

# 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**

**SIMULAZIONE DINAMICA DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO COGENERATIVO A  
SERVIZIO DELLA PISCINA DEL CIRCOLO CANOTTIERI NAPOLI**

**RELATORE**

CH.MO PROF. ING FRANCESCO CALISE

CH.MO PROF. ING LAURA VANOLI

**CORRELATORE**

ING. RAFAL DAMIAN FIGAJ

**CANDIDATO**

MAROTTA MARIA CHIARA

MATRICOLA M67/120

L'Agenzia Internazionale dell'Energia (uno dei più importanti istituti di ricerca che si occupa di studi sull'energia) prevede che da qui al 2020 il consumo mondiale di energia aumenterà di circa il 65% rispetto ai livelli attuali. La disponibilità di combustibili fossili sarà sempre più ridotta con il passare del tempo (a causa dell'esaurimento dei giacimenti) e per poter soddisfare la crescente domanda di energia, sarà necessario avvalersi di nuove fonti, in particolare di quelle rinnovabili ed a minore impatto ambientale.

Il mix di fonti di energia attualmente disponibili è costituito da petrolio, gas naturale, carbone, energia idroelettrica ed energia nucleare in percentuali variabili da nazione a nazione. A queste fonti principali se ne aggiungono altre, anche se in quantità ancora poco significative, ma dotate della caratteristica di essere rinnovabili: l'energia geotermica, l'energia solare, l'energia eolica, l'energia da rifiuti, l'energia da biomasse.

Un'applicazione verso cui si nutrono notevoli aspettative per il futuro prossimo consiste nell'uso dell'energia solare. Utilizzando l'energia solare si può produrre energia termica, frigorifera o elettrica. L'energia solare può essere utilizzata per la produzione di energia termica, attraverso i collettori solari termici, e di energia elettrica, mediante pannelli fotovoltaici. In accoppiamento con macchine frigorifere ad azionamento termico, l'energia solare può anche produrre energia frigorifera. La produzione di questi due tipi di energia può essere combinata in modo da ottenere da un singolo collettore sia energia termica che elettrica, per mezzo di un PVT (PhotoVoltaic Thermal). I pannelli fotovoltaici PV in generale, possiedono la caratteristica che la loro efficienza diminuisce con l'aumentare della temperatura delle celle di cui è costituito. Il pannello PVT invece è in grado di produrre energia elettrica ma al contempo riesce a mantenere elevati livelli di efficienza. Questo avviene attraverso il raffreddamento delle celle tramite l'utilizzo di un fluido termovettore che sottrae calore che si produce. In questo modo si ottiene come output anche un fluido caldo che può essere utilizzato per scopi termici. Se, la temperatura del fluido termovettore è sufficientemente bassa, anche minore di 40 °C, l'efficienza elettrica del PVT è maggiore di quella del PV.

