UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

SCUOLA POLITECNICA DELLE SCIENZE DI BASE

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

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

SISTEMI DI ACCUMULO PER IMPIANTI DI SOLAR COOLING AD ALTA TEMPERATURA

RELATORE:

CH.MO PROF. ING. FRANCESCO CALISE

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

CORRELATORE:

ING. MARCO SCARPELLINO

ING. MARIA VICIDOMINI

CANDIDATO

ANGELA D'ORSO M67/149

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

Abstract

L'obiettivo del presente elaborato di laurea è lo studio di un impianto di solar cooling per la climatizzazione estiva di edifici. Tale impianto utilizza collettori solari ad alto vuoto, prodotti dall'azienda TVP Solar.

In particolare l'elaborato analizza diversi sistemi d'accumulo termico a servizio degli impianti di solar cooling valutandone il risparmio energetico ed economico a parità di efficienza dell'unità. Il modello di simulazione, sviluppato in ambiente TRNSYS consentirà di effettuare uno studio dinamico per la verifica delle prestazioni del sistema.

La domanda di condizionamento estivo nel settore terziario e residenziale è in rapido aumento, sia perché sono richieste condizioni di comfort più elevate, sia perché nell'ultimo decennio l'aumento delle temperature si è avvertito in modo più evidente.

L'uso crescente di impianti di condizionamento, con macchine frigorifere a compressione di vapore azionate elettricamente, è altresì causa dell'aumento della domanda di picco di potenza elettrica in estate, la quale, in numerosi casi, raggiunge la capacità limite delle reti.

Alla luce di queste premesse, l'esigenza di climatizzare minimizzando l'impatto ambientale, può essere in parte soddisfatta mediante l'utilizzo dell'energia solare per il raffrescamento. Considerando che il carico frigorifero è generalmente elevato quando la radiazione solare si aggira intorno ai valori massimi nella giornata e che, attualmente, esistono tecnologie consolidate che rendono possibile la conversione dell'energia solare sia in energia elettrica (fotovoltaico) che in energia termica (solare termico), è del tutto lecito pensare ad impianti di condizionamento cosiddetti solar-driven ossia che producano energia frigorifera a partire dalla fonte solare. Nonostante il mercato degli impianti di climatizzazione ad energia solare abbia ottime potenzialità di sviluppo, l'elevato costo degli investimenti iniziali e la scarsa densità di potenza di queste tecnologie fa sì che gli attuali sistemi non risultino sufficientemente competitivi rispetto agli impianti tradizionali ad energia elettrica o a gas. Uno schema di un impianto di solar-cooling, alimentato da pannelli solari termici con macchine frigorifere ad assorbimento, è tipicamente composto da un campo di pannelli solari, un serbatoio di accumulo, una unità di controllo, una macchina frigorifera alimentata termicamente, tubazioni e pompe. Il principio di funzionamento della tecnologia di solar cooling con macchine frigorifere ad assorbimento si basa, quindi, sul trasferimento di energia solare ad una macchina che la converte in energia frigorifera. Esistono numerose tecnologie in grado di realizzare questo effetto, tra le quali macchine ad assorbimento a singolo effetto, macchine ad assorbimento a doppio effetto, adsorbitori, sistemi dessiccant cooling, cicli Rankine, cicli ad eiezione di vapore. La maggior parte degli impianti installati sono composti da collettori a tubi evacuati con assorbitori a singolo effetto tuttavia questi soffrono di una bassa densità di potenza poiché il COP è basso, si può

pensare di migliorarne l'efficienza utilizzando collettori solari ad alta temperatura ed assorbitori a doppio effetto come nel caso oggetto di tesi.

