

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II**



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE**

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

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

**SIMULAZIONE DINAMICA DI UN IMPIANTO DI TRIGENERAZIONE BASATO SULLE FONTI  
SOLARE E GEOTERMICA**

**RELATORI**

CH.MO PROF. ING. FRANCESCO CALISE

CH.MO PROF. ING. ADOLFO PALOMBO

**CORRELATORE**

ING. MARIA VICIDOMINI

**CANDIDATO**

DE CHIARA ELENA

MATRICOLA M 67/66

Anno Accademico 2013/2014

Il fabbisogno energetico mondiale va costantemente aumentando nel tempo, questo soprattutto nei paesi in via di sviluppo. Soddisfare tale fabbisogno energetico solo attraverso l'utilizzo dei tradizionali combustibili fossili (gas, petrolio, carbone, etc.) diviene sempre più rischioso e difficile, sia a causa del loro effetto fortemente inquinante, sia perché tali combustibili sono destinati ad esaurirsi. Da tali considerazioni risulta quindi la necessità di sviluppare tecnologie adatte alla produzione di energia attraverso fonti rinnovabili ed ecosostenibili. In tale ottica si sviluppa il presente lavoro di tesi, riguardante una delle linee del progetto di ricerca GEOGRID, che intende sviluppare metodi e tecnologie adatte a favorire lo sfruttamento dell'energia geotermica in Campania, fonte abbastanza disponibile nella nostra regione (Campi Flegrei, Ischia, Roccamonfina, Guardia dei Lombardi, ecc.), e non adeguatamente sfruttata, anche a causa della disinformazione sulla convenienza, sicurezza e affidabilità delle installazioni per la conversione dell'energia geotermica. Oggetto del lavoro di tesi è stato lo sviluppo di un modello dinamico per l'analisi delle prestazioni energetiche di un impianto prototipale ibrido basato sulle fonti geotermica a bassa entalpia e solare a servizio di un utenza alberghiera, il Regina Isabella a Lacco Ameno d'Ischia (Na).

Per quel che riguarda il comparto solare si è scelto di utilizzare dei pannelli solari evacuati piani (TVP Solar), che sono tecnologicamente innovativi e consentono alte temperature anche in assenza di sistemi di concentrazione, e risultano, inoltre, con bassi costi di gestione e di facile manutenzione.

Il lavoro di tesi si è sviluppato in tre direzioni principali:

- Analisi sperimentale di un pozzo geotermico da utilizzare per l'impianto prototipale.
- Sviluppo di un modello di simulazione di un ciclo Rankine Organico (ORC) alimentabile da fonte geotermica.
- Sviluppo di un modello di simulazione dinamica dell'impianto trigenerativo prototipale basato sulle fonti solare e geotermica.

L'acqua del pozzo che si intende sfruttare ha una temperatura di circa 96°C con un livello di falda a circa 20 m al di sotto del piano campagna in condizioni dinamiche. Il pozzo è sia dotato di una pompa sommersa per l'emungimento dell'acqua che di una serpentina per il solo sfruttamento dell'energia termica.

Per meglio caratterizzare la fonte geotermica, durante il lavoro di tesi, sono state effettuate, in collaborazione con l'INGV (Istituto nazionale di geologia e vulcanologia), alcune indagini sperimentali per la misura del livello di falda e delle temperature del pozzo in condizioni statiche, ovvero in assenza di emungimento e con serpentina disattivata. Per tali misurazioni è stato usato un freatometro con sonda di temperatura (Figura 1 e Figura 2).



Figura 1 - (a) pozzo ,(b) misurazione del livello del pelo libero, (c) temperature rilevate dal sensore

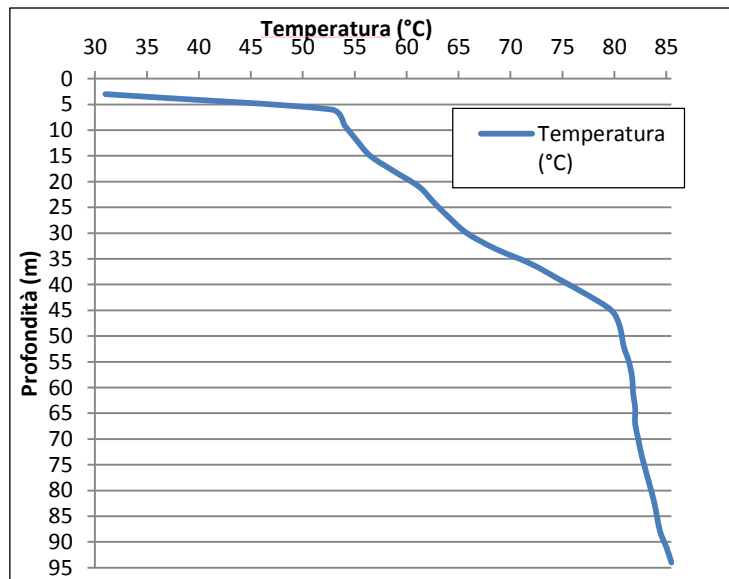


Figura 2 - Andamento temperature in condizioni statiche

Lo schema dell'impianto modellato con software TRNSYS è mostrato in Figura 3.