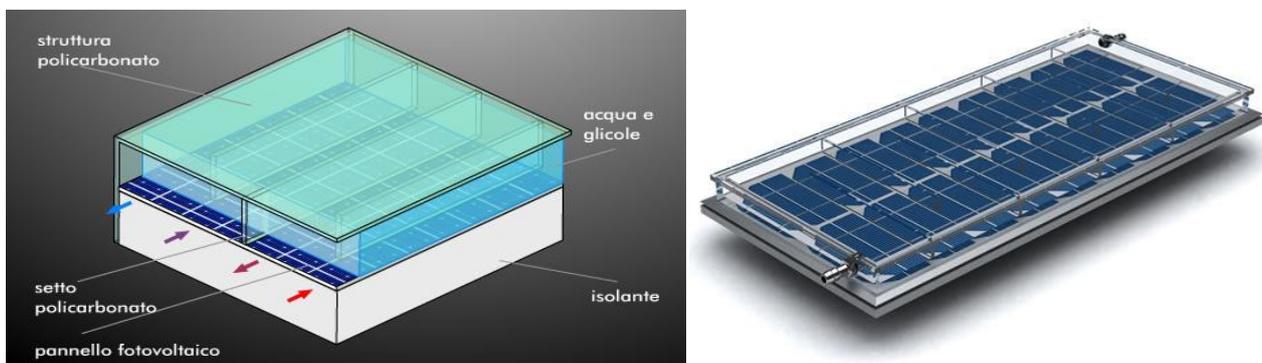


Figura 1: Pannello fotovoltaico cogenerativo

Questa tecnologia di pannelli è stata presa in considerazione nel lavoro che verrà descritto e che ha avuto come obiettivo la valutazione e la modellazione del consumo energetico di piscine outdoor e indoor. Lo scopo dello studio del fabbisogno energetico di una piscina è quello di stimare le perdite e i guadagni di calore e consentire una migliore progettazione di sistemi di riscaldamento delle stesse attraverso l'eventuale uso dei pannelli fotovoltaici cogenerativi (PVT) descritti sopra.

Questo lavoro è stato realizzato studiando i modelli di calcolo presenti in letteratura che descrivono l'equazione di bilancio termico relativa al comportamento di una piscina. Nel bilancio, sono considerati termini che tengono conto di diversi fenomeni come evaporazione, conduzione, convezione, irraggiamento che sono contributi negativi per il bilancio e guadagno solare, guadagno dovuto al contributo di caldaie o dei collettori che rappresentano contributi positivi per il bilancio. Innanzitutto è stata fatta una distinzione tra le 2 tipologie di piscina: indoor e outdoor. Le prime sono caratterizzate da elevati costi di gestione, infatti gli aspetti tecnici ed economici riscontrati sono dovuti principalmente al mantenimento dell'elevata temperatura di vasca e dell'ambiente circostante ed al controllo dell'umidità, in quanto vi è una notevole aliquota di evaporazione dell'acqua dalle vasche, dai corpi dei bagnanti e dalle docce. Invece, le piscine outdoor sono soggette a grandi perdite di energia e subiscono rapidi decrementi di temperatura soprattutto in relazione alle condizioni meteorologiche del luogo in cui si trovano; di contro esse, sono caratterizzate da guadagni di calore "gratuiti" dovuti alla presenza del sole, che riducono la richiesta di energia all'impianto di riscaldamento (di caldaie ed eventualmente di collettori solari).

Il caso di studio preso in esame è quello della piscina del Circolo Canottieri Napoli, uno dei più prestigiosi circoli nautici italiani. Il Circolo Canottieri Napoli sorge all'angolo sud-ovest dei giardini del Molosiglio, in uno spazio a ridosso di via Acton, comprendente l'omonimo porticciolo. Con un'estensione di 7000 m<sup>2</sup> e con 3500 m<sup>2</sup> di strutture coperte la sede è tra le più grandi tra i circoli nautici di Napoli (Figura 2). Il Volume della piscina, di circa 1300 m<sup>3</sup>, comprende anche la vasca di compenso che è posta sul lato lungo della piscina ed ha una volumetria dalla forma irregolare. L'intera struttura è aperta dal Lunedì al Sabato e coinvolge circa 1000 iscritti che hanno la possibilità di partecipare ai corsi offerti dal Circolo. L'impianto utilizzato per la produzione d'acqua calda sanitaria e per il riscaldamento della piscina e della struttura, è costituito da 3 caldaie tradizionali a basamento a gas naturale.



Figura 2: Circolo Canottieri Napoli

L'impianto esaminato, è stato studiato attraverso modelli disponibili in letteratura e successivamente implementati in simulazioni in regime dinamico. Per questo scopo, è stato utilizzato un software pensato per l'analisi e la simulazione, con notevole grado di dettaglio, delle prestazioni transitorie di sistemi energetici e termici il cui comportamento sia variabile nel tempo denominato: TRNSYS.

