

Università degli studi di Pisa

Facoltà di Ingegneria

Tesi per il conseguimento della laurea specialistica
in ingegneria energetica

**Ricerca e sviluppo su impianti
termoidraulici con pompe di calore
abbinate a collettori solari termici**

Tutori:

Dott. Ing. Walter Grassi
Dipartimento di energetica

Lauri Daniele

Vicepresidente della Sunerg Solar

Candidato:

Alessio Caposciutti

Anno accademico 2012/2013

*Dedicato
ad Anna Mazza e
Mario Caposciutti*

INDICE

Introduzione	6
Il riscaldamento degli ambienti	8
L'acqua calda sanitaria	10
Pompe di calore	11
Pannelli solari termici	17
Caso studio	26
Bilancio energetico del serbatoio	29
Implementazione delle normative di riferimento	32
Calcolo dell'energia ottenuta dai pannelli solari termici	38
Conclusioni	45
Bibliografia	53

Introduzione

La società odierna per soddisfare i propri bisogni necessita di un'enorme quantità di energia e questa domanda, anche se in Italia è in leggero calo negli ultimi anni, a livello globale è in continua crescita.

L'energia utilizzata negli edifici è originata quasi totalmente da combustibili fossili, una fonte destinata ad esaurirsi, per questo motivo il loro approvvigionamento è uno dei problemi fondamentali della nostra epoca. Sono già in atto massicci investimenti sulle fonti d'energia alternative come il solare, l'eolico, le biomasse l'idroelettrico e il geotermico per far fronte all'aumento vertiginoso della richiesta di energia da parte dei paesi in via di sviluppo come Cina, India e Sud America, ma anche per rispondere ai problemi causati dall'elevato impatto ambientale caratteristico dei tradizionali metodi di produzione energetica.

Nella seguente tabella sono riportate le quantità di energia impiegate nel territorio italiano:

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DGSAIE
BILANCIO DI SINTESI DELL'ENERGIA IN ITALIA

(milioni di tonnellate equivalenti di petrolio)

(Al netto dei pompaggi)

Disponibilità e Impieghi	ANNO 2012						ANNO 2011					
	Solidi	Gas	Petrolio	Rinnovabili	Energia elettrica	Totale	Solidi	Gas	Petrolio	Rinnovabili	Energia elettrica	Totale
1. Produzione	0,633	7,047	5,397	24,802		37,880	0,714	6,920	5,284	22,554		35,472
2. Importazione	15,947	55,467	86,278	2,088	9,981	169,761	15,530	57,632	89,943	2,168	10,454	175,727
3. Esportazione	0,230	0,114	29,173	0,053	0,502	30,072	0,219	0,102	26,700	0,157	0,393	27,571
4. Variaz. scorte	-0,214	1,045	-1,087	0,019	0,000	-0,237	-0,575	0,636	-0,630	-0,007		-0,576
5. Consumo interno lordo (1+2-3-4)	16,563	61,355	63,590	26,818	9,479	177,805	16,600	63,814	69,157	24,572	10,061	184,204
6. Consumi e perdite del settore energ.	-0,328	-1,618	-5,015	-0,008	-41,618	-48,586	-0,312	-1,511	-5,493	-0,007	-41,980	-49,303
7. Trasformazioni in energia elettr.	-11,788	-20,565	-3,300	-21,715	57,368		-11,776	-23,106	-3,302	-19,632	57,876	
8. Totali impieghi finali (5+6+7)	4,447	39,173	55,274	5,095	25,229	129,218	4,512	39,197	60,362	4,873	25,957	134,901
- industria	4,356	12,285	4,263	0,270	9,810	30,983	4,409	12,674	4,840	0,257	10,476	32,656
- trasporti	-	0,753	36,181	1,273	0,925	39,132	-	0,722	39,524	1,296	0,928	42,470
- usi civili	0,004	25,545	3,675	3,402	13,996	46,621	0,004	25,244	3,982	3,179	14,045	46,454
- agricoltura	-	0,123	2,167	0,151	0,499	2,940	-	0,130	2,234	0,141	0,508	3,013
- usi non energetici	0,088	0,467	5,864	-	-	6,419	0,099	0,427	6,374	0,000	-	6,900
- bunkeraggi	-	-	3,124	-	-	3,124	-	-	3,408	-	-	3,408

Bilancio provvisorio: Versione 26 aprile 2013

Attualmente oltre un terzo dell'energia utilizzata in Italia è destinata agli utilizzi civili (46,621 Mtep). Per fornire ai cittadini corrente elettrica, riscaldamento e acqua calda sanitaria. In previsione di un futuro in cui si farà enorme attenzione al risparmio energetico, la presente relazione ha come obiettivo l'analisi di metodi per ridurre l'utilizzo di fonti d'energia fossili necessarie a coprire il fabbisogno di industrie e civili abitazioni.

Visto l'aumento generale che le bollette hanno subito negli ultimi anni, investimenti per la riqualificazione energetica degli edifici possono risultare estremamente convenienti per i privati se usufruiscono degli sgravi fiscali messi a disposizione dallo stato, inoltre questo tipo di interventi costituirebbe un volano economico che potrebbe far ripartire l'indotto dell'edilizia in Italia.

Con un impianto termodinamico adeguato che sfrutta l'energia solare e l'energia latente dell'aria si può rendere un edificio indipendente dal metanodotto con un conseguente risparmio sui costi di gestione

Verranno in seguito analizzate tecnologie utilizzabili contemporaneamente per ottenere acqua calda e climatizzazione degli ambienti.

Il riscaldamento degli ambienti

Nella maggior parte degli edifici è necessario un impianto per il riscaldamento degli ambienti nel periodo invernale per permettere il normale svolgimento delle attività umane e aumentare la qualità della vita delle persone. A tale scopo le tecnologie classiche si basano sul consumo di combustibili come legname, carbone, gas naturale, e derivati del petrolio, i quali con la loro combustione sprigionano l'energia termica necessaria a riscaldare l'ambiente circostante oppure a riscaldare un fluido termovettore (aria, acqua o vapore) che verrà distribuito in circuiti con appositi terminali (termosifoni, ventilconvettori, pannelli radianti...) per il riscaldamento di interi edifici.



Ogni edificio ha un proprio fabbisogno di energia termica che dipende da molti fattori.

La geometria e quindi le dimensioni degli ambienti influenzano direttamente la superficie di scambio termico tra interno ed esterno dell'edificio, inoltre bisogna prestare particolare attenzione ai "ponti termici" ovvero a conformazioni dell'involucro (spigoli, pilastri, balconi, aggetti...) che favoriscono le dispersioni termiche.

I materiali che compongono la struttura determinano l'isolamento termico, il quale è strettamente legato alla conducibilità delle pareti. Le condizioni climatiche esterne ovviamente fanno variare la richiesta di energia, bisogna quindi prestare attenzione alle temperature medie stagionali della località in esame e anche all'insolazione sulle pareti e sulle finestre.

Il numero delle persone che frequentano l'edificio e le loro azioni svolte determinano gli

apporti di calore interni, infatti ogni persona emette una certa quantità di calore e anche l'illuminazione elettrica e gli elettrodomestici costituiscono fonti di energia termica.

La normativa indica le seguenti formule per il calcolo dell'energia termica necessaria:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \times Q_{gn}$$

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \times (Q_{int} + Q_{sol})$$

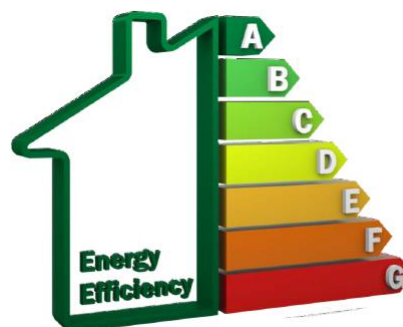
Dove:

- $Q_{H,ht}$ è lo scambio termico totale nel caso di riscaldamento [kWh];
- Q_{gn} sono gli apporti termici totali, somma dei contributi al riscaldamento interni e solari [kWh];
- $Q_{H,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione nel caso di riscaldamento [kWh];
- $Q_{H,ve}$ è lo scambio termico per ventilazione nel caso di riscaldamento [kWh];
- Q_{int} sono gli apporti termici interni [kWh];
- Q_{sol} sono gli apporti termici solari [kWh];
- $\eta_{H,gn}$ è il fattore di utilizzazione degli apporti termici, ovvero la misura di quanto questi incidono sul resto del fabbisogno.

Il calcolo dettagliato di questi valori esula dallo scopo di questa relazione.

In generale ogni edificio può essere classificato in base alla sua richiesta d'energia secondo un semplice criterio che li raggruppa in classi come illustrato nella tabella seguente:

Fabbisogno [kWh/m ² *anno]	Classe energetica
< 20,888	Classe A+
< 32,776	Classe A
< 47,664	Classe B
< 65,552	Classe C
< 80,440	Classe D
< 107,216	Classe E
< 148,881	Classe F
>= 148,881	Classe G



La trasmittanza media pesata delle pareti dell'edificio U_{med} [W/m²*°C] può essere presa come indicatore della qualità dell'isolamento termico dello stabile in esame e moltiplicandola per la superficie disperdente dell'edificio e per la differenza tra la temperatura di benessere e la temperatura di progetto possiamo calcolare la potenza di picco necessaria a scaldare l'abitazione.

$$P = U_{med} * S * (T_{ben} - T_{pro}) \quad [W]$$

L'acqua calda sanitaria

Con l'acronimo ACS si indica l'acqua calda sanitaria ovvero l'acqua che sgorga dai rubinetti e dalle docce utilizzabile per la cucina e l'igiene personale e dell'immobile.



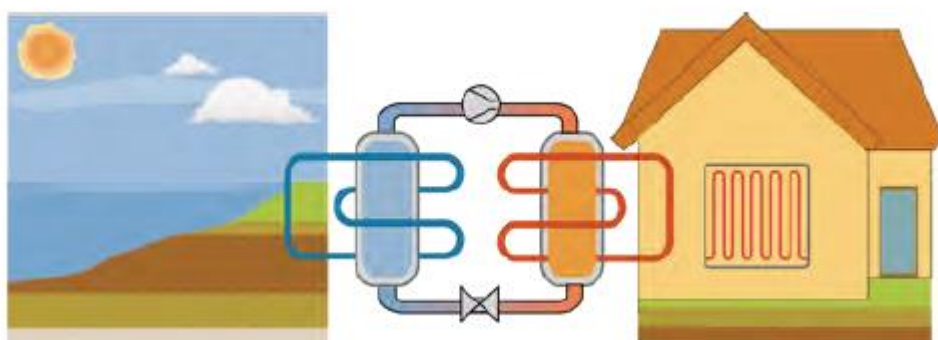
Spesso quest'acqua non ha una temperatura gradevole, soprattutto nei mesi invernali, quindi prima di essere utilizzata dalle persone deve essere prima riscaldata a una temperatura che oscilla dai dai 35 ai 55°C a seconda della tipologia d'impianto, delle abitudini degli utenti e della zona climatica dove è situato l'impianto. Le classiche tecnologie impiegate sono gli scaldabagni a resistenza elettrica o le caldaie a combustibile fossile (solitamente metano, GPL o gasolio).

L'attenzione che si pone sempre di più verso il risparmio energetico ci ha portati a valutare nuove tecnologie per ottenere acqua calda a temperature relativamente basse, in quanto dal punto di vista exergetico è un enorme spreco utilizzare fonti d'energia versatili come corrente elettrica e gas metano per ottenere una sorgente termica come l'ACS, la quale potrebbe essere ricavata anche dal recupero di calore residuo di altre attività umane.

Il boom economico dei decenni passati ha portato gli utenti ad abituarsi a tecnologie basate sui combustibili fossili e sugli sprechi, anche perché fino a 10 anni fa le spese per le bollette non gravavano così tanto sui bilanci economici familiari e delle aziende, ma oggi, con l'aumento dei prezzi delle materie prime, si rende necessario ricorrere a impianti che sfruttino sorgenti più economiche anche a fronte di investimenti iniziali superiori. Una pompe di calore, una caldaia a pellet o un impianto solare termico infatti costano molto di più della semplice caldaia a metano, ma hanno il vantaggio di avere costi di gestione più ridotti: A parità di riscaldamento ottenuto, il pellet costa un terzo del metano, le pompe di calore possono essere alimentate in parte da pannelli fotovoltaici e i pannelli solari termici sfruttano la gratuita energia solare.

Pompe di calore

La pompa di calore è una macchina capace di trasferire energia termica da una sorgente a temperatura più bassa (aria esterna, acqua di falda, acque superficiali, suolo, calore residuo) ad una a temperatura più alta, utilizzabile dall'uomo, con il solo apporto di energia elettrica. Il trasferimento avviene per mezzo di un circuito frigorifero: se il funzionamento è di tipo reversibile, l'unità può funzionare anche come macchina frigorifera.



Il refrigerante utilizzato è un fluido di lavoro che percorrendo il ciclo frigorifero subisce dei cambiamenti di stato rendendo possibile il trasferimento del calore dalla sorgente a temperatura più bassa a quella a temperatura più alta.

Il ciclo si compone di quattro fasi che si ripetono: evaporazione, compressione, condensazione, espansione. L'evaporatore è uno scambiatore di calore nel quale avviene l'evaporazione del fluido refrigerante con sottrazione di calore alla sorgente (acqua, aria, suolo), in condizioni di bassa temperatura e pressione. Il compressore è un dispositivo posto tra evaporatore e condensatore che compie un lavoro sul fluido refrigerante, mantenendolo in circolazione nel circuito e dandogli un apporto aggiuntivo di energia, sotto forma di pressione e temperatura.

Il condensatore è un altro scambiatore di calore nel quale avviene la condensazione del fluido refrigerante con conseguente cessione di calore al mezzo di contatto (acqua, aria).