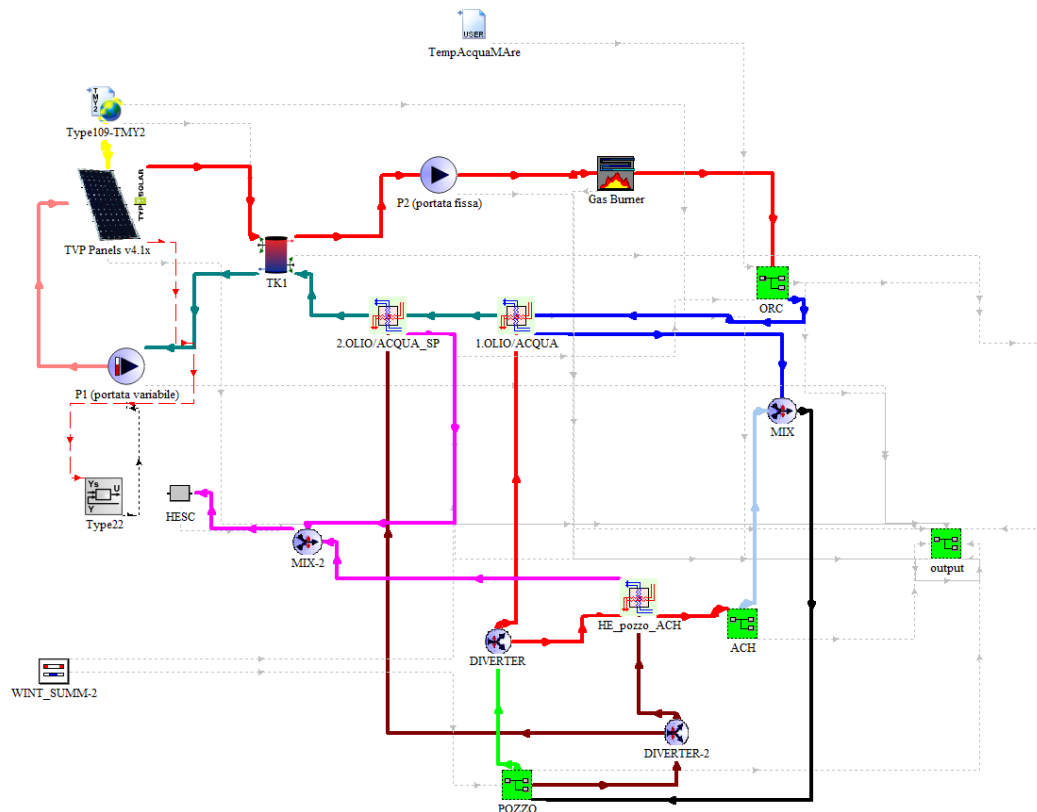


Figura 3 - Schema impiantistico

Dal pozzo geotermico (POZZO) si hanno due flussi, uno dato dalla serpentina e una dato dalla portata emunta. L'acqua della serpentina alimenta, in estate, l'assorbitore monostadio (ACH, che utilizza come fluidi di lavoro  $H_2O/LiBr$ ) da 30kW, e preriscalda l'olio solare in inverno tramite uno scambiatore (1.OLIO/ACQUA). L'acqua emunta è costantemente inviata ad uno scambiatore interfacciato con il ciclo solare (2.OLIO/ACQUA\_SP), ma nel caso l'olio in uscita dall'ORC si trovasse ad una temperatura maggiore rispetto a quella dell'acqua emunta dal pozzo, quest'ultima verrà inviata, grazie ad un diverter, ad uno

scambiatore per riscaldare un po' in più l'acqua convogliata all'assorbitore (HE\_pozzo\_ACH). In entrambi i casi l'acqua emunta in uscita dagli scambiatori viene sfruttata per la produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento piscine con il calore residuo, mentre l'acqua della serpentina appartiene ad un circuito chiuso, quindi in uscita dagli scambiatori ritornerà al pozzo per scaldarsi nuovamente.