L'attrattiva del solar cooling di utilizzare energia termica per produrre raffreddamento è molto più interessante rispetto all'utilizzo di un impianto fotovoltaico che produrrebbe energia elettrica per alimentare una tradizionale pompa di calore elettrica. Il vantaggio principale di un sistema di solar cooling guidato termicamente, rispetto ad un sistema fotovoltaico consiste nel fatto che l'energia elettrica prodotta in quest'ultimo caso non può essere accumulata se non in piccolissime quantità, verrebbe quindi accumulata nella rete elettrica rendendo il sistema fotovoltaico indipendente dall'alimentazione della pompa di calore. Non esiste, infatti, un accoppiamento diretto con costi ragionevoli tra un sistema e l'altro, occorrerebbe vendere in rete l'energia elettrica prodotta dal fotovoltaico quando non c'è richiesta di raffrescamento per poi riacquistarla, tra l'altro a costi più alti, quando la richiesta di raffrescamento aumenta.

Porgendo particolare attenzione al dispositivo di accumulo si è analizzato il comportamento di un impianto di solar cooling realizzato dall'azienda TVP Solar ed installato in Medio Oriente. L'accumulo energetico consiste nell'immagazzinare alcune forme di energia che possono essere recuperate in un secondo momento. La possibilità di immagazzinare energia costituisce un fattore essenziale in tutte le applicazioni in cui si ha discrepanza tra produzione ed utilizzo (a causa dell'intermittenza della fonte), mediante una duplice funzione: nel caso di energie convenzionali, essa può supplire a cali temporanei della produzione, garantendo il livello di domanda atteso; nel caso di produzione da fonti rinnovabili, fornisce valore aggiunto rendendo tale produzione quantitativamente prevedibile.

Sulla base di queste considerazioni l'azienda TVP Solar ha sviluppato un impianto collocato in una località mediorientale caratterizzata da elevatissimi valori di irraggiamento, con le seguenti caratteristiche:

- 50 pannelli solari divisi in 5 file da 10;
- scambiatore di calore;
- serbatoio di accumulo termico;
- pompe;
- gruppo frigorifero ad assorbimento;

A questi si aggiungono:

- tubazioni ed apparecchiature di sicurezza e di misura.

I collettori, "TVP Solar MT-Power v 3.11.22", utilizzati nell'impianto oggetto di studio sono solari termici piani evacuati. Si tratta di collettori che riescono a captare sia la radiazione diffusa che quella diretta.

Questi pannelli mantengono un'efficienza elevata anche ad alte temperature, senza avere bisogno di un sistema a concentrazione e di conseguenza sono in grado di alimentare un assorbitore bistadio che necessita di un fluido in ingresso ad una temperatura di 160-180 °C.

Nel progetto il gruppo frigorifero utilizzato è un macchina ad assorbimento a doppio effetto che utilizza come fluidi di lavoro acqua e bromuro di litio; la macchina è prodotta dalla ditta BROAD. Il gruppo frigorifero utilizzato è un modello BCTZH23; esso è alimentato dall'acqua calda prodotta dal campo solare, ed ha una potenza frigorifera di 23 kW ed un COP di 1.1. 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. Il principio di funzionamento dell'impianto è estremamente semplice: i pannelli solari TVP producono un fluido termovettore ad alta temperatura che alimenta il refrigeratore d'acqua ad assorbimento, il quale è in grado di convertire l'energia termica prodotta dal collettore solare in energia frigorifera, da utilizzare per il raffrescamento degli ambienti che in questa località è richiesto tutto l'anno a causa delle particolari condizioni metereologiche.

