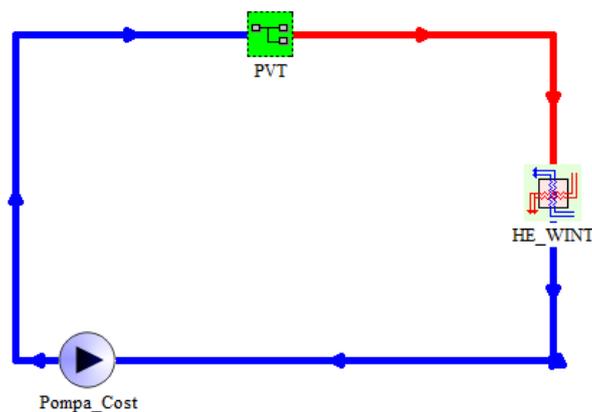


Figura 1. 1 Caso di studio 1: Sistema PVT con lo scambiatore di calore

Il sistema (Figura 1. 1) è costituito da:

- pannelli solari termici/fotovoltaici a concentrazione, PVT;
- dati climatici, WH;
- scambiatore di calore olio diatermico/acqua, HE_WINT;
- pompa di circolazione a velocità costante, Pompa_Cost;
- controllore di segnale a retroazione, SLC_2;
- calcolatrici, es. Equa.

La macro PVT, note la T_{amb} e la radiazione media della città di Napoli dal *type* dei dati climatici (WH), simula il funzionamento dei collettori PVT. L'olio diatermico, scelto come fluido di lavoro, immesso nel circuito viene riscaldato previa radiazione solare concentrata sulla superficie di captazione; dai PVT si trae l'energia elettrica, (E_e). La temperatura (T_{outPVT}) e la portata massica (\dot{m}_{outPVT}) all'uscita dal PVT costituiscono la temperatura (T_{inScam}) e la portata massica (\dot{m}_{inScam}) di olio in ingresso allo scambiatore. L'olio diatermico è inviato allo scambiatore solo quando la T_{outPVT} è maggiore della temperatura in uscita alla pompa di circolazione a portata costante ($T_{outpump}$) e solo se si verifica contemporaneamente che la radiazione sia maggiore di 10 W/m^2 .

L'olio diatermico, fluido caldo allo scambiatore, si interfaccia con il fluido freddo (acqua), ipotizzato alla $T = 25^\circ\text{C}$; la portata massica di acqua è regolata da un controllore (SLC) che la modula in maniera tale da avere una $T_{setpoint}$, ovvero una temperatura dell'olio diatermico in uscita, tale da essere pari a 35°C . Il processo di raffreddamento dell'olio che si verifica nello scambiatore ha lo scopo ultimo di innalzare il rendimento elettrico (η_{el}) al PVT.

L'olio raffreddato passa poi per la pompa a portata costante, che lo conduce poi, in maniera ciclica, ai PVT che provvederanno a riscaldarlo. Il ciclo si reitera fintanto vi sia radiazione sufficiente.

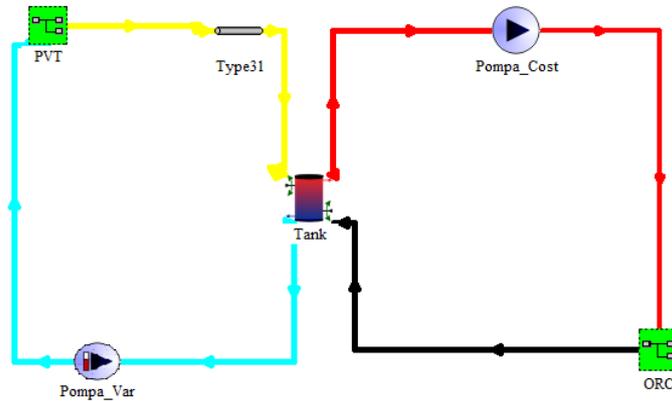


Figura 1. 2 Caso di studio 2: Sistema PVT con ORC

I componenti fondamentali del sistema con ORC (Figura 1. 2) sono:

- pannelli solari termici/fotovoltaici a concentrazione, PVT;
- tubo di collegamento con il serbatoio, type 31;
- dati climatici, WH;
- un serbatoio di accumulo stratificato, Tank;
- una pompa di circolazione a portata costante, Pompa_Cost;
- ciclo Rankine con fluido organico, ORC;
- una pompa di circolazione a portata variabile, Pompa_Var;
- controllori di segnale, SLC;
- controllore differenziale ON/OFF, OffOn;
- calcolatrici, es. Equa.

La macro PVT, note la T_{amb} e la radiazione media della città di Napoli dal *type* dei dati climatici (WH), simula il funzionamento dei collettori PVT. L'olio diatermico, scelto come fluido di lavoro, immesso nel circuito viene riscaldato previa radiazione solare concentrata sulla superficie di captazione; dal PVT si trae l'energia elettrica, (E_e). La temperatura (T_{outPVT}) e la portata massica (\dot{m}_{outPVT}) all'uscita dal PVT costituiscono la temperatura (T_{inTank}) e la portata massica (\dot{m}_{inTank}) di olio in ingresso al tank. L'olio diatermico è inviato al tank solo quando la T_{outPVT} è maggiore della temperatura di set (T_{set}), posta pari a 130°C, in uscita dalla pompa di circolazione a portata costante ($T_{outpump}$) e solo se si verifica contemporaneamente che la radiazione è maggiore di 10 W/m².

L'olio diatermico in entrata al tank si miscela con l'olio già presente, raggiungendo una temperatura minore di quella all'ingresso; il fluido a temperatura più alta si porrà nella parte alta del serbatoio, è da qui che la pompa di circolazione a portata costante lo preleva e lo conduce alla macro ORC.

La macro ORC simula il funzionamento del ciclo Rankine con fluido organico in tutte le sue componenti (turbina, condensatore, pompa e generatore di vapore) e ne simula la produzione di E_e , restituendo l'olio al serbatoio, chiaramente più freddo. La produzione di energia elettrica produrrà un innalzamento del rendimento elettrico complessivo del sistema PVT+ORC.

Da qui, a mezzo di una pompa a portata variabile, che preleva nella parte bassa del tank, l'olio viene rinviato ai PVT che provvederanno a riscaldarlo. Il ciclo si reitera fintanto vi sia radiazione sufficiente.

Il modello della CPVT è stato sviluppato in SEO (*Engineering Equation Solver*) e si basa sul lavoro svolto da Mittelman et al. e sul prototipo recentemente commercializzato da *ZenithSolar*; può essere facilmente interfacciabile con TRNSYS, in quanto permette una semplice formulazione delle equazioni e la loro soluzione veloce e sicura. Il CPVT (Figura 1. 3) consiste in un concentratore parabolico a disco, dotato di un sistema di inseguimento a due assi. Un ricevitore planare è posto nel fuoco della parabola. Questo ricevitore è costituito da: uno strato a tripla giunzione PV, un substrato metallico comprensivo dei canali del fluido, uno strato di isolamento termico.