La parte solare è formata da: collettori solari piani evacuati, un serbatoio di accumulo, i due scambiatori che si interfacciano con il fluido geotermico, una caldaia a gas ausiliaria (Gas Burner) per portare il fluido convogliato all'ORC alla temperatura di 90°C nel caso in cui fonte geotermica e solare non riescano a farlo, e due pompe, di cui una a portata variabile per portare l'olio al pannello (P1\_portata variabile) che varia la portata in modo da non far superare al fluido in uscita dai collettori il setpoint di 130°C, e l'altra a portata fissa per il funzionamento dell' ORC (P2\_portata fissa).

Al Type dei collettori (TVP Panels) è collegato il Type109-TMY2 che fornisce informazioni circa le caratteristiche di insolazione, temperatura ambientale e situazione dei venti su base oraria, per un anno di riferimento.

L'ORC funziona in un range di temperatura compreso tra i 90 e i 130°C, il fluido di lavoro scelto è l'R245fa, la temperatura minima è garantita dalla presenza del bruciatore ausiliario, mentre si effettua un controllo sulla temperatura in uscita dal serbatoio, e nel caso in cui questa sia superiore a quella massima di funzionamento dell'ORC, questo blocca il suo funzionamento fino a che la temperatura del serbatoio non torna a valori inferiori tale limite. La turbina dell'ORC ha una potenza nominale di 6kW, il suo rendimento varia sia in base alla temperatura in ingresso che alla temperatura al condensatore, raffreddato con acqua di mare.

Il TYPE 'TempAcquaMare' invia all'ORC la temperatura media dell'acqua di mare ora per ora.

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. Infatti, il software TRNSYS non include un apposito modello per la simulazione di cicli ORC. Per questo motivo, è stato necessario costruire integralmente un nuovo e dettagliato modello di simulazione di ciclo ORC, utilizzando il software EES. Il modello dell'ORC sviluppato in EES è stato quindi integrato in ambiente TRNSYS.

Il software TRNSYS è stato utilizzato per poter avere risposte in tempo reale sulle performance dell'impianto, tale software di simulazione dinamica è 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 sono definiti tutti i parametri di input/costanti, e mediante i modelli alla base di ogni componente, è possibile ottenere e visualizzare in modo dinamico i parametri di output oggetto di interesse.

Fissando inizialmente dei valori base mostrati in Tabella 1, si sono effettuate analisi parametriche al variare di un parametro alla volta per valutarne l'influenza sul funzionamento del sistema.

Parametro	Valore
Area collettori	25 m <sup>2</sup>
Volume specifico del serbatoio	5 l/m <sup>2</sup>
Portata emunta	4100 kg/hr
Portata olio diatermico	3960 kg/hr

Tabella 1- parametri base

A titolo di esempio si mostrano in Figura 4 i contributi di solare, geotermico e caldaia per l'alimentazione dell'ORC durante l'anno.

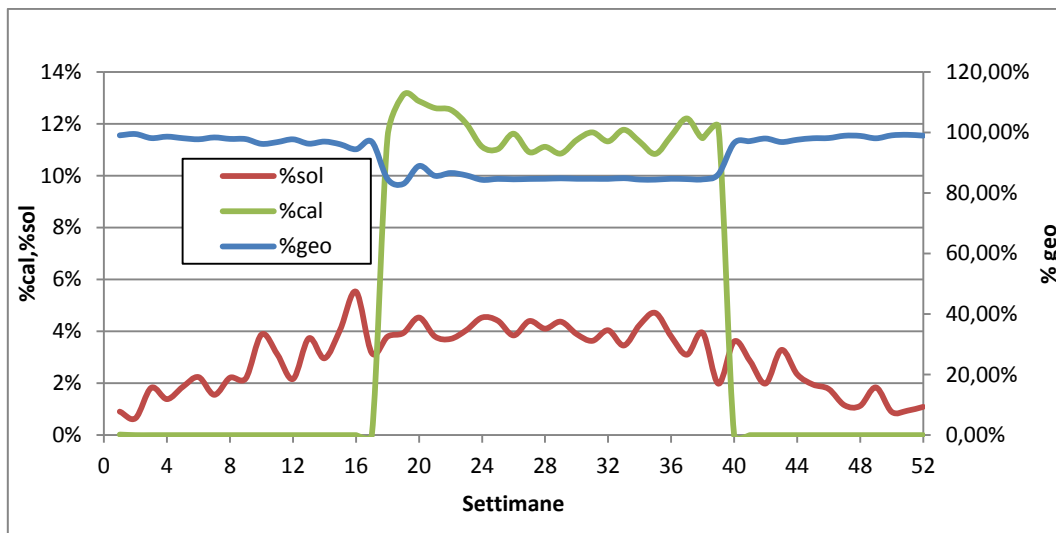


Figura 4 - Contributi di solare, geotermia e caldaia per l'alimentazione dell'ORC

Si nota che, soprattutto in inverno, il sistema è mantenuto principalmente grazie all'energia fornita dal pozzo geotermico. In estate, periodo in cui parte dell'energia fornita dal pozzo è usata per l'alimentazione dell'assorbitore, il contributo dato dal geotermico cala e tale differenza dovrà essere coperta dalla caldaia ausiliaria, che non risulta mai attiva nel periodo invernale.