Il circuito solare, descritto di seguito, simula la produzione di acqua calda proveniente dai collettori solari a partire dall'energia solare:

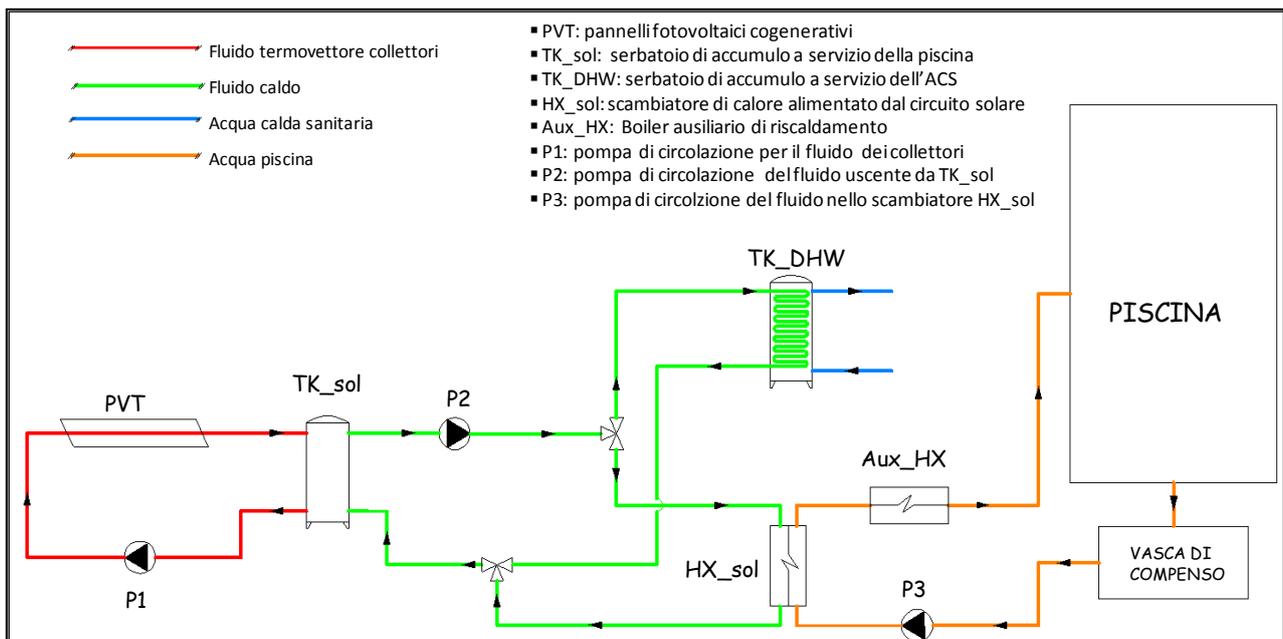


Figura 3: Schema generale dell'impianto in TRNSYS

Il circuito solare e quindi la circolazione del fluido, è caratterizzato dalla presenza dei collettori solari PVT cioè collettori fotovoltaici cogenerativi che, come è stato già detto precedentemente, producono sia energia elettrica che energia termica. Il fluido freddo dalla parte bassa del serbatoio viene mandato attraverso il circuito al collettore. Il collettore lo riscalda ad una certa temperatura e in uscita viene rimandato nuovamente al serbatoio, in particolare nella sua parte alta. Quando la temperatura di uscita è maggiore di 100 °C, si attiva lo scambiatore di calore HESC, che cede energia termica per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) e nello stesso tempo raffredda l'acqua del circuito. In altre parole, l'eventuale calore solare in eccesso da dissipare è convertito in ACS. Viceversa, quando la temperatura di uscita dai PVT è inferiore, HESC è bypassato.