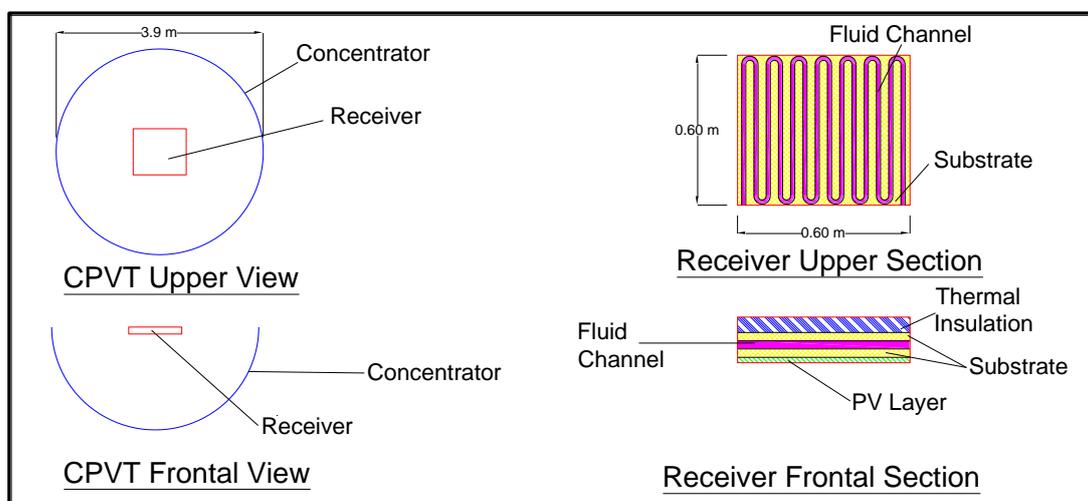


Figura 1. 3 Layout CPVT

Il ciclo ORC è stato simulato attraverso l'ausilio del software di calcolo *Engineering Equation Solver* (EES), un software prodotto dalla società *F-chart* dedicato alla risoluzione di sistemi di equazioni algebriche, ma anche in grado di risolvere equazioni differenziali, equazioni a variabile complessa, sviluppare sistemi di ottimizzazione, diagrammi ed animazioni. E' stato così possibile ottenere la mappa di funzionamento del ciclo ORC da inserire all'interno del modello di simulazione.

A seguito del completamento del modello dell'impianto in TRNSYS sono state effettuate delle simulazioni e analisi parametriche su scala annuale, settimanale e giornaliera per valutare l'impianto dal punto di vista funzionale ed economico e per definirne le caratteristiche ottimali per quel che riguarda alcuni parametri.

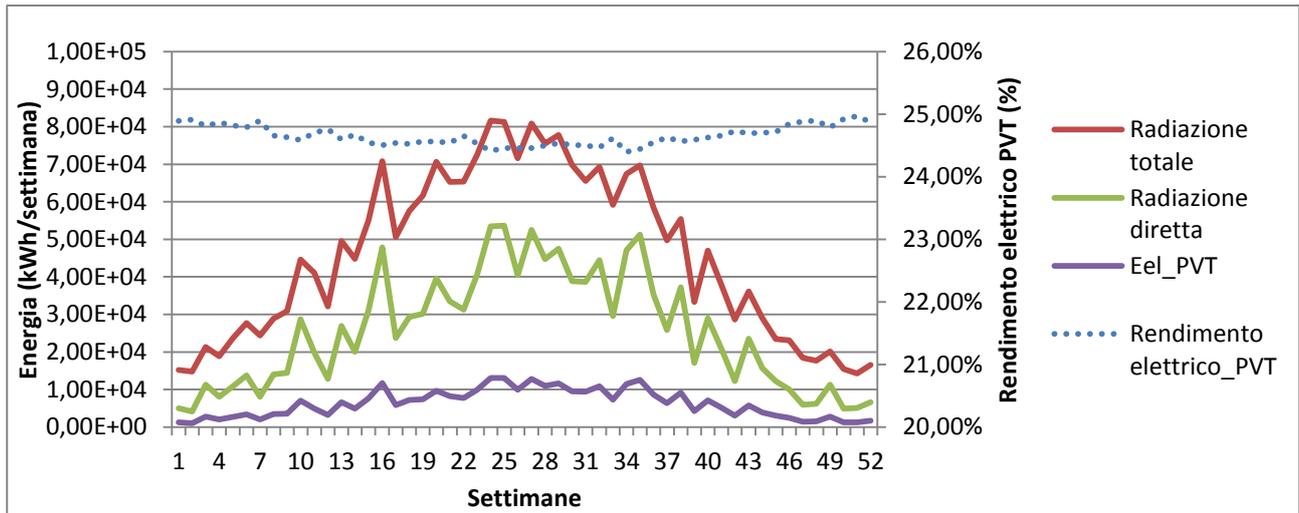


Figura 1. 4 Risultati dell’analisi annuale del I caso di studio, *Caso di studio I: Sistema PVT con lo scambiatore di calore.*