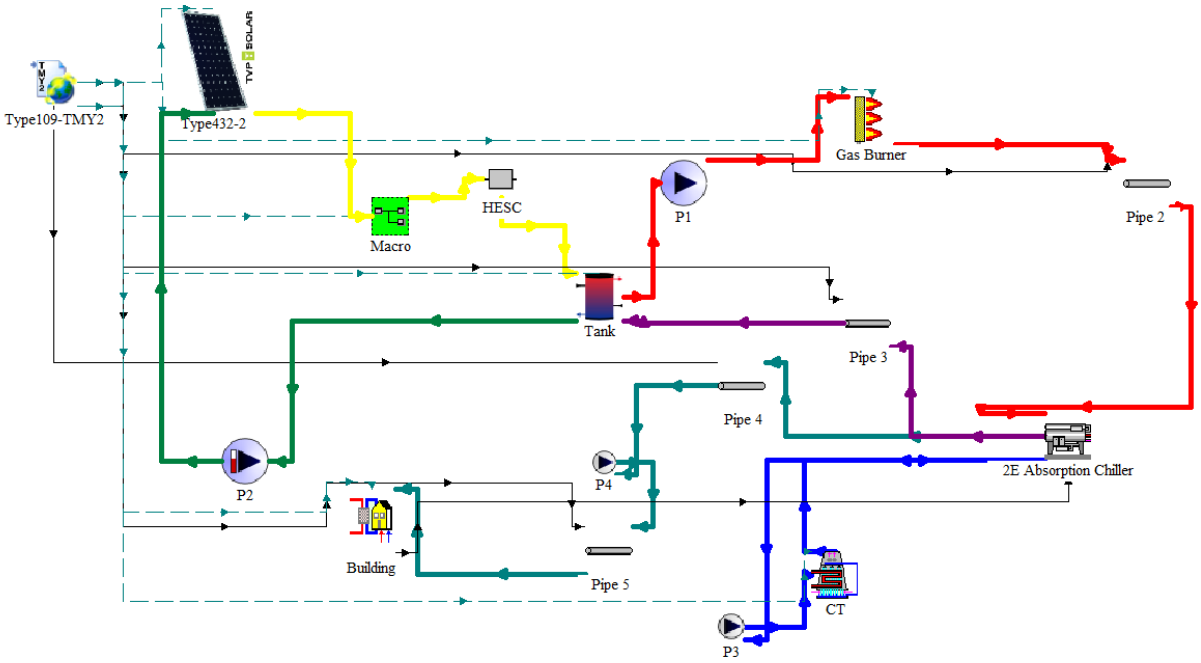

Figura 1 Modello in Trnsys

Il Type Weather fornisce al pannello "TVP" informazioni circa le caratteristiche d'insolazione, temperatura ambientale e situazione dei venti di un anno intero. La radiazione solare catturata dai collettori riscalda l'acqua. La pompa a portata variabile che controlla il circuito solare ha una portata nominale a 50 Hz, questa viene fatta variare in modo che si raggiunga una temperatura di set_point all'uscita dei collettori di 180°C.

Solo quando viene raggiunta tale temperatura intervengono dei controllori che impongono alla pompa di aumentare la portata fino ad valore massimo pari a quello nominale in modo tale da ottenere in uscita dal pannello acqua alla temperatura di set point. Lo Scambiatore di calore ha una funzione di sicurezza: si attiva quando la T all'interno del serbatoio supera un valore massimo impostato a 185°C. Quando la temperatura raggiunge valori superiori a 185° C, lo scambiatore produce acqua calda sanitaria abbassando la temperatura d'ingresso al tank. Il flusso va nel serbatoio che separa il circuito primario dal secondario, se la temperatura è sufficiente ad alimentare il chiller bistadio una pompa a portata fissa aspira il flusso che by-passa il gas burner, se invece la temperatura è inferiore a quella di set point si attiva la caldaia. La possibilità di variare la portata è garantita dalla presenza del serbatoio d'accumulo, termicamente isolato, di circa 1 m^3 nel caso base, poiché l'indagine riguarda per l'appunto l'ottimizzazione del tank, questo valore verrà cambiato durante le simulazioni.

Il termostato dell'edificio, Type 2b, il Type 14h che registra le ore di funzionamento e il Type 41a che registra i giorni di funzionamento inviano il segnale ad una calcolatrice, questa combinando i tre segnali con altre caratteristiche da rispettare genera il segnale di funzionamento per tutti i componenti del circuito secondario (Gas Burner, Cooling Tower, Assorbitore e Pompe).

Sono state effettuate analisi giornaliere, prendendo in considerazione un giorno significativo estivo, un'analisi settimanale ed una annuale.

E' stata effettuata l'analisi parametrica con lo scopo di osservare condizioni di funzionamento diverse da quella di riferimento, al fine di comprendere gli effetti della variabilità di alcuni parametri di progetto più significativi su altri indicatori rappresentativi delle condizioni energetiche, economiche e di efficienza del sistema proposto. I parametri scelti per le analisi sono: superficie di campo solare, volume del tank, i carichi interni all'utenza e la trasmittanza che hanno assunto i valori riportati in Tabella 1. Per completezza le analisi sono state condotte su altre 5 località: Almeria, Pantelleria, Il Cairo, Casablanca, Tehran.