Il serbatoio introdotto prima, è dotato di una lancia di stratificazione, sia in ingresso che in uscita. Il fluido riscaldato quando entra nel serbatoio viene immesso nello strato che è più prossimo alla sua temperatura grazie alla lancia di stratificazione. Se nello strato del serbatoio entra un fluido che ha una temperatura non prossima a quella dello strato, non si avrebbe più la stratificazione. Quindi il serbatoio ha due ingressi e due uscite, infatti il fluido entra e poi dalla sua parte alta viene prelevato e utilizzato successivamente per la piscina e l'acqua calda sanitaria. Il circuito è dotato di una pompa P1 che ha il compito di far circolare il fluido nei collettori. Quest'ultima funziona grazie alla presenza di un sensore di radiazione, ovvero un controllore On/off, che in funzione della radiazione solare regola il flusso di massa attraverso la pompa. Se la radiazione è maggiore di 10 W/m<sup>2</sup> il sensore on/off avrà un segnale di uscita pari a 1 che rappresenterà il segnale inviato alla pompa per farla funzionare. Oltre alla P1, è presente nel circuito la pompa P2 che preleva il fluido dal serbatoio TK\_sol che immagazzina l'energia termica proveniente dall'acqua riscaldata dai collettori solari e lo conduce o alla piscina o alla produzione di ACS. Affinché la pompa P2 funzioni, è necessario che il serbatoio arrivi ad una certa temperatura cioè deve raggiungere almeno una temperatura di 45°C. Il funzionamento della pompa è quindi legato alla temperatura del serbatoio e inoltre alle richieste dalla piscina e dall'acqua calda sanitaria. Quando non si raggiunge la temperatura di 45°C, la piscina non può essere riscaldata dal solare e quindi se è necessario interviene la caldaia. Vi è inoltre un diverter che splitta la portata a seconda delle esigenze privilegiando sempre la fornitura dell'energia alla piscina rispetto alla fornitura dell'energia all'acqua calda sanitaria. Questo fluido viene rimandato attraverso la valvola, al serbatoio TK\_sol. Poiché il fluido solare si è raffreddato, arriva nella parte bassa del serbatoio sempre attraverso la lancia di stratificazione.

La temperatura della piscina viene controllata da un sensore. Quando la temperatura scende al di sotto di 27°C, si aziona l'impianto di riscaldamento in primis quello solare e poi eventualmente interviene la caldaia. Questo avviene fino a che la temperatura della piscina raggiunge i 28°C. A questo punto l'impianto di riscaldamento si stacca e si riaccenderà successivamente solo quando la

temperatura scende di nuovo al di sotto di 27°C. Durante la notte la pompa P2 potrebbe entrare in funzione nel momento in cui la piscina richiede energia termica e il serbatoio risulta essere caldo. Mentre la richiesta di acqua calda sanitaria, durante la notte è nulla.

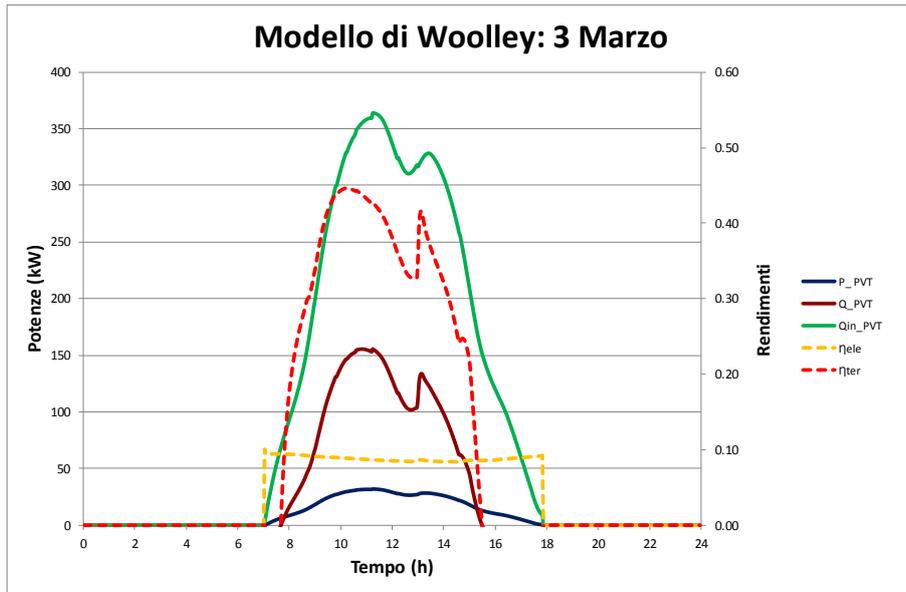
Dopo aver descritto il funzionamento dell'impianto, è stato effettuato la simulazione dinamica dei modelli e l'analisi dei risultati durante il periodo di funzionamento. L'arco temporale di funzionamento è tutto l'anno poiché l'impianto funziona sia in inverno che in estate quindi dalla prima all'ultima ora dell'anno. Tuttavia, il programma consente di integrare i risultati per diversi periodi di integrazione: la singola ora, le 24 ore del giorno, le 168 ore della settimana ecc, così da analizzare i dati per il periodo temporale che più interessa.