Parametro	Valore
Costo totale	952000 €
Δ Costo	112000 €
Incentivo	0.35 €/kWhel
SPB_INC	8.49 anni
VAN_INC	449000 €
IP_INC	41,17 %
η _ElettricoCollettori_medio	24.57%

Tabella 1. 1 Risultati dell’analisi sviluppata sulla configurazione di base nel caso I

Si noti dal confronto dei due grafici

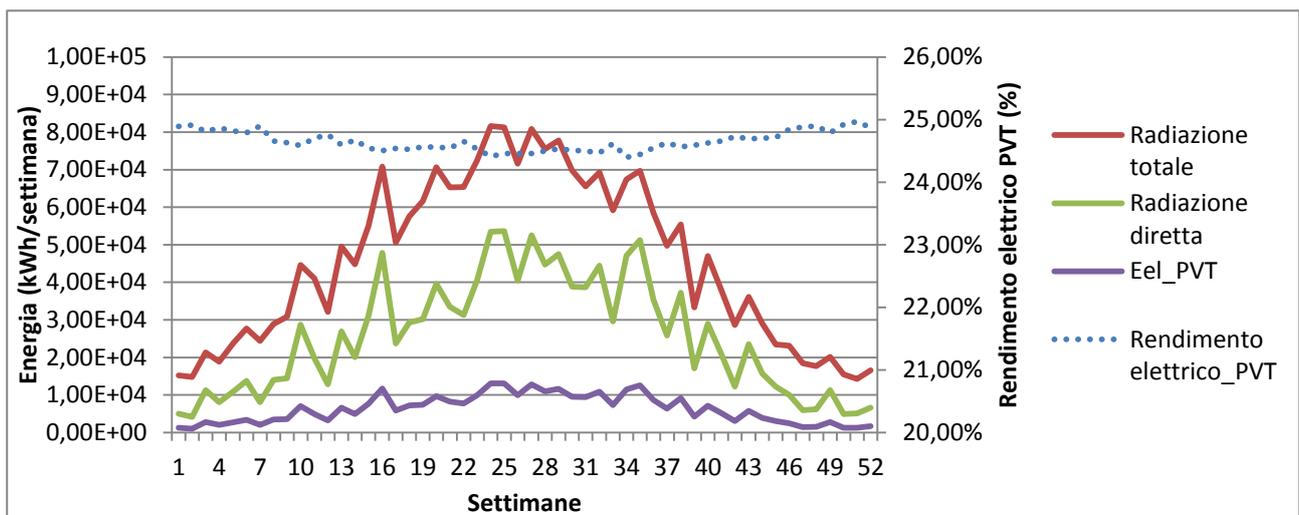


Figura 1. 4 e Figura 1. 5 il rendimento annuale dei CPVT sia nel primo caso di studio maggiore rispetto al secondo, e la produzione di energia elettrica sia dello stesso ordine di grandezza, sebbene si deve però tenere

conto di un'aliquota di energia elettrica che deve essere sommata a quella prodotta nel secondo sistema dai CPVT, ovvero l'energia elettrica prodotta dall'ORC (Figura 1. 6) .