Tabella 1 Parametri variabili nelle analisi parametriche

Parametri	Intervallo di variazione	Unità di misura
Volume serbatoio	0.5-5	m^3
Area totale collettori	20-312	m^2
Carichi Interni	6-24	kW
Trasmittanza	1-1.5	W/m^2K

A titolo di esempio in Figura 2 si mostra l'andamento delle potenze in un giorno tipico estivo nel caso studio base. È evidente che nel momento in cui la radiazione solare non è più sufficiente a

soddisfare le esigenze del chiller la caldaia ne sostituisce la funzione. È possibile constatare anche che, sebbene in questo giorno dell'anno la radiazione sia più prolungata nel tempo, (il che corrisponde ad una maggiore potenza sviluppata dai pannelli) questo non coincide con un minor consumo di energia primaria del gas burner poiché in questo giorno le temperature sono ovviamente più alte per un maggior numero di ore, il che implica una maggiore esigenza di raffrescamento.

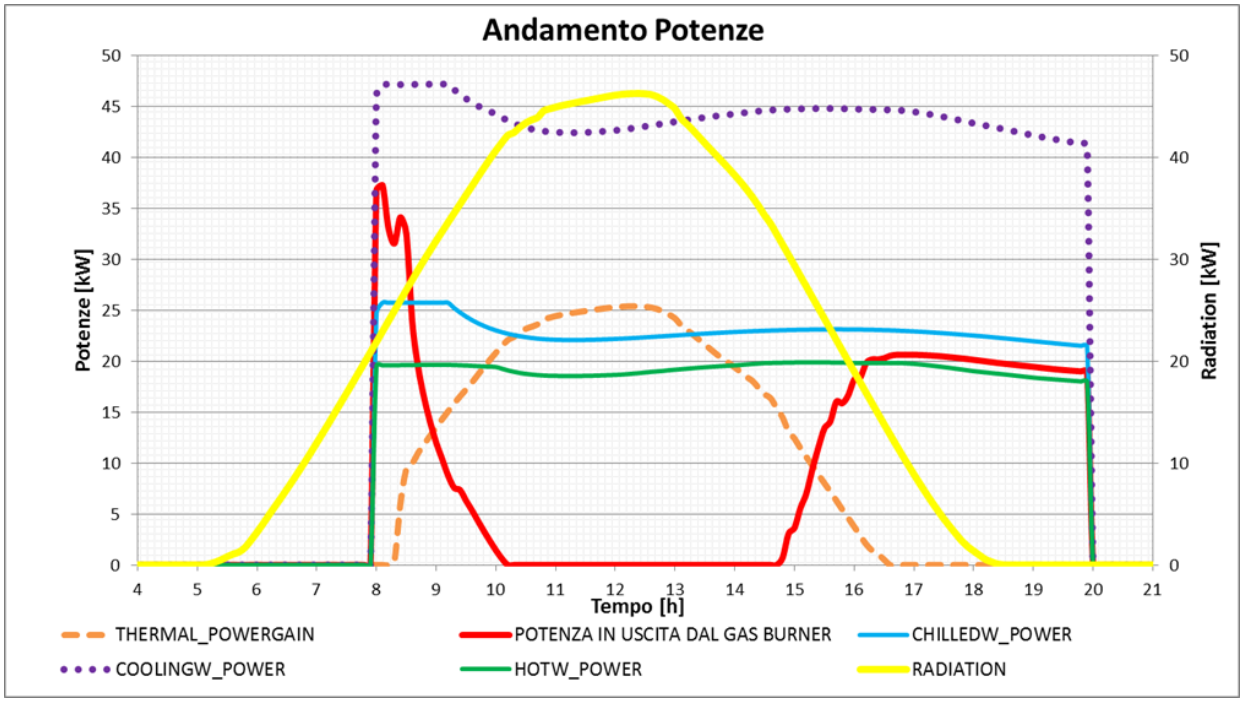

Figura 2 Giorno funzionamento estivo, andamento delle Potenze