Ciò è visibile anche dalle Figura 5 e Figura 6, che mostrano rispettivamente un giorno di funzionamento invernale ed estivo. Si può notare come, nel giorno di funzionamento invernale, la temperatura di uscita dal serbatoio ( $T_{Top\_Tank}$ ) sia coincidente con quella in uscita dalla caldaia ( $T_{Out\_AH}$ ), in quanto questa non viene attivata poiché la sola fonte geotermica riesce a garantire la temperatura minima di funzionamento dell'ORC anche in assenza di contributo solare.

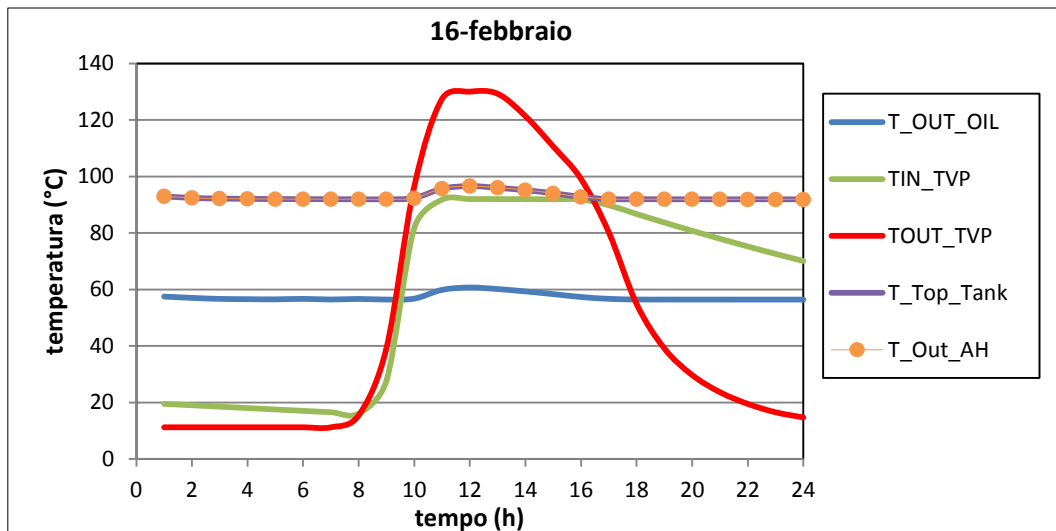


Figura 5 - giorno di funzionamento invernale

Nel giorno di funzionamento estivo, invece, la fonte geotermica non è in grado di garantire i 90°C di avvio all'ORC nelle ore in cui non vi è adeguato contributo solare, infatti su può notare dalla Figura 6 che le temperatura di uscita dal serbatoio e dalla caldaia sono differenti, diventando coincidenti solo nelle ore di massima radiazione, segno che la caldaia ausiliaria è attiva.

T\_OUT\_OIL, TIN\_TVP, TOUT\_TVP sono, rispettivamente, la temperatura di uscita dall'ORC dell'olio diatermico, e le temperature di ingresso e uscita dai collettori.