Tramite la valvola di espansione il fluido

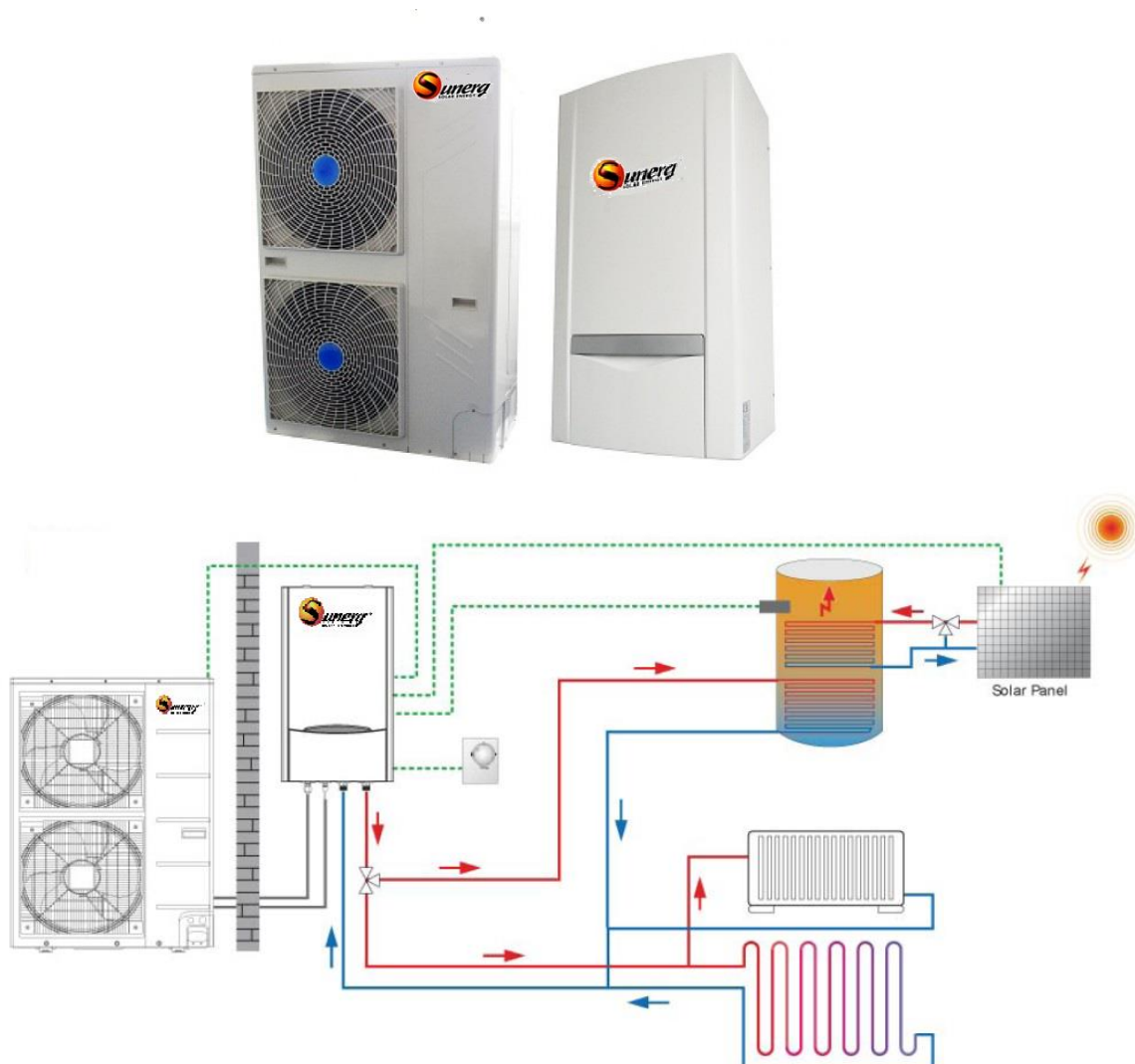
Refrigerante si espande per laminazione per poi ritornare all'evaporatore e di ricominciare il ciclo. Alla valvola di espansione compete inoltre anche una funzione di regolazione.

Una valvola a quattro vie, detta valvola di inversione ciclo, l'evaporatore ed il condensatore invertono la loro funzione: la pompa di calore inizia a funzionare come refrigeratore e viceversa.

Se tutte le componenti della pompa di calore sono assemblate in modo compatto in un involucro o in un telaio si parla di pompa di calore "compatta", se invece ci sono due componenti dislocate separatamente si parla di "split". Per una pompa di calore aria-acqua, la sezione evaporante è collocata all'esterno dell'edificio, mentre la sezione condensante è collocata all'interno.

Di seguito sono riportati alcuni dettagli delle pompe di calore analizzate alla Sunerg Solar e i relativi schemi d'impianto.

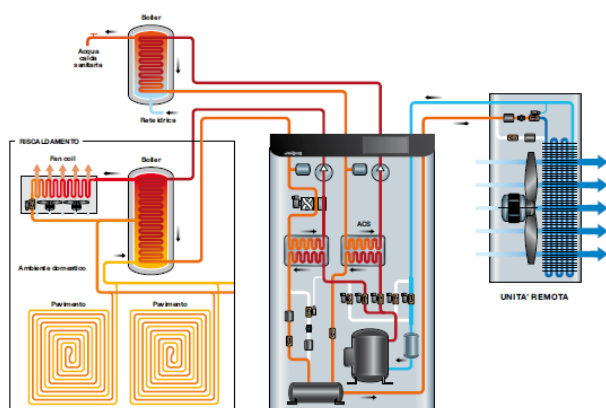
Sono state analizzate i seguenti modelli di pompe di calore splittate da abbinare a bollitori con singolo o doppio serpentino



Collegando la PdC ad un serpentino e il circuito solare ad un altro si riesce a sfruttare la stratificazione e l'acqua calda accumulata può essere usata anche per il riscaldamento degli ambienti a patto che l'edificio sia dotato di terminali a bassa temperatura.

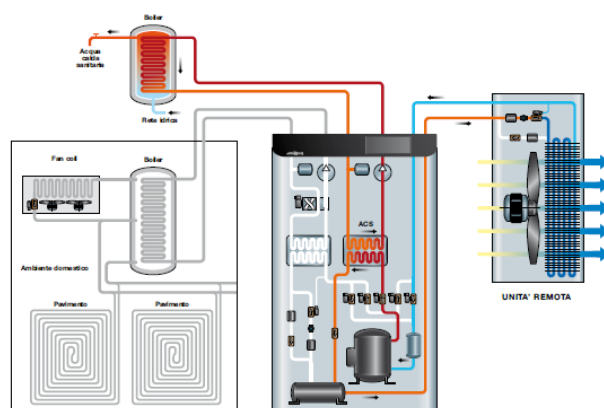
L'unità esterna è composta essenzialmente da un radiatore nel quale scorre il fluido frigorifero che scambia calore con l'aria esterna grazie a uno o più ventilatori. L'unità interna invece è composta essenzialmente da un compressore e uno scambiatore di calore che permette di trasferire energia termica dal fluido frigorifero all'acqua che andrà poi a servire le utenze.

Di seguito sono riportati degli esempi di schemi di funzionamento:



INVERNO

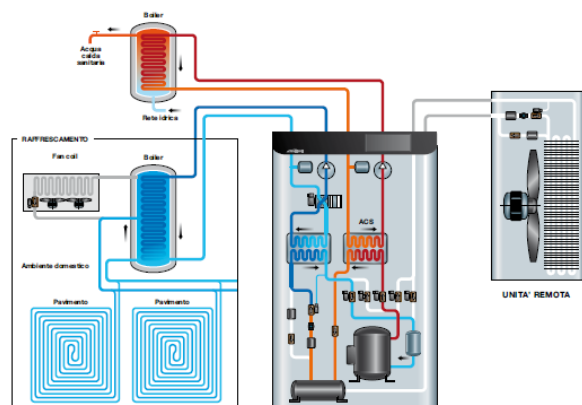
riscaldamento + sanitario



CLIMA MITE

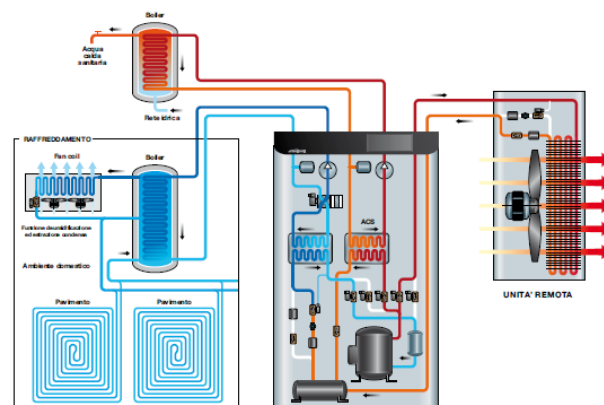
solo sanitario

Durante la stagione fredda il fluido frigorifero viene riscaldato per compressione fino alla sua condensazione e poi pompato agli scambiatori di calore dell'unità interna. In questo modo fornisce calore all'accumulo di ACS e all'accumulo che fornirà l'acqua ai pannelli radianti e ai fancoils. Dopo che il fluido ha ceduto gran parte della sua energia termica viene pompato verso un separatore e poi verso una valvola di laminazione grazie alla quale si espanderà e si raffredderà fino a una temperatura inferiore a quella dell'aria esterna. A questo punto il fluido attraversa il radiatore dell'unità esterna nel quale assorbirà calore dall'aria soffiata tra le alette dai ventilatori. In questo modo è possibile sottrarre calore dall'aria anche se c'è un clima rigido e quindi sfruttare l'energia termica contenuta nell'aria. Il fluido frigorifero evapora e viene inviato nuovamente al compressore dell'unità interna dove ricomincerà il ciclo termodinamico.



ESTATE

sanitario + raffrescamento



ESTATE

sanitario + raffreddamento con deumidificazione

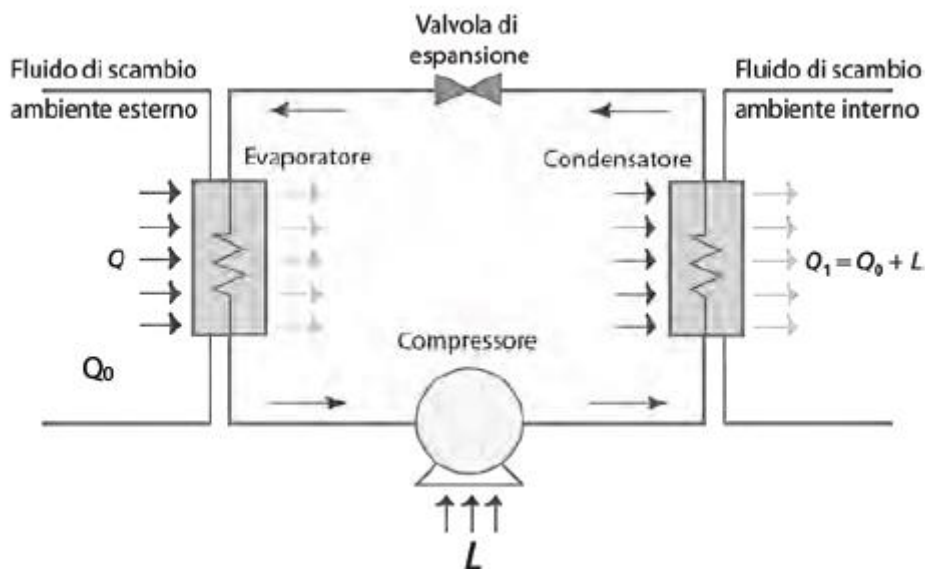
Durante la stagione calda il fluido frigorifero viene compresso allo stesso modo e viene pompato una parte verso lo scambiatore di calore per la produzione di ACS e un'altra parte verso il radiatore dell'unità esterna. Il fluido compresso raggiunge temperature più alte di quelle dell'aria esterna quindi grazie ai ventilatori si potrà dissipare il calore verso l'esterno dell'abitazione fino a che il

fluido non si condenserà. A questo punto il fluido passa attraverso il separatore e poi attraverso un'altra valvola di laminazione grazie alla quale si espanderà e si raffredderà a tal punto da poter refrigerare l'acqua dell'accumulo dei pannelli radianti e dei fancoil. Il fluido freddo passa attraverso lo scambiatore di calore a sinistra e asporterà calore all'acqua fino a riscaldarsi ed evaporare dopodichè verrà spinto nuovamente verso il compressore nel quale ricomincerà il ciclo.

Questa pompa di calore consente uno sfruttamento ottimale dell'energia durante tutto l'anno. In particolare il calore sottratto dagli ambienti durante la climatizzazione estiva viene in parte recuperato per la produzione di ACS.

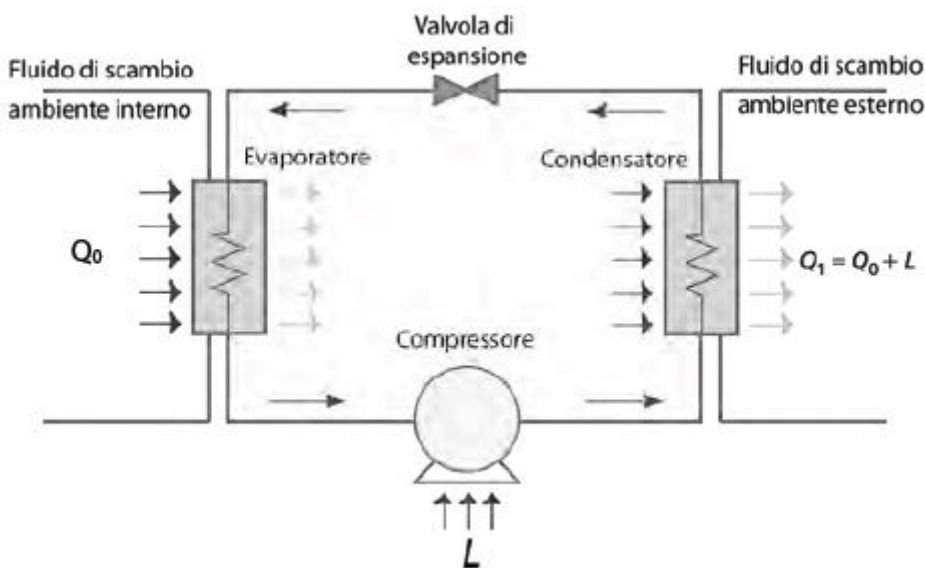
Insorgono problemi per climi particolarmente freddi in cui il coefficiente di prestazione si abbassa notevolmente soprattutto se nell'abitazione non ci sono pannelli radianti a pavimento.