Dalla Figura 3 si nota che la produzione dei pannelli è maggiore nella parte centrale dell'anno, sebbene per questa località le condizioni metereologiche siano pressoché costanti. Durante l'anno, l'efficienza dei collettori non varia molto; questo sia perché il Set Point dell'utenza è sempre lo stesso nonostante il cambiamento stagionale, sia perché la temperatura ambiente si mantiene, come già detto, piuttosto alta tutto l'anno. Il COP dell'assorbitore si mantiene molto alto tutto l'anno, con valori compresi tra 1.1 ed 1.6.

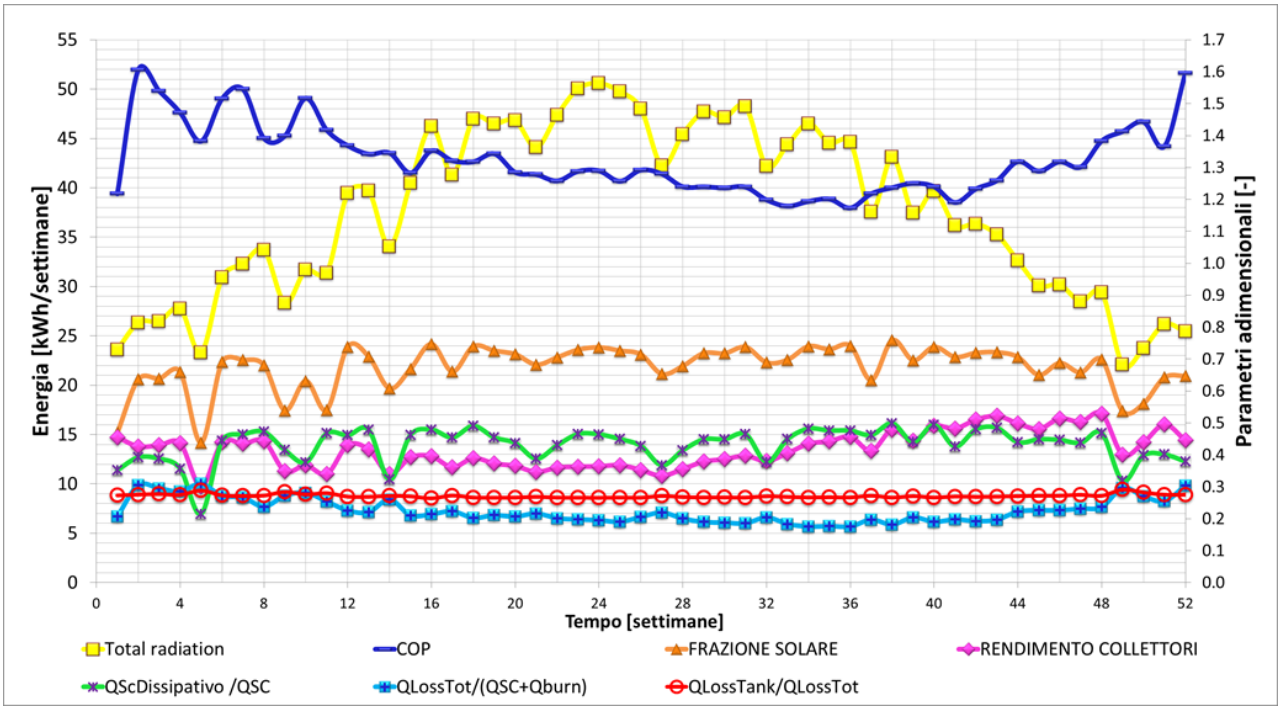

Figura 3 Analisi settimanale, caso reale.

Dalle analisi condotte al variare dell'area dei collettori si sono ottenuti risultati positivi con conseguenti risparmi economici ed energetici solo per la località di Almeria e nell'ipotesi irreale di costi unitari ragionevoli in Arabia Saudita, in cui gli attuali bassissimi costi unitari (0.039€/Sm^3 per il gas naturale e 0.103€/kWh per l'energia elettrica) rendono i sistemi tradizionali molto più convenienti.