Le analisi annuali hanno avuto come obiettivo il confronto tra le percentuali di perdite e guadagni di calore per ogni modello studiato sia nel caso in cui la piscina funzioni in modalità indoor che outdoor. I risultati hanno dimostrato una netta differenza tra le perdite di calore nel caso outdoor rispetto al caso indoor, con valori molto più elevati nel primo caso. Questo risultato è dovuto alla grande percentuale di perdite dovute all'evaporazione dell'acqua della piscina nel periodo estivo rispetto a quello invernale.

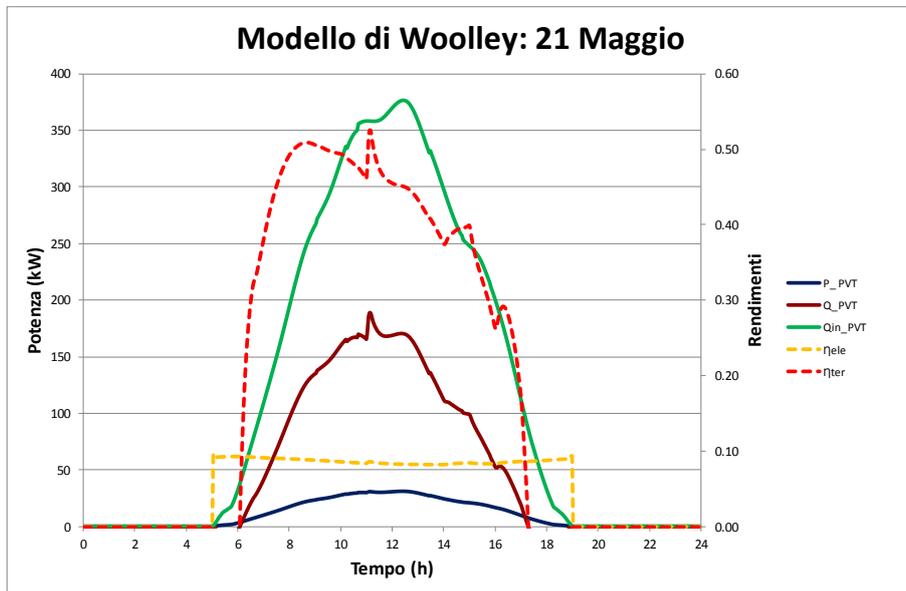
Per comprendere in maniera più approfondita le variazioni delle grandezze in gioco, si è proceduto ad analizzare il funzionamento dell'impianto su un orizzonte temporale più breve: una settimana e poi un giorno. I dati relativi alle analisi giornaliere, mediante i quali si è costruito l'andamento nel tempo delle potenze e delle energie, sono riportati per ogni 0.04 h, per un totale di 600 punti al giorno per ogni parametro. Si sono scelti giorni rappresentativi del funzionamento estivo e giorni rappresentativi del funzionamento invernale.

La prima giornata di funzionamento scelta corrisponde al giorno 3 Marzo, quindi alla modalità di funzionamento indoor. La seconda giornata di funzionamento corrisponde al giorno 21 Maggio, cioè alla modalità di funzionamento outdoor. I risultati sono stati analizzati e confrontati tra i due modelli presi in considerazione: il modello di Woolley et al. e quello basato sulla formulazione dell'ASHRAE del 2011.