L'efficienza di una pompa di calore per funzionamento in riscaldamento si misura tramite il COP (Coefficient of Performance) cioè il Coefficiente di prestazione, il quale è definito dal rapporto tra l'energia termica prodotta e l'energia elettrica assorbita, entrambe misurate in kWh, rilevate in laboratorio in condizioni normalizzate.



$$COP = \frac{Q_1 [kWh]}{L [kWh]}$$

Per quanto riguarda il funzionamento in raffrescamento, si parla di EER (Energy Efficiency Ratio) ovvero rapporto di efficienza energetica. Il parametro è definito dal rapporto tra l'energia frigorifera prodotta e l'energia elettrica assorbita, entrambe misurate in kWh, rilevate in laboratorio in condizioni normalizzate.



$$EER = \frac{Q_0 [kWh]}{L [kWh]}$$

Il rapporto tra l'ammontare di energia termica prodotta dalla pompa di calore e l'ammontare di energia elettrica assorbita nell'arco di un anno è definito come Coefficiente di Lavoro Annuo, il quale è un parametro specifico di funzionamento per ogni impianto.

Nelle pompe di calore che usano come sorgente esterna l'aria è necessaria una periodica fase di rimozione di brina e ghiaccio: lo sbrinamento avviene inviando calore all'evaporatore per mezzo di una momentanea inversione del ciclo.

Esercizio monovalente

Quando la pompa di calore copre il 100% del fabbisogno termico richiesto si parla di "esercizio monovalente", mentre se, al di sotto di una certa temperatura (punto di bivalenza) dell'ambiente esterno, la pompa di calore viene affiancata da un altro generatore funzionante in parallelo si parla di "esercizio bivalente".

Spesso si utilizza un accumulo tampone di acqua calda in cui stoccare l'energia termica in eccesso prodotta dalla pompa di calore.

Negli impianti idronici, cioè quelli che riscaldano o raffreddano l'ambiente interno, il fluido di scambio è semplice acqua che viene inviata ai terminali di impianto oppure viene impiegata come acqua calda sanitaria.

Il fluido di scambio con l'esterno dipende invece dalla fonte di energia esterna: se il calore viene scambiato con l'aria esterna il fluido di scambio è l'aria stessa; nel caso di pozzi o falde acquifere, il fluido di scambio è l'acqua stessa in caso di utilizzo diretto oppure acqua miscelata a glicole in un circuito intermedio.

Nel caso in cui l'energia sia scambiata con il terreno il fluido di scambio è acqua glicolata che fluisce in un circuito intermedio disposto orizzontalmente o verticalmente in profondità nel terreno.

I fluidi di scambio con gli ambienti, esterno ed interno, determinano anche la denominazione delle pompe di calore, che vengono identificate con due nomi: il primo indicativo del mezzo di scambio con l'esterno ed il secondo indicativo del mezzo di scambio con l'ambiente da climatizzare. Una pompa di calore aria-acqua è una pompa di calore che ha l'aria come mezzo di scambio esterno e l'acqua come mezzo di scambio con l'ambiente interno.

In funzione dei mezzi di scambio si ha una prima classificazione delle pompe di calore, distinte in aria-acqua, acqua-acqua, terra-acqua o aria-aria.

Dato che le pompe di calore utilizzano comunque energia elettrica prodotta a monte nella maggior parte dei casi da centrali elettriche tradizionali che bruciano fonti fossili, si ricorre al TEWI (Total Equivalent Warming Impact) cioè a un parametro che misura l'impatto ambientale di un sistema di climatizzazione in relazione al surriscaldamento globale. Il parametro tiene conto sia dell'apporto diretto del refrigerante, sia dell'apporto indiretto delle emissioni di CO₂ causate dalla produzione di energia termica/frigorifera.

Pannelli solari termici

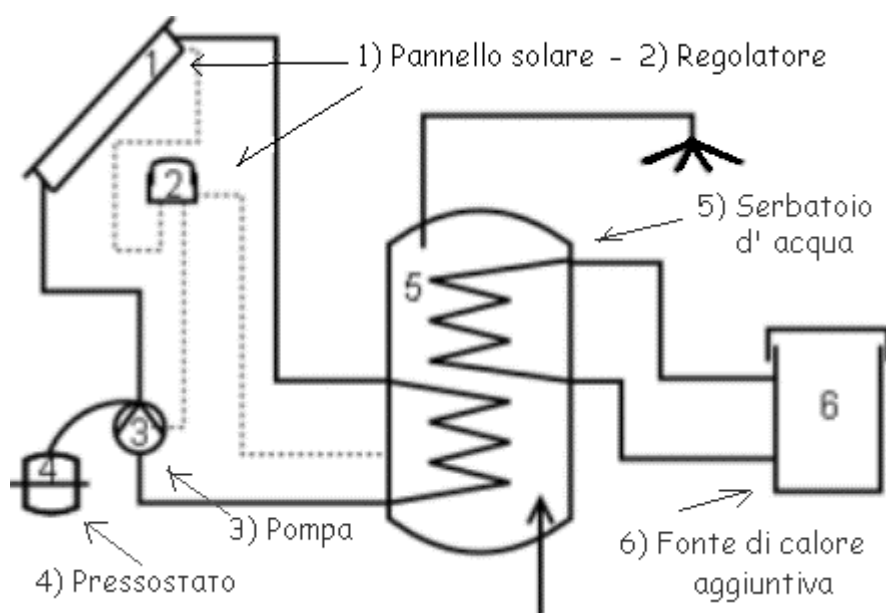
I pannelli solari termici

I componenti di un classico impianto solare termico sono i pannelli captanti, i serbatoi di accumulo, gli scambiatori di calore, i vasi d'espansione, le pompe di circolazione e le varie valvole necessarie al circuito idraulico. I piccoli impianti domestici spesso hanno un solo pannello e un solo serbatoio accumulo.

L'energia solare viene captata dal pannello, il quale la trasferisce ad un fluido termovettore che scorre in una serpentina interna al pannello riscaldandosi per poi fluire in un'altra serpentina interna al serbatoio. Questa serpentina costituisce lo scambiatore di calore che consente al fluido termovettore di cedere calore all'acqua contenuta nel serbatoio e che poi sarà pompata fino alle utenze. Il sistema può avere due tipi di circolazione: forzata o naturale.

Circolazione forzata.

E' il caso in cui una pompa spinge il fluido termovettore attraverso il circuito solare.



La centralina (o regolatore) fa riferimento a vari sensori di flusso e temperatura per regolare le accensioni e gli spegnimenti delle pompe. Nello schema sopra riportato è presente solo la pompa del circuito solare ma ci sono alcune soluzioni impiantistiche che prevedono anche una o più pompe nel circuito dell'acqua da destinare alle utenze.

La circolazione del fluido termovettore avviene con l'aiuto di pompe solo quando nei pannelli il fluido vettore si trova ad una temperatura più elevata rispetto a quella dell'acqua contenuta nei serbatoi di accumulo. Per regolare la circolazione ci si avvale di sensori elettrici che confrontano la temperatura del fluido vettore nel collettore con quella nel serbatoio di accumulo (termocoppia).

Uno dei vantaggi della circolazione forzata è dovuto al fatto che il serbatoio d'accumulo può essere ubicato ovunque anche se rimane consigliabile posizionarlo più vicino possibile ai pannelli e alla caldaia in modo da limitare le lunghezze dei tubi e quindi contenere le dispersioni termiche. Normalmente, il circuito idraulico collegato al pannello è chiuso e separato da quello dell'acqua che riscalda, posizionando una serpentina nel serbatoio come scambiatore di calore. Le serpentine possono anche essere due tre o quattro nel caso si voglia anche preriscaldare il fluido dell'impianto di riscaldamento tramite l'acqua del serbatoio o integrazione ad un termocamino o caldaia. Si può anche integrare una resistenza elettrica per riscaldare l'acqua in caso di insufficiente o assente (nelle ore notturne) irradiazione solare.

Circolazione naturale

Questa soluzione obbliga a mettere il serbatoio in un punto rialzato rispetto ai collettori solari in quanto, per far circolare il fluido termovettore nel sistema solare, si sfrutta la convezione. Il liquido vettore riscaldandosi nel pannello solare si dilata e galleggia rispetto a quello più freddo presente nello scambiatore del serbatoio di accumulo spostandosi, quindi, nello scambiatore posto più alto rispetto al pannello solare cedendo il suo calore all'acqua sanitaria del secondario. Questa tipologia è più semplice di quella a circolazione forzata. Non esiste consumo elettrico dovuto alla pompa di circolazione e alla centralina solare differenziale presente nel sistema a circolazione forzata. Il fluido vettore usato nel circuito primario è glicole propilenico atossico (comunemente conosciuto come antigelo) miscelato con acqua in una percentuale tale da garantire un'adeguata resistenza al gelo. Il serbatoio viene disposto ad un'altezza maggiore di quella dei pannelli solari a cui è collegato e per ragioni estetiche è del tipo orizzontale ad intercapedine. La circolazione naturale, rispetto a quella forzata, risulta essere più sensibile alle perdite di carico del circuito primario e vengono, quindi, realizzati sistemi kit compatti ove il serbatoio di accumulo è situato molto vicino al pannello solare. Le serpentine possono anche essere due, nel caso si voglia anche preriscaldare l'acqua del serbatoio con integrazione ad un termocamino o caldaia. Si può anche



integrare una resistenza elettrica per riscaldare l'acqua in caso di insufficiente o assente (nelle ore notturne) irradiazione solare. Un impianto a circolazione naturale con serbatoio esterno è adatto in regioni con temperature notturne non rigide. Attualmente viene fatta molta attenzione all'impatto visivo di tali sistemi colorando i serbatoi di color tegola oppure disponendoli direttamente a terra.

Sistemi a svuotamento

Simile a circolazione forzata, l'impianto si riempie solo quando è possibile o necessario. L'impianto funziona solo quando c'è sole e il serbatoio non ha raggiunto la temperatura desiderata, negli altri casi l'impianto rimane in condizione di riposo. La pompa svuota l'impianto se non c'è sole o se la temperatura dell'accumulo ha raggiunto la temperatura desiderata.

Tipologie

I pannelli solari termici si possono suddividere in alcune tipologie costruttive:

- pannelli solari termici piani
 - non vetrati o scoperti
 - vetrati
 - non selettivi
 - selettivi
 - ad aria
- pannelli solari termici sottovuoto
 - tubo a U
 - heat pipe
- pannelli solari termici con serbatoio integrato
- pannelli solari termici a concentrazione

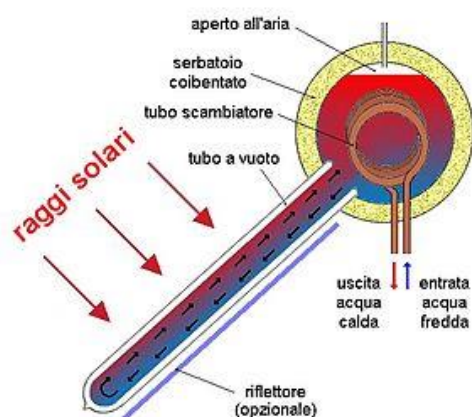
Il collettore piano è il sistema più utilizzato per ottenere le basse temperature, cioè comprese fra i 50 °C e i 90 °C, che si ottengono facilmente facendo riscaldare al Sole superfici piane.

Un collettore piano è costituito da:

- Una lastra trasparente di vetro (se si tratta di pannelli vetrati), che fa passare le radiazioni in arrivo e blocca quelle in uscita.
- Un assorbitore di rame, che è un buon conduttore di calore, in esso sono ricavati molti canali dove circola acqua o aria (nel caso del pannello piano vetrato ad aria). Il Sole scalda la piastra, che a sua volta scalda l'acqua o l'aria.
- Isolante termico, che impedisce la dispersione di calore.
- Cornice contenitiva di rifinitura esterna (opzionale).

I pannelli solari termici piani non vetrati o scoperti sono privi di vetro; hanno il vantaggio di essere poco costosi e di avere un ottimo rendimento in condizioni ottimali di irraggiamento quando la temperatura esterna è alta. A causa della mancanza dell'isolamento il loro rendimento diminuisce

rapidamente all'allontanarsi dalle condizioni ottimali. L'acqua passa direttamente all'interno dei tubi del pannello dove viene riscaldata dai raggi solari ed è pronta per essere usata. Il limite di questi pannelli è che, non essendo coibentati, funzionano con una temperatura ambiente di almeno 20 °C (al di sotto il bilancio tra energia accumulata ed energia dispersa è sfavorevole), e la temperatura massima dell'acqua non supera i 40 °C. Sono adatti perciò al solo uso stagionale ed esclusivamente per la produzione di acqua calda sanitaria, sono spesso impiegati nel riscaldamento delle piscine.



I pannelli solari termici piani vetrati ad acqua (a volte insieme a liquido antigelo) hanno una struttura attorno all'assorbitore che ne limita le dispersioni sia per convezione con l'aria che per irraggiamento dato che il vetro che ricopre la parte superiore dell'assorbitore è progettato per questa funzione. Hanno un rendimento leggermente inferiore ai non vetrati in condizioni ottimali ma in condizioni meno favorevoli hanno un rendimento decisamente più alto arrivando a produrre acqua calda per uso sanitario circa da marzo a ottobre; i pannelli solari termici vetrati selettivi consistono in un particolare trattamento dell'assorbitore che lo rende più ricettivo al calore, per questo sono più efficienti nei periodi meno favorevoli, mentre quelli non selettivi hanno semplicemente l'assorbitore colorato di nero in modo da attirare maggiormente la radiazione solare. I pannelli solari termici piani ad aria fanno circolare al loro interno aria anziché acqua. L'aria viene fatta circolare tra vetro e assorbitore o, in alcuni casi, in una intercapedine ricavata tra l'assorbitore ed il fondo di poliuretano isolante. Questi ultimi sono studiati in modo tale che l'aria permanga più tempo possibile nel pannello solare poiché scambia più difficilmente il calore rispetto all'acqua.