Ciò è valido escludendo valori troppo piccoli di superficie captante. Per le altre località le curve dei SPB crescono all'aumentare della superficie, questo risultato è attribuibile alla mancata combinazione dell'effetto dei costi ragionevoli e dell'elevato irraggiamento, combinazione che invece si ottiene solo nei due casi citati sopra.

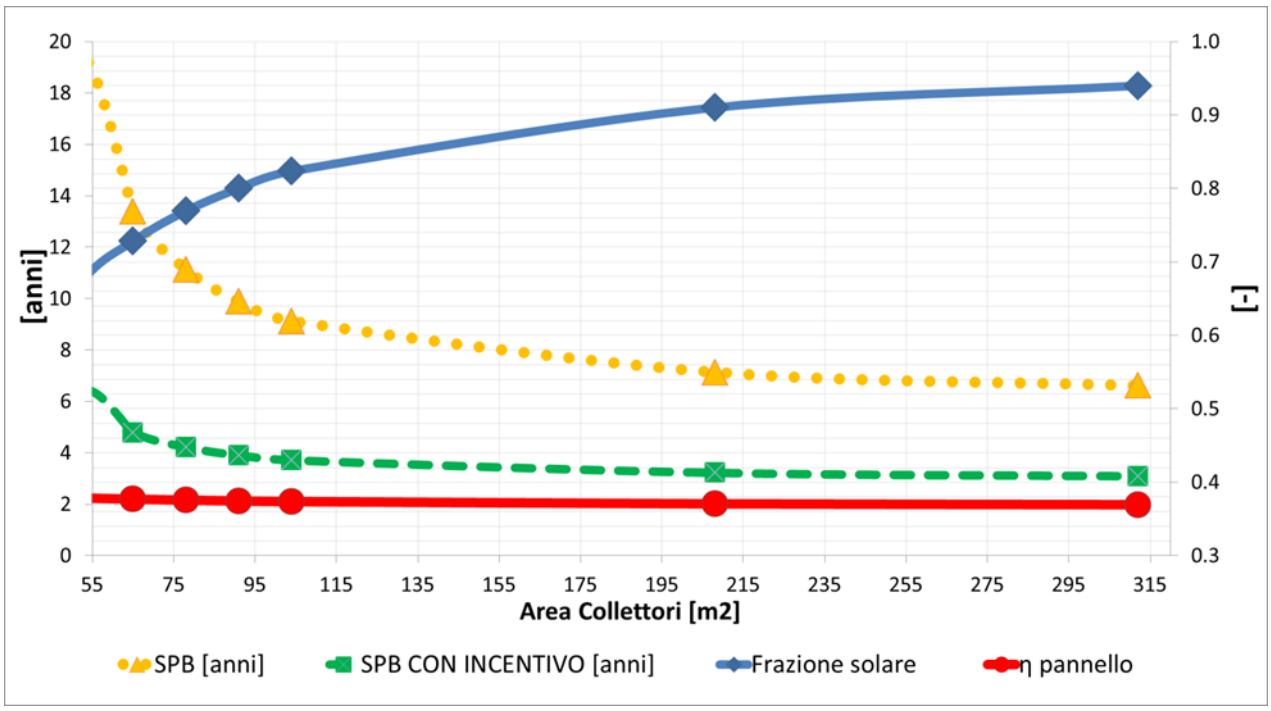

Figura 4 SPB; SPB con incentivo al variare dell'area dei collettori Almeria

Per quanto riguarda, invece, l'analisi condotta al variare del volume del serbatoio, sembrerebbe sempre meglio scegliere il volume più piccolo possibile, a causa del preponderante effetto che ha l'aumento delle perdite sul vantaggio del time shift ovvero la possibilità di spostare nel tempo l'energia accumulata. Per la località mediorientale, poi, volumi grandi sono particolarmente compromessi dall'effetto dell'elevata differenza tra le temperature ambientali del giorno e della notte. Poiché infatti, una località del genere è caratterizzata da un'elevata escursione termica, alla grande quantità di calore accumulato durante il giorno corrisponde una grande quantità di calore perso durante la notte.