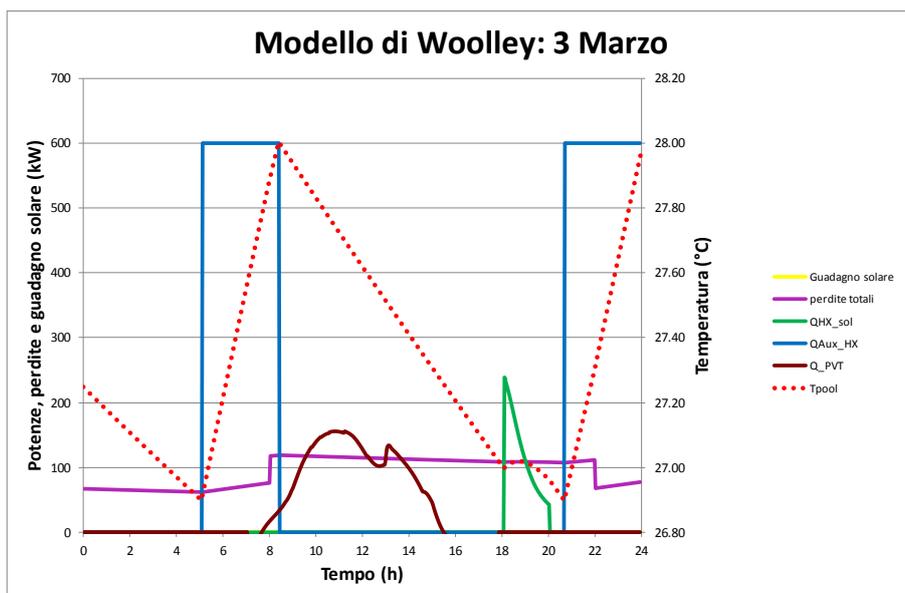
Considerando il modello di Woolley, dalla figura seguente è possibile notare l'andamento della potenza elettrica e termica prodotta dai PVT ed i rispettivi rendimenti di un giorno di funzionamento invernale. La produzione è concentrata principalmente nelle ore diurne fino ad annullarsi completamente di notte. Inoltre è facile notare che i pannelli PVT hanno un rendimento termico molto più alto rispetto al rendimento elettrico. Per questa ragione i PVT sono stati presi in considerazione in questo lavoro di tesi come sistema per il riscaldamento dell'acqua della piscina.



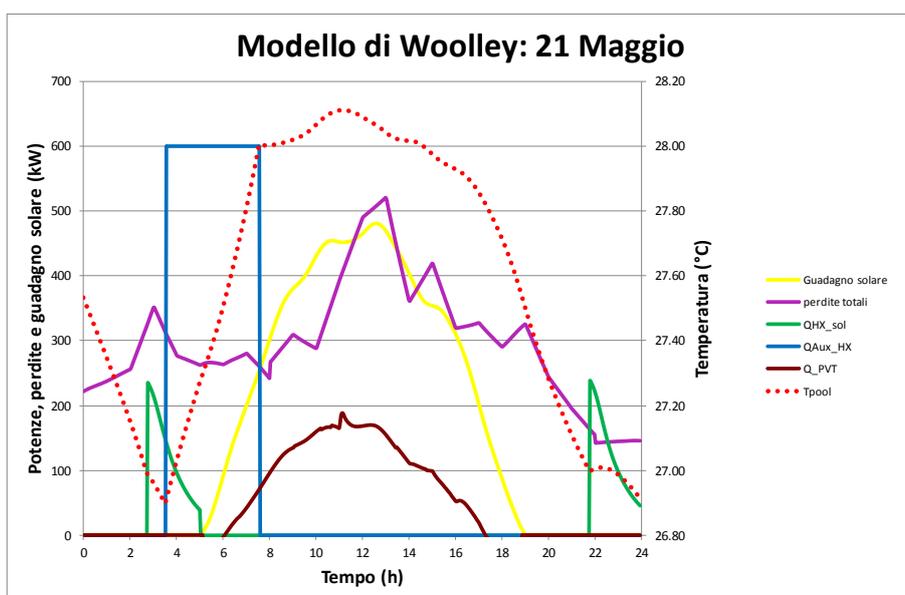
La figura seguente mostra gli stessi andamenti nel caso di funzionamento estivo. Si nota innanzitutto che la potenza termica ed elettrica prodotta, sono maggiori rispetto al caso precedente e questo è dovuto alla percentuale di potenza termica in ingresso ai PVT. Infatti, in questa figura, la potenza in ingresso ai collettori e le potenze prodotte sono concentrate in un intervallo temporale maggiore rispetto al giorno di funzionamento invernale, che va dalle 6.00 fino alle 18.00 circa.