I pannelli solari termici sottovuoto sono in grado di garantire un maggiore apporto energetico anche in condizioni di basso irraggiamento o basse temperature esterne, esistono principalmente due tipi di collettori sottovuoto, detti anche collettori a tubi sottovuoto, quelli che contengono un tubo a U in cui circola direttamente il liquido che assorbe il calore e quelli Heat pipe che contengono un tubo in rame chiuso alle estremità contenente un liquido in bassa pressione che

evapora riscaldandosi e si condensa nella parte alta del tubo cedendo il calore all'acqua sovrastante.

Utilizzi

I pannelli solari possono essere utilizzati per fornire acqua calda e riscaldamento o per generare energia elettrica.

Nel primo caso il serbatoio provvede a immagazzinare l'acqua domestica che viene messa a contatto con il fluido tramite una serpentina. La serpentina consente al fluido di trasferire all'acqua l'energia immagazzinata senza contaminare l'acqua. Questa acqua può essere utilizzata come acqua calda nelle abitazioni o può essere utilizzata per integrare il riscaldamento a pavimento degli ambienti. I pannelli solari termici sono in grado di fornire acqua calda in buone quantità ma non possono sostituire completamente gli usuali metodi di riscaldamento per via dell'incostanza dell'energia solare.

Il secondo utilizzo prevede che lo scambiatore di calore sia riscaldato fino ad essere portato in ebollizione. Una volta che il liquido sia passato in fase gassosa lo si invia in una turbina termoelettrica che convertirà il movimento del gas in energia elettrica. Questo tipo di impianto è detto solare termodinamico e richiede ampi spazi per l'installazione dei pannelli solari e una presenza di sole costante. Esempi di queste centrali sono state installate in zone desertiche. Questi esperimenti non hanno avuto molto successo per via degli alti costi di realizzazione e di mantenimento rapportati alla bassa potenza elettrica generata e comunque esulano dall'obiettivo di questa relazione.

In Italia un impianto, in base all'ubicazione, alla taglia e all'utilizzo, si ammortizza nel giro di 5-10 anni e poiché la durata media di questi impianti è di 15-20 anni ne consegue che è un buon investimento a medio termine, escludendo eventuali sgravi fiscali o altre forme di agevolazione che rendano l'ammortamento più rapido.

L'utilizzo dei pannelli solari per il riscaldamento dell'acqua, andando a sostituire una caldaia o uno scaldabagno elettrico ha come diretta conseguenza il risparmio di idrocarburi e di energia elettrica. Inoltre si evita l'emissione di CO₂, di ossidi di zolfo, di azoto, e di pm₁₀, si riducono le infrastrutture per il trasporto dell'energia da grandi distanze, ci si avvicina all'indipendenza energetica (non dipendono dalla fornitura di carburante) e si evita l'immissione nell'ambiente di calore;

Questa tecnologia è accessibile alla maggior parte dei cittadini grazie ai bassi oneri di realizzazione e smaltimento.

Integrazione nell'impianto idraulico

L'integrazione di un pannello solare in un impianto idraulico per la produzione di acqua calda sanitaria avviene solitamente secondo lo schema delle pagine precedenti.

Il tubo di uscita del serbatoio è collegato a poca distanza ad una valvola termostatica che si occupa di miscelare l'acqua calda dell'accumulo con l'acqua fredda dell'impianto mantenendo in uscita acqua a temperatura costante (40-50 °C). Tale valvola è necessaria per tre motivi:

- Evitare il pericolo di ustioni degli utenti;
- Ridurre la dispersione di calore nelle tubature data l'elevata temperatura (per questo motivo la valvola non dovrebbe essere posta troppo distante dall'accumulo);
- Evitare il danneggiamento di una eventuale caldaia posta in serie al pannello solare.

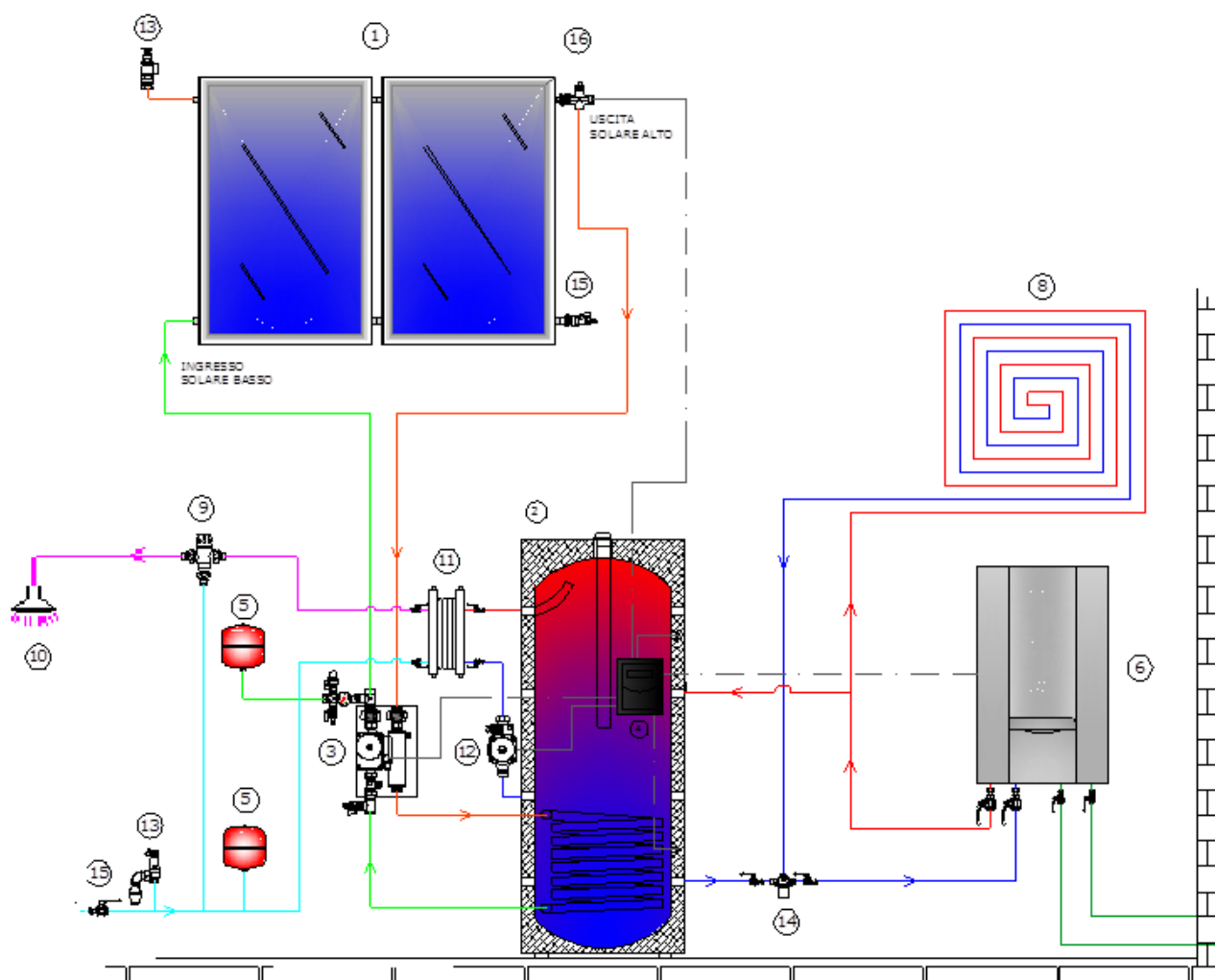
L'uscita della valvola termostatica è poi collegata ad una valvola deviatrice detta anche valvola a tre vie. Questa valvola ha un ingresso e due possibili uscite. A seconda della temperatura di ingresso si attiva l'una o l'altra uscita, ma mai contemporaneamente. Si adotta questa soluzione per far in modo che quando la temperatura è di circa 40 °C o superiore l'acqua venga direttamente immessa nel circuito dell'acqua calda sanitaria; in caso contrario viene inviata all'ingresso di una caldaia istantanea o ad accumulo, che la scalda fino alla temperatura desiderata prima di essere immessa nel circuito. La suddetta valvola deviatrice può essere azionata manualmente (valvola manuale), ad esempio nel periodo invernale o in lunghi periodi di scarso irraggiamento, oppure può essere controllata meccanicamente da un piccolo motore azionato da un sensore di temperatura, solitamente una termocoppia, posto all'interno dell'accumulo (valvola elettronica).

Da notare che la caldaia per la produzione di acqua calda, da mettere in serie al pannello, deve essere in grado di regolare la fiamma se di tipo istantaneo, (cioè senza accumulo). Nel caso di caldaia ad accumulo la regolazione della fiamma e la sua accensione sono pilotate da un sensore di temperatura presente nell'accumulo, per cui non si richiede nessuna particolare predisposizione.

La soluzione alternativa proposta da sunerg solar segue uno schema impiantistico più complesso riportato nella pagina seguente ma che porta alcuni vantaggi energetici, economici e strutturali.

L'acqua all'interno del boiler rimane isolata e ha una funzione esclusivamente di volano termico, nel senso che rimane sempre dentro il serbatoio e scambia calore con l'acqua da destinare all'utenza mediante uno scambiatore a piastre esterno. Questo riceve l'acqua fredda proveniente dall'acquedotto e la riscalda fino alla temperatura gradita dall'utente. In questo modo non vi è il rischio che le persone vengano in contatto con acqua che potrebbe essere rimasta stagnante per molto tempo e nella quale potrebbero essersi sviluppati batteri nocivi. Inoltre dato che il serbatoio è a contatto sempre con la stessa acqua, è meno soggetto a fenomeni di fouling e corrosione e questo permette l'utilizzo di materiali meno costosi per la sua realizzazione.

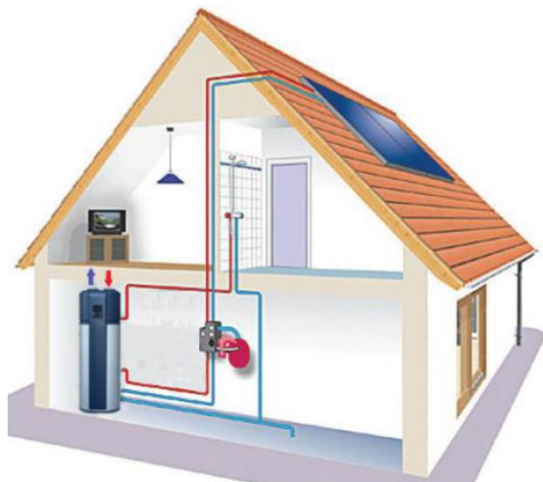
In questo modo si semplifica anche la manutenzione in quanto le incrostazioni calcaree si concentreranno nello scambiatore esterno.



- 1) Pannelli solari o collettori solari
- 2) Serbatoio d'accumulo o boiler solare
- 3) Gruppo di circolazione (comprende la pompa del circuito solare)
- 4) Centralina elettronica di controllo
- 5) Vaso d'espansione
- 6) Unità interna della pompa di calore split
- 7) Valvola deviatrice
- 8) Pannelli radianti (opzionali)
- 9) Valvola miscelatrice termostatica
- 10) Utenza di acqua calda sanitaria
- 11) Scambiatore a piastre esterno
- 12) Pompa di circolazione per lo scambiatore esterno
- 13) Valvola di sicurezza
- 14) Gruppo saracinesche per manutenzione
- 15) Saracinesca di collegamento all'acquedotto
- 16) Degasatore e sonda termica

Pompe di calore abbinate ai pannelli solari termici

Analizziamo adesso una versione semplificata del precedente schema impiantistico.



Con una piccola pompa di calore compatta (in questo caso modello Sunerg Calor Top 300) possiamo affiancare i pannelli solari termici per la produzione di ACS in periodi di insolazione insufficiente.



Tale pompa di Calore può essere installata in sostituzione del classico scaldabagno elettrico con un conseguente notevole risparmio sulla bolletta della corrente.

La Calor top consiste in un accumulo di acqua riscaldata da una pompa di calore compatta che si trova sulla parte superiore del contenitore. È possibile abbinarla ai pannelli solari termici per la produzione di ACS ma questa soluzione permette semplicemente di tenere spenta la pompa di calore quando c'è sole a sufficienza per coprire la richiesta energetica.

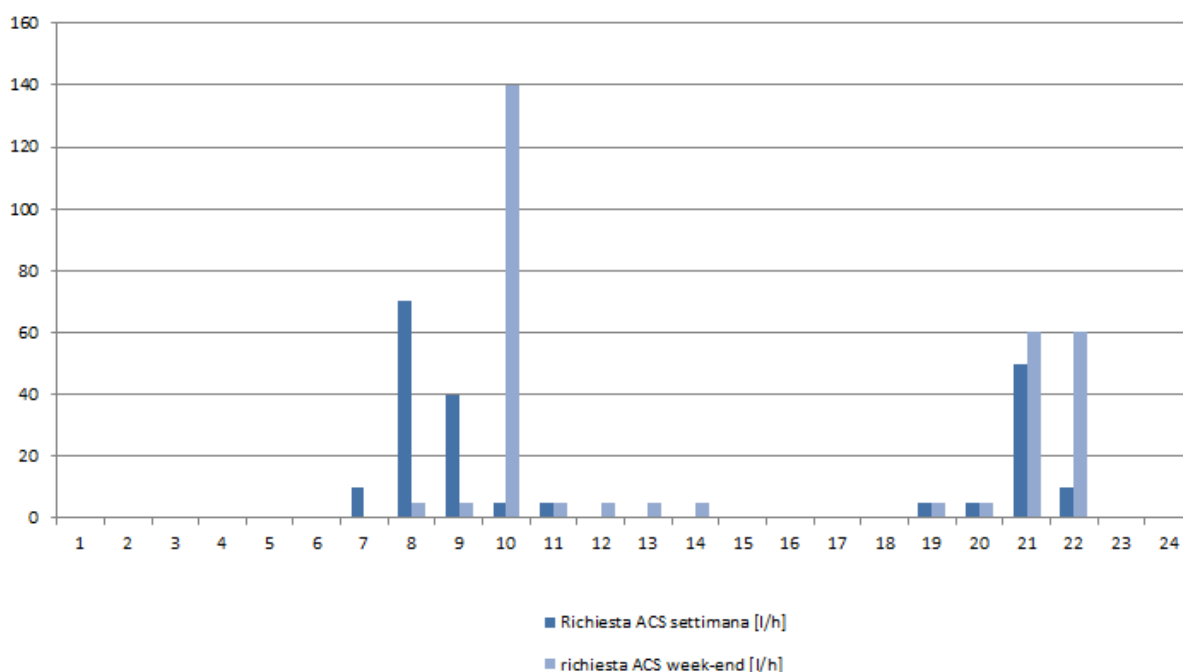
Siccome lo scambiatore di calore è un serpentino che si avvolge lungo tutta l'altezza del recipiente non si riesce a sfruttare bene la stratificazione dell'acqua calda, quindi si è deciso di analizzare un modello di PdC split.