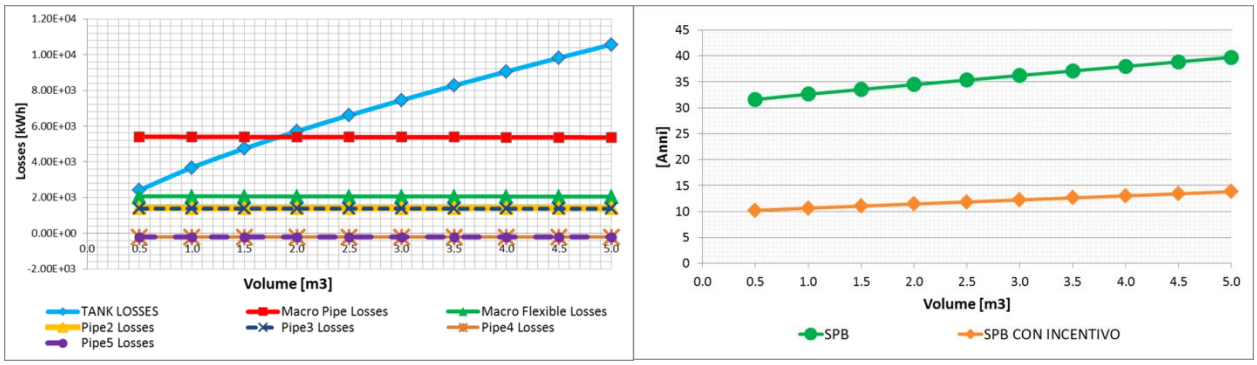

Figura 5 Analisi al variare del volume del serbatoio nel caso di riferimento

Per i carichi interni, invece gli andamenti sono chiaramente a favore della massimizzazione dei carichi. Poiché la potenza in uscita dai pannelli è costante mentre la potenza prodotta dal Gas

Burner aumenta, la frazione solare diminuisce così come diminuiscono le perdite e di conseguenza si ha una diminuzione significativa dei tempi di ritorno.

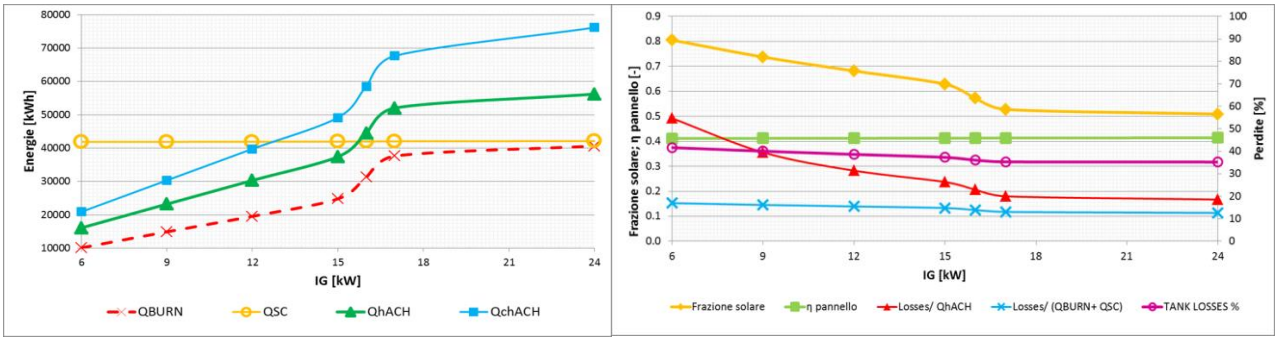

Figura 6 Energie e Perdite al variare dei Carichi interni.

In definitiva, quindi, l'impianto diventa particolarmente redditizio in utenze caratterizzate da forti e costanti carichi interni, che implicano la massimizzazione delle ore di funzionamento. Per questo motivo ci si attende ottime prestazioni, dal punto di vista energetico ed economico, per utenze di tipo terziario e commerciale. Viceversa, una minore redditività è attesa per utenze residenziali caratterizzate da una maggiore discontinuità della richiesta frigorifera e da un valore minore del carico frigorifero.