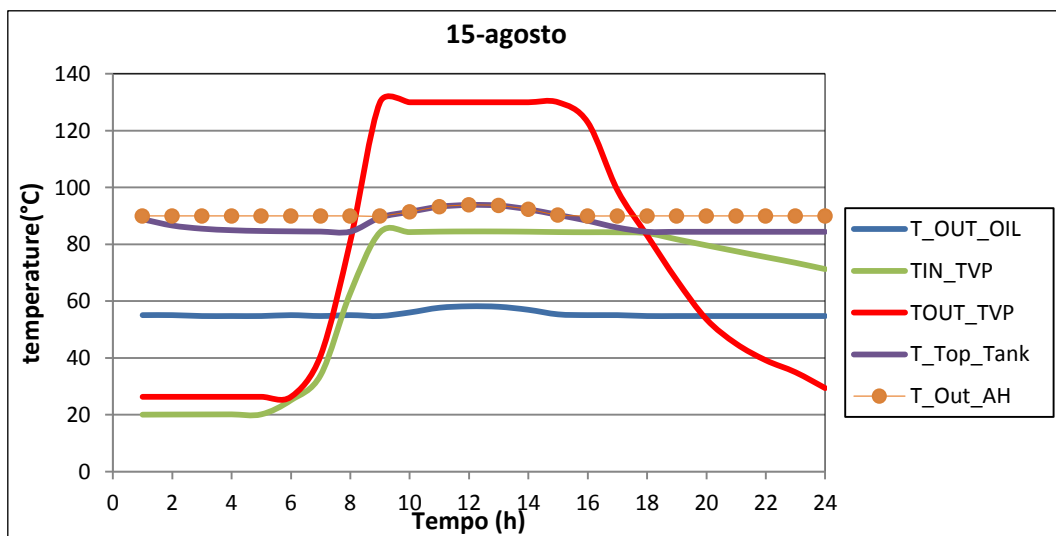
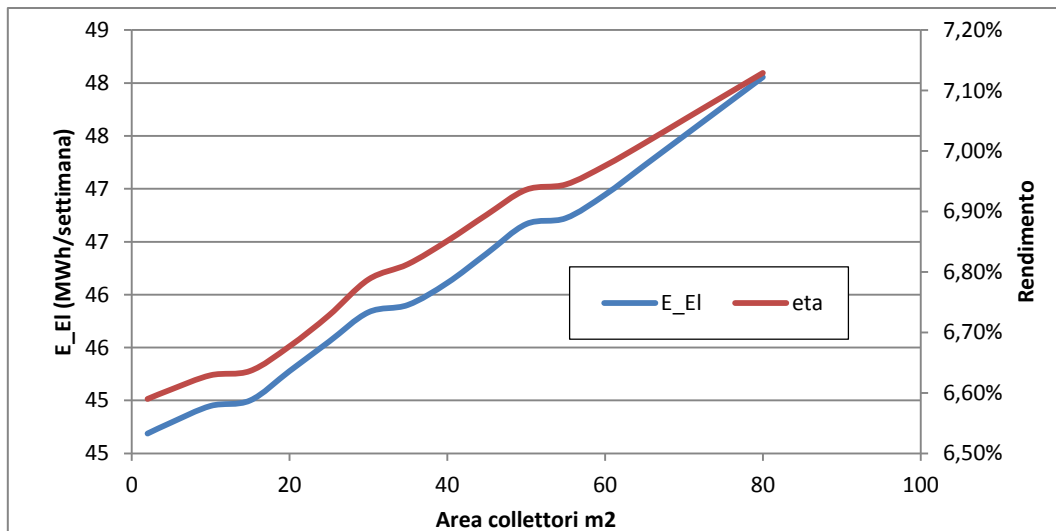


Figura 6 - giorno di funzionamento estivo

Si mostra in Figura 7 l'andamento, al variare dell'area del campo solare, della produzione elettrica e del rendimento medio annuo dell'ORC, all'aumentare dell'area dei collettori si nota un aumento sia della produzione elettrica che del rendimento. Un campo solare più ampio permette, infatti, di riscaldare maggiormente l'olio diatermico che quindi entrerà nella macchina ORC a temperature maggiori, e quindi si otterrà un rendimento maggiore.



**Figura 7 - Andamento della produzione elettrica e del rendimento medio annuo dell'ORC al variare dell'area dei collettori**

Infine dalle analisi economiche effettuate risultano tempi di ritorno, anche in assenza di incentivo per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, non eccessivamente elevati, ovvero di circa 7 anni, che si riducono a meno di 4 anni nel caso in cui si considerino gli incentivi. Nell'effettuare le analisi economiche non è stato considerato il risparmio ottenibile dalla produzione di acqua calda sanitaria tramite la fonte geotermica rispetto al sistema tradizionale (caldaia a gas), in quanto la struttura alberghiera già sfrutta il pozzo per tale scopo; considerando tale risparmio gli indici economici subiscono un forte miglioramento, si ha infatti un dimezzamento dei valori di SPB valutati in precedenza. Tale risultato positivo è dovuto anche al fatto che in tale impianto non è necessaria la spesa relativa alla costruzione del pozzo geotermico in quanto già presente.

In definitiva si può concludere che lo sfruttamento di micro-impianti ibridi di trigenerazione basati su fonti geotermica a bassa entalpia e solare può risultare energeticamente ed economicamente vantaggioso soprattutto nel caso in cui il pozzo geotermico sia preesistente e le temperature e portate disponibili siano sufficienti al buon funzionamento del sistema.