Caso studio

Si vuole soddisfare il fabbisogno termico per produzione di ACS e riscaldamento degli ambienti di una villetta di 140 m² ad uso abitativo del centro Italia abitata da 4 persone.

Dalla normativa risultano necessari quasi 50 litri pro capite di acqua calda sanitaria al giorno quindi 200 l/g, ma per evitare disservizi in caso di picchi di richiesta imprevisti si sovrastima la richiesta fino a 300 l/g durante il fine settimana.

La curva della richiesta di ACS presa come riferimento segue una ciclicità giornaliera da lunedì a venerdì e cambia sabato e domenica per poi ripetersi settimanalmente. Di seguito è riportato l'istogramma che esprime la richiesta di litri di acqua calda sanitaria per ogni ora del giorno intesa come richiesta media plausibile.



Da lunedì a venerdì (colonne scure) si suppone che gli utenti facciano uso della doccia la mattina con un picco di 70 litri di ACS richiesti intorno alle ore 8 del mattino e un picco di 50 litri nelle ore serali.

Nel fine settimana invece si ipotizza un uso della vasca da bagno con un picco di richiesta di ACS di 140 litri e un altro picco di 60 litri verso sera per le docce.

Per calcolare la potenza istantanea che il sistema dovrà fornire alle utenze sono necessari i seguenti dati:

Portata di ACS= $m_{ACS} = 10 \text{ l/min} = 1,667 \text{ kg/s}$

Calore specifico dell'acqua= $c_{H_2O} = 4186 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Temperatura dell'acqua dell'acquedotto= $T_{in} = 15^\circ\text{C}$

Temperatura richiesta per l'ACS= $T_{out} = 45^\circ\text{C}$

Quindi la potenza è data dalla seguente equazione:

$$P = m_{ACS} * c_{H2O} * (T_{out} - T_{in}) \quad [W]$$

Dalla quale si ricava una potenza di 20,93kW

Per evitare di installare una pompa di calore di potenza eccessiva si preferisce ricorrere ad un accumulo di acqua che si riscalderà lungo l'arco della giornata grazie all'azione di pannelli solari termici e della PdC.

L'accumulo fungerà anche da serbatoio per l'acqua necessaria al riscaldamento dell'edificio durante la stagione invernale.

Le temperature dell'ambiente esterno e l'irraggiamento solare per ogni ora dell'anno sono state prese dalle normative riferendosi alla località Città di Castello (PG), Umbria.

La trasmittanza media dell'edificio (intesa come media ponderata tra la trasmittanza di muri e superfici vetrate) è un parametro impostabile e come prima approssimazione plausibile si è scelto $2,2 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Nella località scelta come ubicazione dell'edificio (Città di Castello in provincia di Perugia) le normative indicano una temperatura di progetto $T_p = -2,76\text{°C}$ e se consideriamo una temperatura di benessere per gli utenti $T_{int} = 20\text{°C}$, con la seguente formula si calcola il fabbisogno termico di picco dell'edificio:

$$P_{MAX} = U_{med} * S * (T_{int} - T_p)$$

Dai valori presi in considerazione ne risulta che la casa necessita di 5085W per mantenere le condizioni di benessere nei giorni più freddi dell'anno.

Da notare che S indica la superficie laterale della villetta supponendo che sia di base quadrata e con un interpiano di 2,7m.

La funzione che lega la temperatura dell'ambiente esterno al fabbisogno dell'edificio è la seguente

$$P = -0,245 * T_a + 4,406$$

ed è stata ottenuta in approssimazione come retta passante da due punti A e B



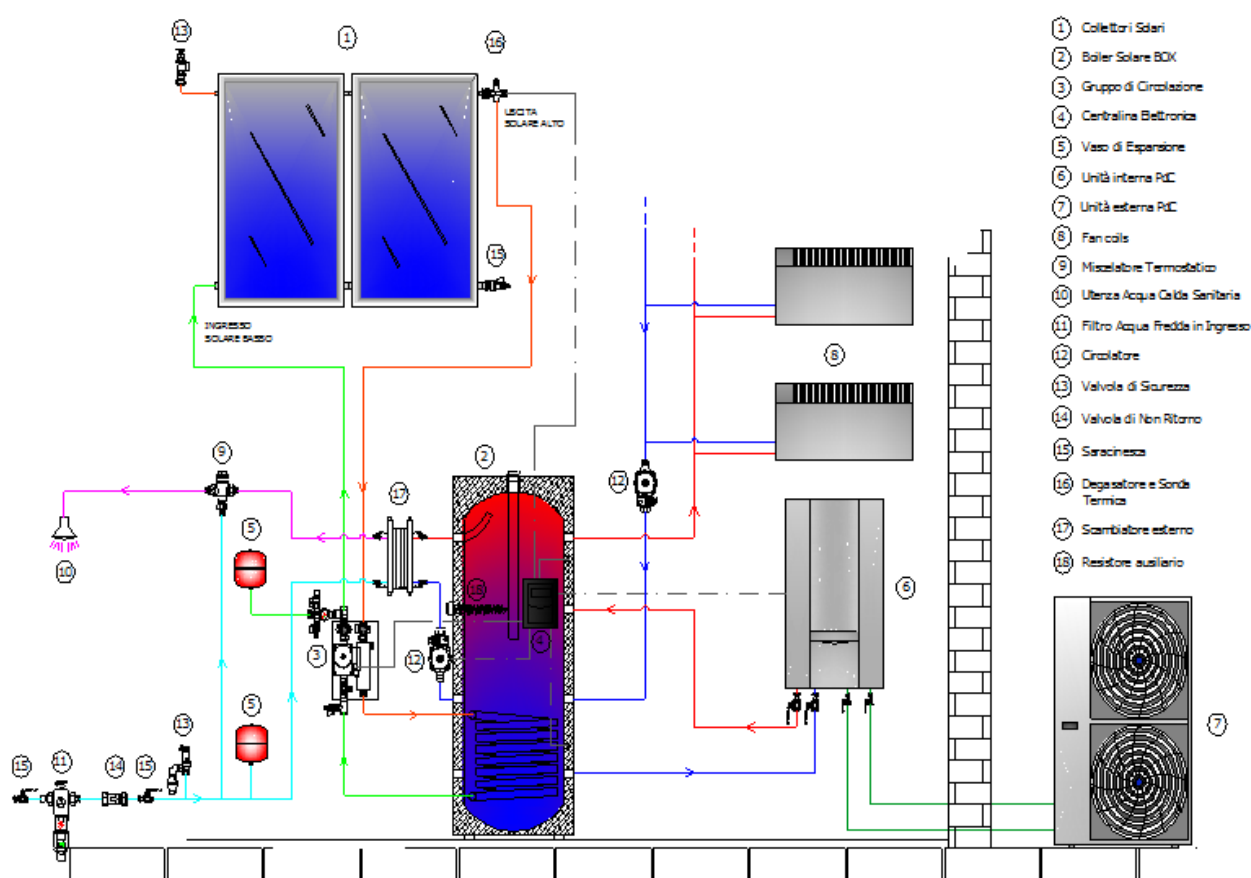
Nel punto A la temperatura ambiente :($T_a=T_p$) è quella di progetto e la potenza è quella massima richiesta ($P=P_{MAX}$), mentre nel punto B la temperatura è di 18 °C cioè la temperatura alla quale gli

apporti di calore interni e l'insolazione riescono a portare la temperatura interna al valore di benessere e quindi non c'è bisogno di mettere in funzione l'impianto termoidraulico ($P=0$).

Questa funzione permette di calcolare per ogni ora dell'anno il fabbisogno termico necessario agli utenti per mantenere l'edificio a 20°C.

Una volta noti i dati dei fabbisogni orari si dimensionano i componenti dell'impianto termoidraulico che sarà composto da un impianto solare termico con componenti della Sunerg Solar Srl (Città di Castello, Italy) e da una pompa di calore split della Midea Heating & Ventilating Equipment Co. Ltd (Beijiao, PRC).

I componenti saranno installati secondo il seguente schema:



Il cuore dell'impianto è l'accumulatore Sunerg modello BOX500 nel quale una massa d'acqua tecnica fungerà da volano termico. I pannelli solari termici Sunerg modello H1T forniscono oltre a 3000W ciascuno di potenza termica nei periodi di massima insolazione. L'energia solare captata viene convogliata nell'accumulo tramite un fluido termovettore costituito da una miscela di acqua (70%) e glicole (30%) che scorre nel "circuito solare" spinto da un circolatore che lo farà fluire attraverso la serpentina interna al serbatoio.

Quando l'irraggiamento è insufficiente a soddisfare la richiesta di energia termica interviene una pompa di calore, la quale preleva acqua fredda dalla parte inferiore del boiler, la riscalda e la reimmette nella parte superiore.

Quando le temperature dell'ambiente esterno sono troppo rigide la PdC non riesce a integrare efficacemente i pannelli solari e in alcune occasioni nell'arco dell'anno entra in funzione un resistore ausiliario per fornire ulteriore energia termica al sistema.

La centralina dell'impianto riceve informazioni dai sensori di temperatura e flusso collocati nei punti strategici dell'impianto e si suppone di programmarla con una logica sfruttata al massimo l'insolazione sui pannelli.

Quando l'impianto viene messo in funzione la temperatura dell'acqua nell'accumulo è pari a quella ambientale quindi serve energia sia dai pannelli, sia dalla pompa di calore sia dal resistore.

La centralina fa partire la pompa di calore quando la temperatura dell'accumulo scende sotto i 45°C e la fa spegnere quando la temperatura raggiunge i 55°C. Nel caso in cui la richiesta di energia termica faccia scendere la temperatura sotto i 42°C, la centralina fa entrare in funzione il resistore.

Nell'arco dell'anno capiteranno situazioni in cui la temperatura dell'acqua alle utenze sarà leggermente inferiore a 42°C e verranno conteggiate come ore di disservizio in cui si dovrà attingere energia dalla rete elettrica.

Per evitare picchi di richiesta troppo elevati un flussometro posizionato sulla mandata dell'ACS segnalerà alla centralina quando c'è richiesta e in quelle ore si interromperà il flusso di acqua calda ai terminali di riscaldamento.

Bilancio energetico del serbatoio

L'acqua accumulata riceve e cede energia termica continuamente e per dimensionare correttamente i componenti dell'impianto è necessario conoscere i valori della temperatura dell'acqua tecnica al variare del tempo. Per simulare il funzionamento dell'impianto con excel occorre impostare la seguente equazione di bilancio:

$$Energia\ accumulata = Energia\ entrante - Energia\ uscente$$

L'energia accumulata E_a è quella immagazzinata dalla massa d'acqua contenuta nel serbatoio

$$E_a = m_{acc} * c_{H2O} * \frac{dT}{dt}$$

La quale se consideriamo intervalli temporali di un'ora diventa

$$E_a = \rho_{H2O} * V_{acc} * c_{H2O} * (T_{fin} - T_{in})$$

Dove

m_{acc} = massa dell'acqua contenuta nell'accumulo

dT = variazione infinitesima della temperatura

dt = intervallo di tempo infinitesimo

ρ_{H2O} = densità dell'acqua

V_{acc} = Volume dell'accumulo

c_{H2O} = Calore specifico dell'acqua

T_{fin} = Temperatura dell'acqua alla fine dell'ora

T_{in} = Temperatura dell'acqua all'inizio dell'ora
 L'energia entrante E_E è data da tre componenti:

- L'energia dal resistore E_{Res}
- L'energia dalla pompa di calore E_{PdC}
- L'energia dai pannelli solari E_s

L'energia uscente E_U è data da altri tre componenti:

- L'energia richiesta per riscaldamento E_{ris}
- L'energia richiesta per ACS E_{ACS}
- L'energia dispersa attraverso la parete del serbatoio E_{dis}

A questo punto è chiaro che bisogna calcolare per ogni ora del giorno le varie componenti del bilancio in modo da avere come incognita solo la T_{fin} dell'acqua accumulata.

La E_{Res} si calcola semplicemente come rapporto tra la potenza del resistore e i secondi in un ora quindi se si utilizza una serpentina da 3kW si ottiene per ogni ora di funzionamento 10800kJ.

Per il calcolo di E_{PdC} si ricorre all'implementazione su excel delle normative riguardanti le pompe di calore, mentre per il calcolo di E_s si è deciso di implementare il metodo proposto da Duffie e Backman come sarà illustrato nei prossimi capitoli.

Si anticipa per adesso il calcolo delle componenti di E_U prendendo come riferimento le lezioni di termodinamica dell'edificio e di energetica.