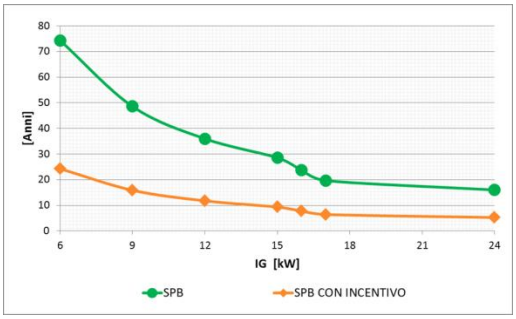

Figura 7 SPB con e senza incentivo del 50% al variare dei Carichi interni.

Parallelamente all'analisi in ambiente TRNSYS, è stata sviluppata anche un'analisi che riguarda il solo comportamento del serbatoio attraverso un software Soco Tools SOCO (Storage Optimization COncept) in grado di pianificare e progettare sistemi di storage complessi sulla base di dati reali provenienti da fonti diverse. Si è calcolato l'aumento delle perdite sia all'aumentare del volume del serbatoio che all'aumentare del *fattore di forma,* mantenendo costante l'altezza e diminuendo, quindi, il volume ovvero la sezione dell'accumulatore.

$$Fattore\ di\ forma = \frac{Superficie\ Totale\ Cilindro}{Volume\ Cilindro}$$

In Figura 8 si riportano gli andamenti che mostrano come l'aumento delle perdite non è lineare con l'aumento del volume, piuttosto il diagramma presenta una curva che implicherà l'esistenza di un massimo delle perdite per un determinato valore di volume a cui seguirà una loro diminuzione. Sembrerebbe, quindi, che sia possibile ottenere un volume ottimale per il quale da un lato si minimizzano le perdite e dall'altro si massimizza l'effetto del time shift che non è deducibile dall'analisi Soco. Per quanto riguarda invece il Fattore di forma, poiché il suo aumento nell'analisi è dovuto alla diminuzione della sezione del serbatoio sembrerebbe che perdite minori corrispondano a sezioni più piccole, ovvero che converrebbe progettare accumulatori più snelli possibili, conclusione attribuibile ad una migliore stratificazione e quindi ad una minore dispersione termica confinata solo alla parte più alta del serbatoio.

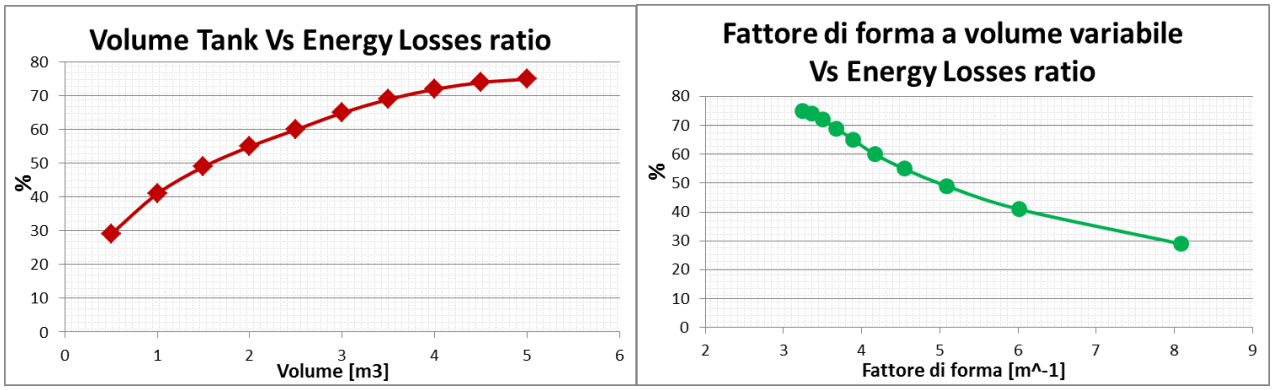

Figura 8 Andamento delle perdite al variare del Volume e del Fattore di forma del Tank.