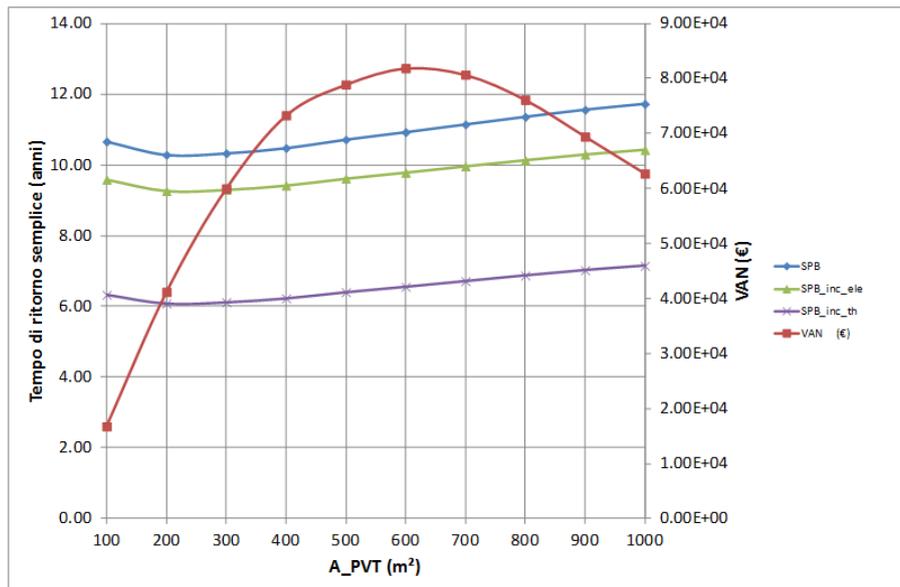
Le figure seguenti descrivono nello specifico, quello che accade nella piscina. E' possibile notare che il giorno 3 Marzo, poiché la piscina è coperta, non risulta essere presente il guadagno solare. Inoltre nelle prime ore del giorno, interviene il sistema ausiliario Aux\_HX che riscalda l'acqua della piscina fino a che non ha raggiunto la temperatura sufficiente che corrisponde ai 28°C. Successivamente, interviene lo scambiatore di calore alimentato dal circuito solare che è a servizio della piscina e riscaldata l'acqua per un periodo di tempo breve.



Nella figura corrispondente al giorno 21 Maggio, è nettamente presente il contributo del guadagno proveniente dal sole che influisce sul bilancio energetico della piscina. Di conseguenza, essendo la piscina all'aperto, le perdite di calore sono maggiori perché la percentuale di perdita dovuta all'evaporazione è molto alta ed inoltre hanno un andamento non lineare perché dipendenti dalla velocità del vento. Anche in questo caso interviene nelle prime ore del giorno la caldaia ausiliaria per riscaldare l'acqua della piscina, ma nelle restanti ore la piscina rimane pressoché calda grazie alla presenza del riscaldamento solare. Invece, lo scambiatore di calore alimentato dal circuito solare, fornisce il suo contributo nelle ore notturne quando il guadagno solare è ormai assente.



Infine è stata effettuata l'analisi parametrica facendo variare alcuni dei parametri che incidono sull'intero sistema. A titolo di esempio, la figura seguente mostra come facendo variare l'area dei collettori è stato possibile analizzare l'andamento del SPB con e senza incentivi e del VAN.



In particolare, il SPB semplice e il SPB con incentivi elettrici e termici decrescono in corrispondenza dell'area dei collettori compresa tra  $100\text{ m}^2$  e  $200\text{ m}^2$ . Successivamente questi indici risalgono fino a raggiungere il massimo in corrispondenza del valore più alto dell'area dei collettori che abbiamo considerato. Mentre il Valore Attuale Netto, VAN segue un andamento diverso, aumentando notevolmente fino ad un valore di 80000€ in corrispondenza dell'area dei collettori di  $600\text{ m}^2$  per poi decrescere fino ad arrestarsi a 60000€. In sintesi è possibile concludere che seguendo il criterio del SPB, l'area dei collettori ottimale è di  $200\text{ m}^2$ , mentre seguendo il criterio del VAN l'area dei collettori ottimale è di  $600\text{ m}^2$ .