L'energia richiesta per riscaldamento è una funzione decrescente della temperatura esterna: dalle ipotesi di partenza sull'involucro della casa e dalle condizioni atmosferiche della località presa in considerazione si calcola che l'edificio disperde 36,3W/m² e che alla temperatura minima di progetto necessita di un apporto termico di poco superiore a 5kW. Utilizzando la formula descritta in precedenza si calcola la potenza richiesta e moltiplicando per 3600 si ottiene l'energia sottratta ogni ora dall'accumulo.

$$E_{ris} = (-0,245 * T_a + 4,406) * 3600 \text{ [J]}$$

La richiesta di ACS determina la componente E_{ACS} sottratta dall'accumulo:

$$E_{ACS} = \frac{m_{ACS} * c_{H2O} * (T_{out} - T_{in})}{\varepsilon} \text{ [J]}$$

Dove

m_{ACS} = portata d'acqua calda sanitaria richiesta in un ora [kg/s]

c_{H2O} = calore specifico dell'acqua

T_{out} = temperatura gradita dell'ACS (solitamente 45°C)

T_{in} = temperatura dell'acqua proveniente dall'acquedotto (solitamente 15°C)

ε = efficienza dello scambiatore di calore a piastre

Si trascurano le dispersioni di energia lungo i tubi e si calcolano solo quelle che si verificano sulla parete del serbatoio, le quali dipendono dalla differenza di temperatura tra l'acqua interna e l'aria del locale tecnico che accoglierà i componenti:

$$E_{dis} = A_{acc} * U_{acc} * (T_{acc} - T_e) [J]$$

Dove il primo fattore è la superficie esterna dell'accumulo calcolata sulla geometria di un cilindro, le temperature sono quelle dell'acqua accumulata e dell'aria esterna del locale tecnico e il secondo fattore rappresenta il coefficiente globale di scambio del serbatoio calcolato con le formule del recipiente a sezione circolare multistrato:

$$U_{acc} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{r_{acc\ int}}{k_{par}} + \log\left(\frac{r_{acc\ par}}{r_{acc\ int}}\right) + \log\left(\frac{r_{acc\ int}}{r_{acc\ par}}\right) + \frac{r_{acc\ int}}{r_{acc\ est}} + \frac{1}{h_{est}}} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

Di seguito si riportano i dati di targa e altre caratteristiche calcolate del boiler Sunerg BOX500.

Volume accumulo=	Vacc	0,500	m3
Densità dell'acqua=	rho	1000,000	kg/m3
calore specifico H2O =	ch2O	4,186	kJ/kg*K
Altezza esterna Accumulo=	haccest	1,680	m
Altezza interna Accumulo=	haccint	1,420	m
Diametro accumlo est=	daccest	0,760	m
Raggio accumulo esterno=	raccest	0,380	m
Diametro parete accumlo=	daccpar	0,650	m
Raggio parete accumlo=	raccpar	0,325	m
Diametro accumlo int=	daccint	0,630	m
Raggio accumlo int=	raccint	0,315	m
Spessore isolante=	siso	0,055	m
Spessore parete acciaio=	spar	0,010	m
Conducibilità isolante=	kiso	0,027	W/mK
Conducibilità parete=	kpar	40,000	W/mK
Coef scamb. Conv. Int=	hint	400,000	W/m2K
Coef scamb. Conv. est=	hest	8,000	W/m2K
superficie laterale interna=	Sint	2,809	m2
superficie laterale esterna=	Sest	4,009	m2
Resistenza termica accumulo=	Rtacc	0,509	K/W
Coef glob scam accumulo=	Uacc	0,50294	W/m2K
Superficie est accumulo=	Aacc	4,298	m2
Temp. accumulo=	Tacc	varia	°C
Prezzo di listino=	€	1500,000	€

Adesso sono note tutte le componenti dell'energia uscente dal serbatoio.

Implementazione delle normative di riferimento

Per eseguire i calcoli dei flussi termici si è fatto riferimento, oltre che ai testi riportati nella bibliografia, ad alcune normative:

UNI/TS 11300-2 2008

UNI10349 1994

UNI/TR 11328-1 2009

UNI/TS 11300-4 2012

UNI EN 12831 2006

Nella normativa UNI/TS 11300-2 2008 è indicato il fabbisogno volumetrico giornaliero di acqua calda sanitaria:

$$V_W = a * N_U \text{ [l/G]}$$

Dove

a = fabbisogno giornaliero specifico [l/G*unità di riferimento]

N_U = Parametro che dipende dalla destinazione d'uso dell'edificio [unità di riferimento]

Per l'uso abitativo N_U corrisponde alla superficie utile dell'edificio S_U misurata in m^2 .

Il parametro “ a ” si ricava dalla seguente tabella

Fabbisogni	Calcolo in base al valore di S_U per unità immobiliare [m^2]			Valore medio riferito a $S_U = 80 m^2$
	≤ 50	51- 200	> 200	
a	1,8	$4,514 \times S_U^{-0,2356}$	1,3	1,6
Fabbisogno equivalente di energia termica utile [Wh/G m^2]	52,3	$131,22 \times S_U^{-0,2356}$	37,7	46,7
Fabbisogno equivalente di energia termica utile [kWh/ m^2 anno]	19,09	$47,9 \times S_U^{-0,2356}$	13,8	17,05

Per un edificio di superficie compresa tra 51 e 200 m^2 si calcola quindi il fabbisogno di ACS nel seguente modo:

$$V_W = 4,541 * S_U^{(-0,2356)} * S_U$$

Quindi per 140 m^2 si ottiene 197,27 l/G ovvero circa 50 l/G al giorno per ogni persona

Seguendo la normativa UNI10349 1994 si è ricavato una delle prime formule utilizzate per calcolare la corretta temperatura dell'ambiente esterno T_a in località Città di Castello:

$$T_a = T_{ar} - (z - z_r) * \delta$$

Dove

T_{ar} è la temperatura nella località di riferimento

Z è l'altitudine s.l.m. della località considerata

Z_r è l'altitudine s.l.m. della località di riferimento

δ è il gradiente verticale di temperatura, i cui valori sono indicati nella tabella seguente

Zona geografica	δ [°C/m]
Italia settentrionale transpadana	1/178
Italia settentrionale cispadana	1/200
Italia centrale e meridionale	1/147
Sicilia	1/174
Sardegna	1/192

Infatti nelle tabelle delle normative sono presenti le temperature esterne in località Perugia (capoluogo più vicino in linea d'aria a Città di Castello) e la suddetta formula serve per tener di conto la differenza di altitudine tra le due località.

Si è fatto riferimento alla terza riga della tabella.

Dalla normativa 12831 del 2006 si è ricavata la temperatura di progetto per Perugia cioè -2°C , ma è necessario applicare la correzione che tenga conto della differenza di altitudine di Città di Castello, quindi applicando la suddetta formula per il calcolo di T_a si ottiene

$$T_a = \frac{-2 - (493 - 290)}{147} = -2,76^{\circ}\text{C}$$

La normativa UNI/TS 11300-4 2012 classifica le tipologie di pompe di calore e fornisce una importante metodologia per il calcolo dell'energia erogata al sistema dalla macchina, questa normativa impone di calcolare la potenza termica generata dalle pompe di calore considerando anche il coefficiente di prestazione di secondo principio COP_{2°} il quale non è fornito esplicitamente dal costruttore.

Dalle schede tecniche dei modelli utilizzati si sono ricavate, per ogni taglia della pompa di calore, le prestazioni alle varie temperatura di prova.

MCAC-RTSM-2012-01

M-thermal Technical Manual

6. Performance data

6.1 Heating performance data of 6/8kw model

LWE[°C]	30			35			40			45			50			55		
Tamb [°C]	HC[W]	PI[W]	COP	HC[W]	PI[W]	COP	HC[W]	PI[W]	COP	HC[W]	PI[W]	COP	HC[W]	PI[W]	COP	HC[W]	PI[W]	COP
-15	5186	2322	2.23	5178	2502	2.07	4731	2660	1.78	3626	2677	1.35	/	/	/	/	/	/
-7	6643	2457	2.7	6440	2621	2.46	6262	2789	2.25	5263	2864	1.84	/	/	/	/	/	/
0	8055	2401	3.35	7785	2576	3.02	7434	2777	2.68	6756	2849	2.37	5276	2655	1.99	/	/	/
2/1	6512	2280	2.85	7020	2527	2.77	6598	2709	2.43	6222	2578	2.41	5439	2658	2.05	/	/	/
7/6	10155	2484	4.09	9569	2650	3.61	9450	2901	3.26	8785	2991	2.94	6784	2761	2.46	1959	1576	1.24
10/8	10482	2526	4.15	10823	2715	3.99	10362	2898	3.58	9236	2975	3.1	7474	2749	2.72	1787	1543	1.16
15/12	10324	2165	4.77	9949	2332	4.27	10042	2536	3.96	9922	2755	3.6	8769	2819	3.11	3418	1572	2.18
20/15	10165	2042	4.98	10417	2216	4.7	10041	2371	4.23	7960	2082	3.82	5947	1808	3.29	3954	1572	2.51
25/17	10867	2014	5.4	11291	2196	5.14	11422	2396	4.77	10514	2408	4.37	7911	1978	4	4651	1555	3.18
30/22	12007	2008	5.98	12522	2200	5.69	12659	2410	5.25	12533	2627	4.77	7648	1826	4.21	4224	1498	2.83
35/24	12619	1998	6.32	12848	2210	5.81	13452	2299	5.85	13429	2609	5.15	7204	1720	4.19	4062	1508	2.7

Da queste tabelle sono state ricavate tre matrici 11X6 relative alle prestazioni delle macchine alle varie condizioni di funzionamento:

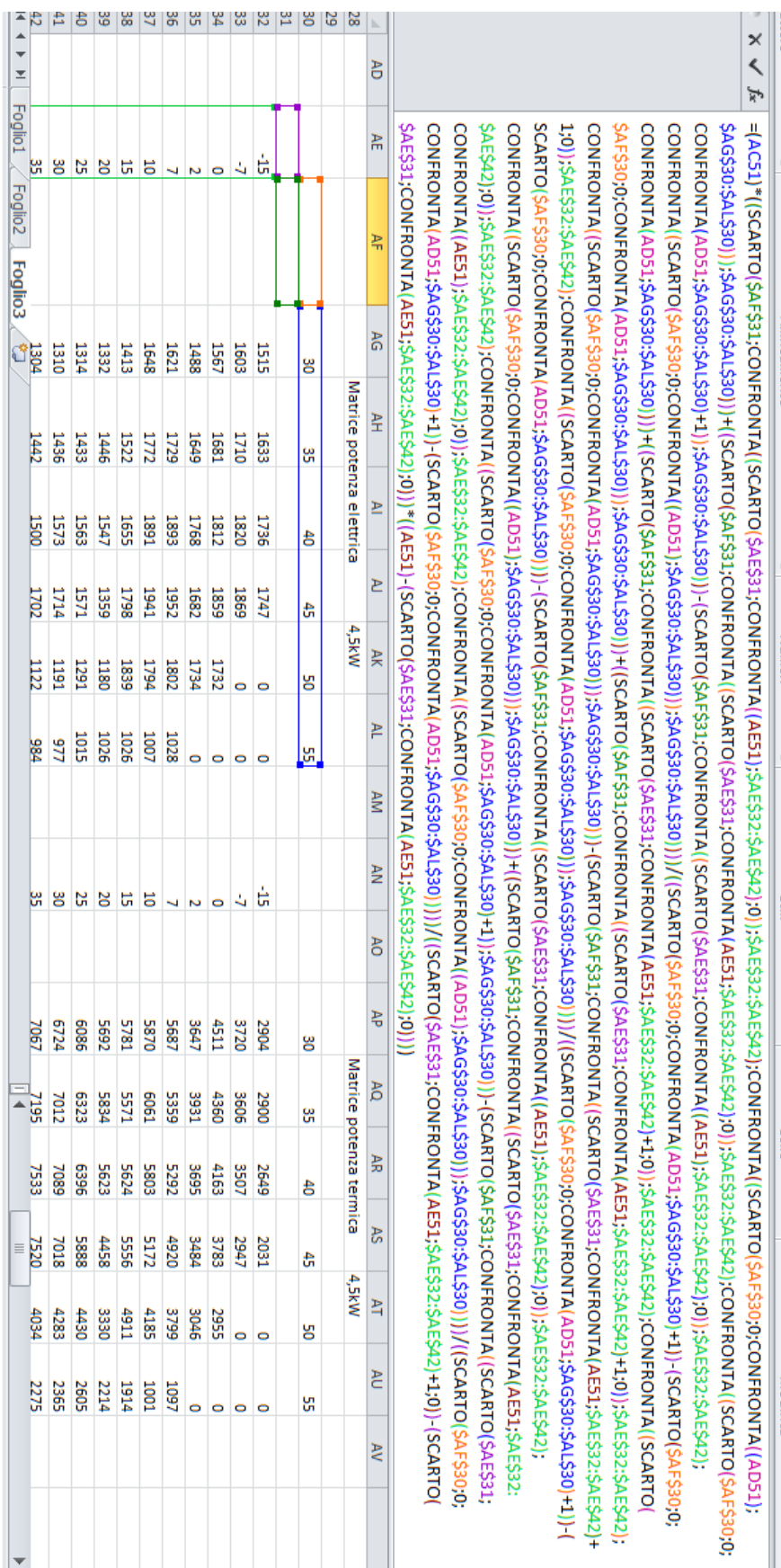
- Una matrice dei valori della potenza elettrica assorbita dalla PdC
- Una matrice dei valori della potenza termica erogata dalla PdC
- Una matrice dei valori del COP della PdC

Il costruttore ha eseguito i test delle pompe di calore per varie temperature dell'acqua del serbatoio d'accumulo e varie temperature dell'aria dell'ambiente esterno, ma si tratta comunque di dati specifici che richiedono interpolazioni per ottenere risultati riferiti alle effettive temperature di funzionamento della pompa di Calore.

Se ad esempio si vuole calcolare la potenza elettrica assorbita dalla PdC quando la temperatura dell'accumulo (T_{acc}) è 44,09°C e la temperatura dell'aria esterna (T_a) è 12,48°C si devono fare i seguenti passaggi:

- 1) Interpolare il valore della potenza elettrica assorbita se la T_{acc}=40 e T_a=10, col valore di quella assorbita con T_{acc}=40 e T_a=15 per ottenere il valore della potenza (P1) assorbita quando T_a=12,48°C se l'acqua nel serbatoio fosse a 40°C
- 2) Interpolare il valore della potenza elettrica assorbita se la T_{acc}=45 e T_a=10, col valore di quella assorbita con T_{acc}=45 e T_a=15 per ottenere il valore della potenza (P2) assorbita quando T_a=12,48°C se l'acqua nel serbatoio fosse a 45°C
- 3) Interpolare i valori di P1 e P2 per ottenere il valore della potenza (P3) assorbita quando T_a=12,48°C e l'acqua nel serbatoio ha una T_{acc}= 44,09°C

Questi passaggi richiedono una complessa funzione di funzioni su excel che permette di ottenere i dati delle prestazioni delle pompe di calore funzionanti a temperature intermedie a quelle testate dal costruttore. Ad ogni ora dell'anno corrispondono temperature differenti di aria e acqua.