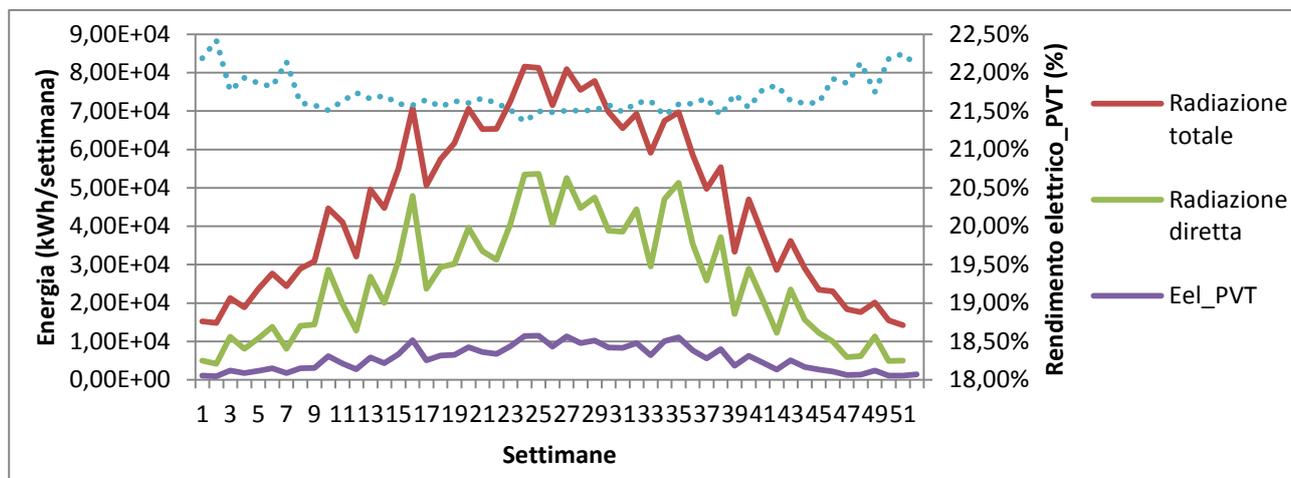


Figura 1. 5 Risultati dell'analisi annuale del I caso di studio lato CPVT, *Caso di studio 2: Sistema PVT con ORC*

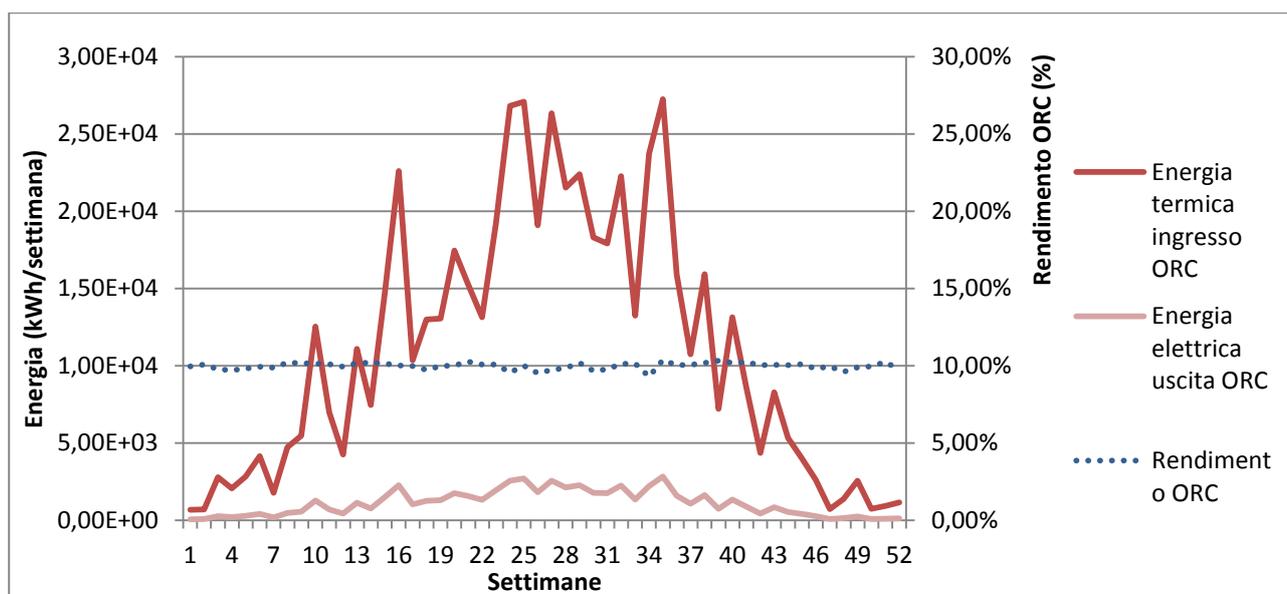


Figura 1. 6 Risultati dell'analisi annuale del I caso di studio lato ORC, *Caso di studio 2: Sistema PVT con ORC*