Per seguire il procedimento dettato dalla normativa si è dovuto ricavare una quarta matrice ausiliaria con i valori del coefficiente di prestazione di secondo principio $COP2^\circ$, il quale è definito come rapporto tra il coefficiente di prestazione di primo principio (COP) fratto il Massimo coefficiente di prestazione teorico (COP_{carnot}) ottenibile da una macchina di Carnot (macchina ideale che lavora con un fluido ideale)

$$COP2^\circ = \frac{COP}{COP_{carnot}}$$

Il COP massimo teorico si calcola con la seguente formula:

$$COP_{carnot} = \frac{T_{acc} + 273,15}{T_{acc} - T_{amb}}$$

con

T_{acc} = Temperatura dell'acqua nel serbatoio d'accumulo

T_{amb} = Temperatura dell'aria dell'ambiente esterno

Con excel si è suddiviso il funzionamento del sistema termoidraulico in step da un'ora ciascuno per l'arco di un anno il che significa che per ogni ora dell'anno si è calcolata l'energia fornita dalla pompa di calore in determinate condizioni di funzionamento.

Il Comitato Tecnico Italiano Energia e Ambiente fornisce le temperature medie dell'aria ambiente per ogni ora dell'anno, mentre le temperature dell'acqua nel serbatoio d'accumulo variano in base al tipo di utilizzo dell'impianto.

Con excel si sono interpolati i valori delle matrici suddette ottenendo per ogni ora dell'anno l'energia elettrica assorbita dalla PdC e il relativo COP, quindi si è calcolato per ogni ora l'energia termica fornita al sistema seguendo le indicazioni della normativa:

Si suppone di avere una temperatura ambiente che coincida con una delle temperature di riferimento utilizzate dal costruttore per fornire i dati delle schede tecniche e si suppone che l'acqua nel serbatoio abbia una temperatura intermedia $T_{acc\ x}$ tra altre due temperature prese come riferimento nelle matrici di dati (T_{acc1} e T_{acc2}). A parità di temperatura ambiente si calcolano i relativi $COP2^\circ$ ($COP2^\circ_1$ e $COP2^\circ_2$) per poi interpolarne i valori e ottenere il $COP2^\circ_x$:

$$COP2^\circ_1 = \frac{COP_1}{COP_{carnot1}}$$

$$COP2^\circ_2 = \frac{COP_2}{COP_{carnot2}}$$

$$COP2^\circ_x = COP2^\circ_1 + (COP2^\circ_2 - COP2^\circ_1) * \frac{T_{acc\ x} - T_{acc\ 1}}{T_{acc\ 2} - T_{acc\ 1}}$$

A questo punto si può risalire al COP di primo principio e quindi alla potenza termica erogata dalla PdC moltiplicandolo per la potenza elettrica ottenuta da altre interpolazioni sulla matrice delle potenze elettriche.

$$COP_x = COP_{2^\circ} * COP_{carnotx}$$

$$P_{thx} = COP_x * P_{elx}$$

Nella maggior parte dei casi la temperatura ambiente non corrisponde a nessuna delle temperature prese come riferimento dal costruttore quindi per ogni ora dell'anno è necessario fare una doppia interpolazione sulla matrice dei COP_{2°} e una doppia interpolazione sulla matrice delle potenze elettriche.

Una volta ottenuti con Excel i valori delle potenze termiche erogate ogni ora dalla pompa di calore si calcola l'energia dalla pompa di calore con una semplice moltiplicazione

$$E_{PdC} = P_{th} * 3,6 \text{ [kJ]}$$

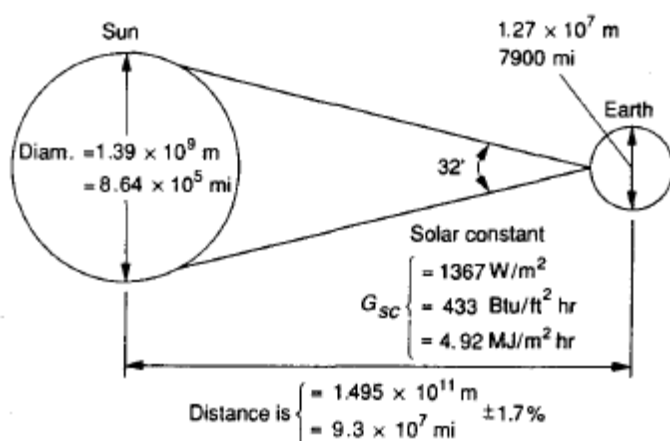
A questo punto si dispone dei valori di energia termica prelevata dall'aria esterna e fornita al sistema termoidraulico, ma è solo uno dei componenti del bilancio energetico. Si prosegue con il calcolo dell'energia ottenibile dall'irraggiamento sui pannelli solari seguendo il metodo proposto da Duffie e Beckman.

Calcolo dell'energia ottenuta dai pannelli solari termici

Come dati di partenza si utilizzano i valori della radiazione solare incidente al suolo forniti dal Comitato Termotecnico Italiano Energia e Ambiente. Questi valori esprimono per ogni ora dell'anno la potenza per unità di superficie che giunge nelle varie zone d'Italia e in particolare si prende come riferimento la provincia di Perugia.

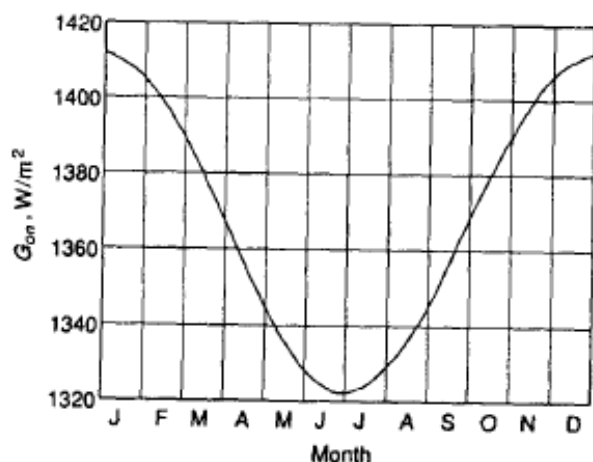
E' utile tuttavia riportare suddetta potenza a quella massima che teoricamente potrebbe giungere al suolo. A questo scopo riportiamo la definizione di "costante solare" indicata con G_s .

La costante solare è un valore preso convenzionalmente uguale a 1367 W/m^2 il quale indica l'energia proveniente dal sole, nell'unità di tempo, che incide su un'area unitaria esterna all'atmosfera terrestre e perpendicolare alla direzione di propagazione della radiazione solare.



Possiamo adesso calcolare la radiazione solare extraterrestre G_0 , con una formula che tiene conto delle periodiche variazioni della distanza tra sole e terra ed è funzione del giorno dell'anno n :

$$G_0 = G_{sc} * \left(1 + 0,033 * \cos \left(\frac{360 * n}{365} \right) \right)$$



Introduciamo il concetto di “tempo solare”, il quale viene usato nelle formule per il calcolo degli angoli solari e non coincide con l’ora locale indicata dagli orologi. Il tempo solare tiene conto del fatto che una località ha una longitudine leggermente diversa dal meridiano di riferimento dell’ora locale quindi consente un calcolo più preciso. In particolare Città di Castello ha longitudine $-12,24^\circ$ mentre il meridiano di riferimento dell’ora locale in Italia ha longitudine $-15,00^\circ$. I gradi verso Ovest si considerano negativi.

Considerando che per percorrere 1° di longitudine il sole impiega 4 minuti, per convertire il tempo standard in tempo solare si ricorre alla seguente equazione:

$$t_{st} - t_{sol} = 4 * (L_{st} - L_{loc}) + E$$

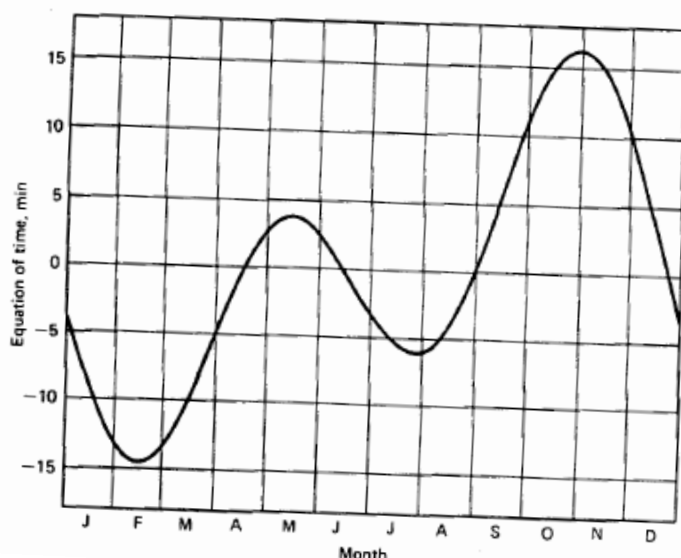
Nella quale L_{st} è la longitudine standard del meridiano di riferimento, L_{loc} è la longitudine dell’osservatore ed E è la cosiddetta “equazione del tempo” espressa in minuti e funzione del giorno dell’anno. E’ stata ricavata da Spencer nel 1971:

$$E = 229,2 * (0,000075 + 0,001868 * \cos(B) - 0,032077 * \sin(B) - 0,014615 * \cos(2 * B) - 0,04089 * \sin(2 * B))$$

Dove

$$B = (n - 1) * \frac{360}{365}$$

ed n è un valore compreso tra 1 e 365 che indica il giorno dell’anno. L’andamento della equazione del tempo è riportato nel grafico seguente



Si rivela necessario far attenzione all'ora legale e al fatto che il risultato è espresso in minuti.

Dato il giorno dell'anno si possono calcolare i minuti da aggiungere all'ora locale ma bisogna convertire i minuti in ore ottenendo numeri decimali da sommare all'ora corrente. Il valore del tempo solare t_{sol} risulterà espresso quindi in decimali (ad esempio le 07:15 saranno espresse come le 7,25).

$$t_{sol} = t_{st} + (4 * (L_{st} - L_{loc}) + E)$$

Si prosegue con il calcolo dell'angolo orario standard ω_{st} e solare ω_{sol} i quali sono funzione dell'ora del giorno, sono nulli a mezzogiorno (rispettivamente mezzogiorno standard e solare) e differisce di 15° ogni ora (in negativo prima delle 12:00 e in positivo dopo le 12:00).

$$\omega_{st} = 15(t_{st} - 12)$$

$$\omega_{sol} = 15(t_{sol} - 12)$$

Si passa poi al calcolo dell'angolo di declinazione

$$\delta = 23,45 * \text{SEN} \left(\frac{360 * (284 + n)}{365} \right)$$

E' l'angolo che la direzione dei raggi solari forma a mezzogiorno, sul meridiano considerato, col piano equatoriale ed è sempre compreso tra -23,45 e +23,45.

Ricordiamo inoltre le definizioni di "azimut" γ , "angolo di incidenza" θ e "zenit" θ_z

L'azimut è l'angolo di scostamento dalla direzione sud che ha la proiezione orizzontale della retta normale alla superficie presa in esame. Se questa superficie è orientata perfettamente a Sud l'azimut è nullo, se è scostata verso Est risulta un azimut negativo, mentre verso Ovest si ha un azimut positivo.

L'angolo d'incidenza è compreso tra la retta normale ad una superficie inclinata (inclinazione generica β) e la retta che indica la direzione dei raggi solari.

Lo zenit è l'angolo compreso tra la retta normale ad una superficie orizzontale e la retta che indica la direzione dei raggi solari.

Entrambi si possono calcolare con le funzioni goniometriche specificate di seguito.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen } \delta * \sin \Phi * \cos \beta - \text{sen } \delta * \cos \Phi * \text{sen } \beta * \cos \gamma + \cos \delta * \cos \Phi * \cos \beta * \cos \omega \\ & + \cos \delta * \text{sen } \Phi * \text{sen } \beta * \cos \gamma * \cos \omega + \cos \delta * \text{sen } \beta * \text{sen } \gamma * \text{sen } \omega \end{aligned}$$

Da questa ponendo l'angolo di inclinazione $\beta=0$ si ottiene

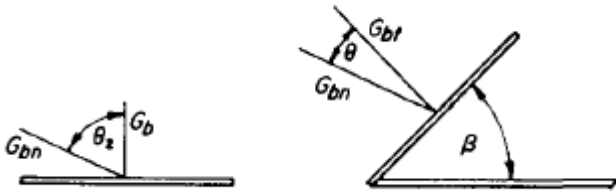
$$\cos \theta_z = \text{sen } \delta * \sin \Phi + \cos \delta * \cos \Phi * \cos \omega$$

Dove Φ indica la latitudine.

Si ricorda che su Excel gli argomenti delle funzioni goniometriche devono essere espressi in radianti.

Al fine di calcolare l'energia captata dai pannelli solari è utile ricorrere ad un parametro geometrico chiamato "coefficiente di radiazione diretta" R_b definito come rapporto tra la radiazione incidente su di una superficie inclinata (Tilted) e la radiazione incidente su di una superficie orizzontale.

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{G_{bn} * \cos \theta}{G_{bn} * \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$



Nel caso studio la superficie dei pannelli solari si suppone orientata perfettamente a Sud quindi, con $\gamma = 0$, il coefficiente di radiazione diretta può essere semplificato come segue

$$R_b = \frac{\cos(\Phi - \beta) * \cos \delta * \cos \omega + \sin(\Phi - \beta) * \sin \delta}{\sin \delta * \sin \Phi + \cos \delta * \cos \Phi * \cos \omega}$$

Si suppone in un primo momento che l'atmosfera non influenzi la radiazione solare e si procede al calcolo della potenza incidente su una superficie unitaria orizzontale posta nella località di riferimento

$$G_0 * \cos \theta_z = G_{sc} * \left(1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * n}{365}\right)\right) * \sin \delta * \sin \Phi + \cos \delta * \cos \Phi * \cos \omega$$

Integrando questa equazione tra due angoli orari rappresentanti l'inizio e la fine di un'ora si ottiene l'energia I_0 che la superficie capta in un'ora.

$$I_0 = \frac{3600 * 12}{\pi} * G_{sc} * \left(1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * n}{365}\right)\right) * \left(\cos \Phi * \cos \delta * (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi * (\omega_2 - \omega_1)}{180} * \sin \Phi * \sin \delta\right)$$

Con Excel si possono facilmente ottenere i valori di suddetta energia per ogni ora dell'anno, ma solo i valori riferiti alle ore di luce diurna hanno un senso fisico quindi bisogna inserire una funzione filtro per azzerare le I_0 calcolate nelle ore di buio.