Parametro	Valore
Costo totale	1122648 €
Δ Costo	120150 €
Incentivo	0.35 €/kWhel
SPB_INC	9.34 anni
VAN_INC	379223 €
IP_INC	33,78 %
$\eta_{el_ORC_medio}$	10.21 %

$\eta_{\text{term_Collettori_medio}}$	43,48 %
$\eta_{\text{el_Collettori_medio}}$	21,42 %

Tabella 1. 2 Risultati dell'analisi sviluppata sulla configurazione di base nel caso II

E' stato effettuato un confronto del sistema studiato per la città di Napoli Figura 1. 7, con un sistema per la città di Abu Dhabi. Si noti come l'ORC presenti un funzionamento altalenante nei periodi invernali napoletani, ciò è dovuto alla più bassa intensità di radiazione diretta, mentre in estate contribuisce in maniera più significativa alla produzione di energia elettrica, così come è evidenziato dalla differenza tra l'energia elettrica del sistema senza ORC (NOORC) e la somma di energia elettrica totale prodotta dal sistema con l'ORC (ORC); il confronto di tale sistema applicato alla città di Abu Dhabi (Figura 1. 8) conferma che per una città più calda il contributo dell' ORC si registra tutto l'anno, si nota quindi un gap tra le due energie più grande ed anche il rendimento elettrico, calcolato con l'energia complessivamente ricavata dal sistema con l'ORC (η_{ORC}) è sempre più alto del rendimento del sistema senza ORC (η_{NOORC}).

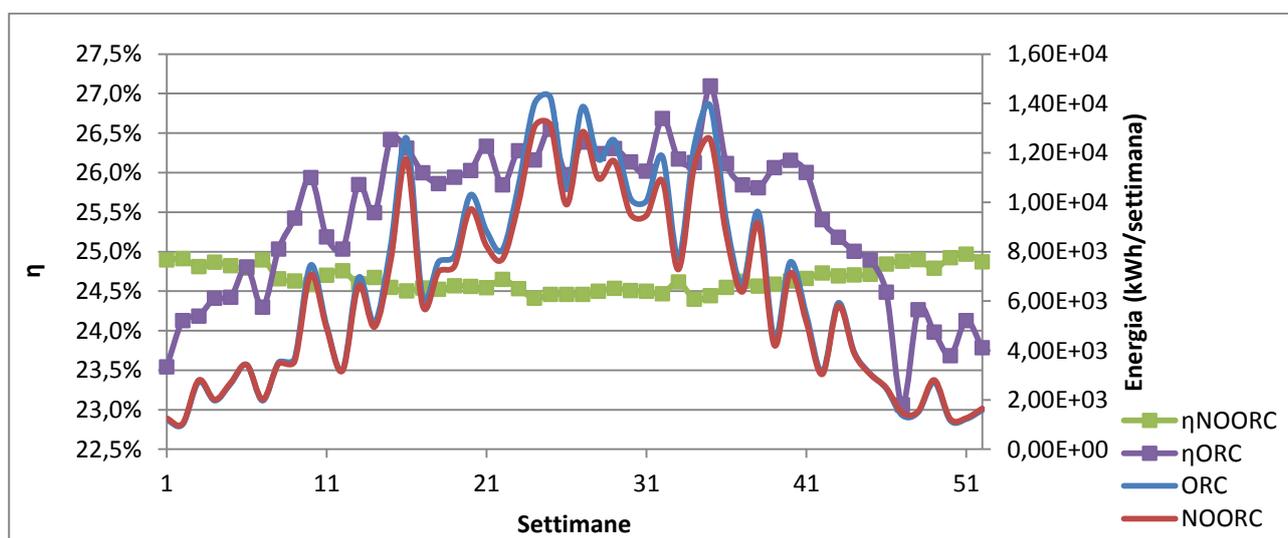


Figura 1. 7 Risultati per la città di Napoli di energia elettrica e del rendimento elettrico nelle due configurazioni a confronto

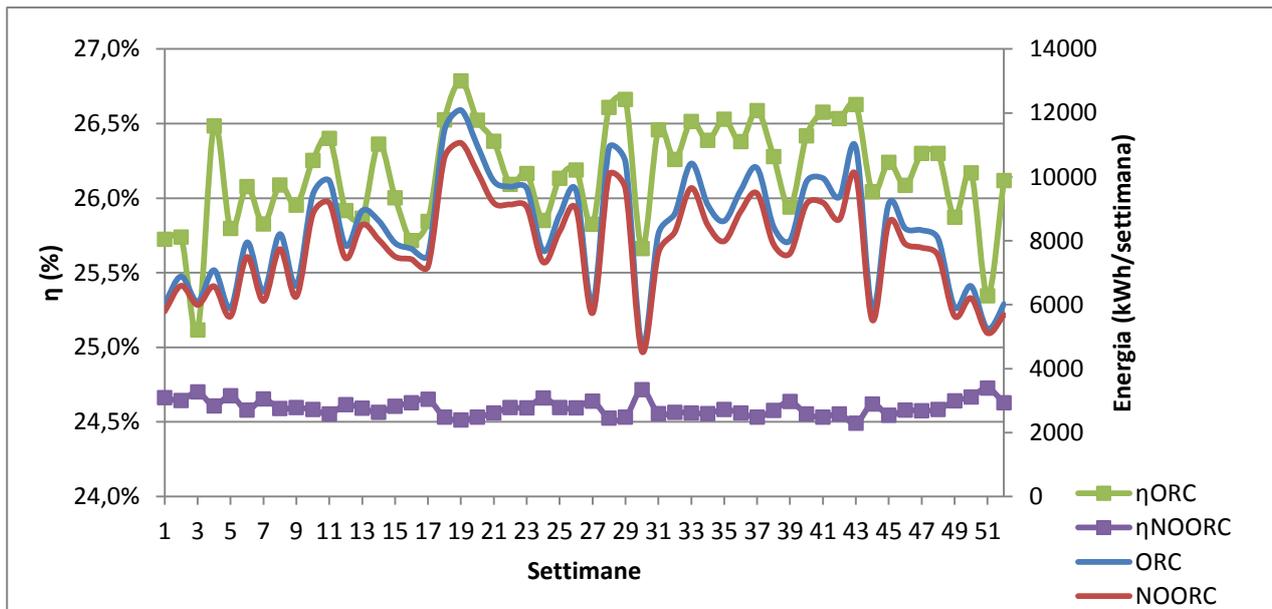


Figura 1. 8 Risultati per la città di Abu Dhabi di energia elettrica e del rendimento elettrico nelle due configurazioni a confronto

L'analisi economica fatta congiuntamente a quella parametrica ha però dimostrato che il sistema dei CPVT accoppiato allo scambiatore di calore è più conveniente dal punto di vista economico, così come risulta dai vari indici riportati nelle tabelle riassuntive (Tabella 1. 1e Tabella 1. 2). Mentre dal punto di vista puramente energetico risulta per il primo sistema una produzione annuale di energia elettrica di $3.27 \cdot 10^5$ kWh/anno, mentre per il secondo sistema una produzione annuale di energia elettrica cumulata di $3.45 \cdot 10^5$ kWh/anno; il gap di produzione di energia elettrica non giustifica una eventuale preferenza per il secondo sistema dal punto di vista economico.