Adesso si può considerare anche l'effetto dell'atmosfera ed in particolare delle nubi che oscurano il sole nell'arco dell'anno. Siccome il comportamento dei fenomeni atmosferici è fortemente aleatorio si ricorre ai dati forniti dal Comitato Termotecnico Italiano Energia e Ambiente, il quale mette a disposizione i valori medi misurati della radiazione solare (indicati con la lettera I) che ogni ora

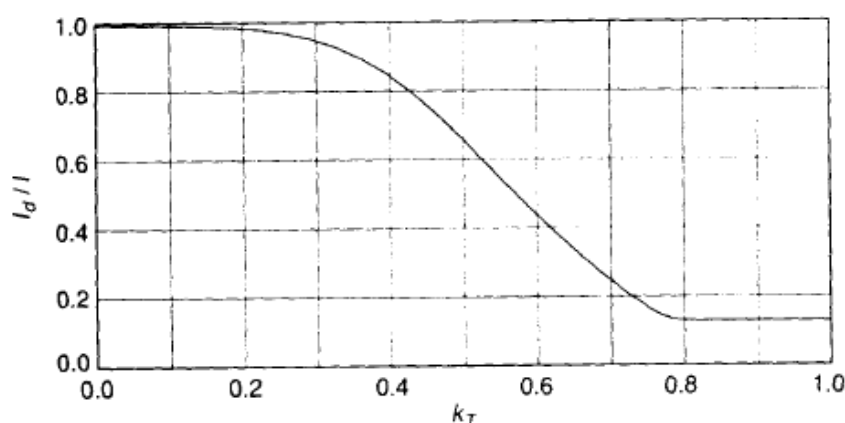
dell'anno raggiunge una superficie orizzontale nella provincia della località presa in considerazione.

Supponendo che a Città di Castello giunga la stessa radiazione che giunge a Perugia si procede al calcolo dell'indice di chiarezza orario k_T :

$$k_T \frac{I}{I_0}$$

Grazie a questo indice si può dividere la radiazione solare nelle sue componenti: radiazione diretta e radiazione diffusa

Esistono varie metodologie di stima dei loro valori e in particolare la correlazione di Erbs elaborata nel 1982 risulta una buona approssimazione dell'andamento naturale del rapporto tra radiazione diffusa e radiazione totale incidente al suolo ed è espressa dalle seguenti equazioni:



$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & \text{for } k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 & \text{for } 0.22 < k_T \leq 0.80 \\ 0.165 & \text{for } k_T > 0.80 \end{cases}$$

Con una funzione composta di funzioni "SE" di Excel si può facilmente implementare la correlazione di Erbs e calcolare la componente di radiazione diffusa I_d dopo di che la componente di radiazione solare diretta I_b sarà data da

$$I_b = \left(1 - \frac{I_d}{I}\right) * I$$

Un'altra grandezza necessaria per il calcolo dell'energia solare captabile è la radiazione I_g riflessa dal terreno. Il suolo della località presa in considerazione si suppone avere un coefficiente di riflessione $\rho_g = 0,6$ ma in generale si ha

$$I_g = I * \rho_g$$

Seguendo le ipotesi dell' "isotropic diffuse model" , elaborato nel 1963 da Liu e Jordan, si considera il cielo come una superficie isotropica e la radiazione che colpisce una superficie inclinata di un angolo β risulta composta dalle tre parti seguenti:

- Radiazione diretta = $I_b * R_b$
- Radiazione diffusa = $I_d * F_d$
- Radiazione diffusa riflessa dal terreno = $I_g * F_g$

Con F_d si indica il fattore di vista tra la superficie del cielo e quella inclinata mentre con F_g si indica il fattore di vista tra il terreno e la superficie inclinata.

$$F_d = \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right)$$

$$F_g = \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

Quindi riassumendo si può esprimere la radiazione incidente su una superficie unitaria inclinata con la seguente formula:

$$I_T = (I_b * R_b) + (I_d * F_d) + (I_g * F_g) \quad \left[\frac{kJ}{m^2} \right]$$

Moltiplicando il suddetto valore per la superficie captante dei pannelli solari si ottiene l'energia che teoricamente si potrebbe ottenere dal sole con dei pannelli perfetti, ma in realtà bisogna considerare alcune perdite stimate da un parametro detto efficienza del pannello ed indicato con ε . Nelle schede tecniche dei pannelli Sunerg Solar srl sono disponibili grafici che esprimono l'efficienza in funzione di una temperatura pesata di riferimento T^* definita come segue:

$$T_m^* = \frac{T_{in} - T_a}{G}$$

Dove

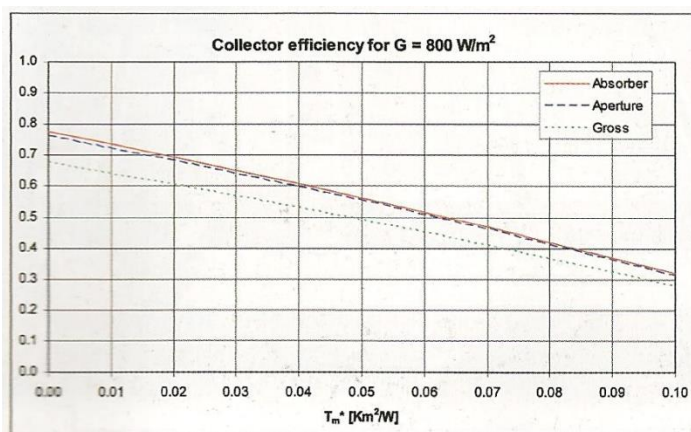
T_{in} = Temperatura in ingresso ai pannelli solari (si considera uguale alla temperatura dell'acqua nel serbatoio di accumulo cioè si trascurano le perdite lungo le tubature)

T_a = Temperatura dell'aria esterna che lambisce i pannelli (fornita per ogni ora dell'anno dal Comitato Termotecnico Italiano Energia e Ambiente)

G = Potenza della radiazione solare incidente (si calcola come $\frac{I_T}{3600} \left[\frac{W}{m^2 * h} \right]$)

Si capisce quindi che il valore della T_m^* di ogni ora dipende dalla temperatura raggiunta dall'accumulo all'ora precedente.

Per calcolare l'efficienza dei pannelli ad ogni ora è necessaria una formula che ne esprima la dipendenza da T_m^* e siccome non è stata fornita dai costruttori la si può approssimare con una retta passante da due punti. Di seguito si riporta il grafico messo a disposizione nelle schede tecniche dei pannelli.



Selezionando due punti con le coordinate facilmente approssimabili si può determinare la seguente equazione della retta passante da essi:

$$\varepsilon = -4,838 * T_m^* + 0,796$$

Questa funzione può dare come risultato anche dei valori quasi nulli o addirittura negativi il che fisicamente significherebbe che i pannelli stanno assorbendo poca energia o addirittura la stanno disperdendo all'esterno. Per evitare ciò si filtrano i valori di ε risultati da una $T_m^* > 0,15$ che fisicamente corrisponde a far fermare il circolatore solare se l'acqua accumulata nel serbatoio è molto più calda dell'aria esterna ai pannelli.

A questo punto con Excel si hanno disponibili per ogni ora dell'anno i valori dell'energia incidente sui pannelli e i valori dell'efficienza dei pannelli stessi quindi moltiplicando i primi per i secondi si ottiene l'energia trasmessa all'accumulo nell'ipotesi che non vi siano dispersioni lungo i tubi in cui circola il fluido termovettore e nell'ipotesi che il serpentino interno all'accumulo riesca a scambiare tutta l'energia termica dal fluido termovettore all'acqua tecnica.

Si noti che nei periodi invernali ci saranno alcuni giorni in cui l'energia solare assorbita sarà molto bassa o addirittura nulla mentre nei periodi estivi (durante i quali la richiesta di energia termica è notevolmente ridotta) l'energia solare disponibile sarà talmente elevata da portare a ebollizione l'acqua tecnica. Per evitare questo inconveniente si può svuotare il circuito solare convogliando il fluido termovettore in un serbatoio ausiliario oppure coprire i pannelli quando c'è troppa insolazione con delle tende disponibili in commercio anche motorizzate e controllabili dalla centralina.

Si dispone adesso di tutti valori delle grandezze che compaiono nel bilancio energetico del serbatoio quindi lo si può usare per calcolare l'incognita T_{fin} la quale indica la temperatura raggiunta dall'acqua dopo un'ora di funzionamento dell'impianto e costituisce la temperatura iniziale T_{in} del bilancio riferito all'ora successiva. Sviluppando i bilanci per ogni ora dell'anno si può seguire l'andamento delle temperature e degli apporti energetici nell'impianto, in oltre si possono effettuare calcoli per riassumere le prestazioni nei vari mesi dell'anno e ovviamente sull'intero periodo annuale.

Conclusioni

Considerando un impianto termoidraulico destinato a coprire solo il fabbisogno di acqua calda sanitaria è possibile utilizzare una pompa di calore di taglia ridotta quindi più economica che dovrà fornire energia all'accumulo nei periodi di bassa insolazione.

RIASSUNTO N° pan: 1 tilt [°]: 18 P_{PdC} [W]: 300 V_{acc} [l]: 300 P_{Res} [W]: 3000

ANNUO

	En _{risc} [kWh]:	En _{ACS} [kWh]:	En _{dis int} [kWh]:	En _{SOL} [kWh]:	En _{PdC} [kWh]:	En _{Res} [kWh]:
GEN	0,00	271,31	13,35	45,22	71,85	174,00
FEB	0,00	248,06	13,29	107,33	36,23	123,00
MAR	0,00	275,19	16,70	182,08	30,35	75,00
APR	0,00	267,44	19,55	266,00	7,84	24,00
MA G	0,00	271,31	22,18	268,17	7,42	18,00
GIU	0,00	267,44	22,54	276,98	4,91	6,00
LUG	0,00	275,19	25,02	302,38	0,00	0,00
AGO	0,00	271,31	25,04	296,91	0,00	0,00
SET	0,00	271,31	19,67	256,03	5,39	21,00
OTT	0,00	271,31	15,89	164,38	32,40	87,00
NOV	0,00	263,56	13,05	55,00	80,81	141,00
DIC	0,00	279,07	13,39	29,91	63,97	198,00

TOT 0,00 3232,52 219,66 2250 341,17 867,00

	Ore on PdC:	COP medio:	Ore on Res:	% En _{SOL} :	% En _{PdC} :	% En _{Res} :
GEN	511	1,52537	58	15,88	25,24	61,12
FEB	258	1,50847	41	41,07	13,86	47,06
MAR	191	1,75444	25	62,38	10,40	25,69
APR	46	1,95713	8	92,69	2,73	8,36
MA G	41	2,17816	6	91,37	2,53	6,13
GIU	28	2,13802	2	95,52	1,69	2,07
LUG	0	#DIV/0!	0	100,00	0,00	0,00
AGO	0	#DIV/0!	0	100,00	0,00	0,00
SET	31	2,20888	7	87,98	1,85	7,22
OTT	183	2,19458	29	57,24	11,28	30,29
NOV	492	1,82126	47	19,88	29,22	50,97
DIC	501	1,39501	66	10,23	21,87	67,70

TOT 2282 1,6687 289 65,19 % 9,88 % 25,11 %

(COP medio annuale)

Tot
fabb: 3452 kWh/anno (le percentuali hanno un incertezza di ± 1% a causa dei picchi di richiesta)

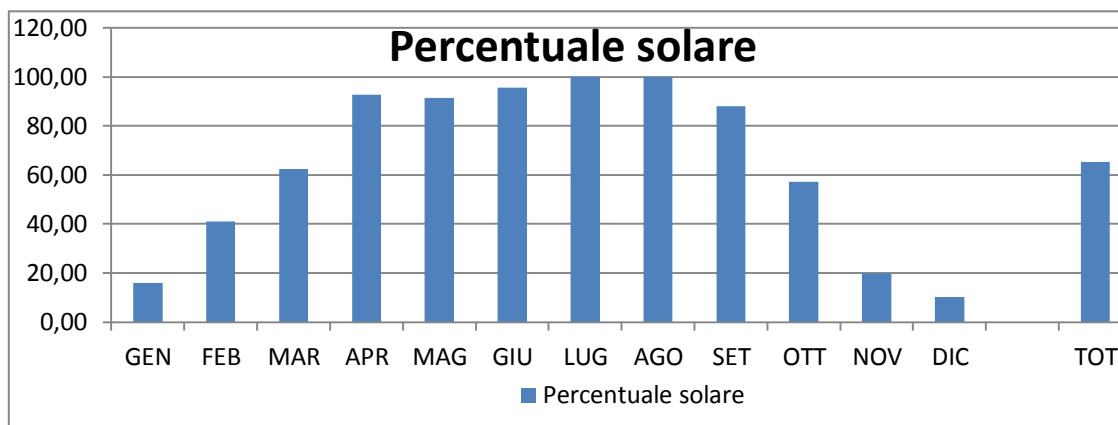
Risparmio in bolletta: 200,96 €/anno Investimento: 5325,00 € Risparmio in tasse: 346,13 €/anno

Emiss Kg di CO2: 160,79

(se è negativo indica
l'evitata emissione di CO2)

PBT: 9,7 anni

(Senza considerare aumenti di
bolletta e attualizzazioni del capitale)



Nella tabella precedente si nota che con un pannello solare, un accumulo da 300l e una pompa di calore da 300W non si riesce a soddisfare la richiesta di ACS: è necessario un apporto energetico ausiliario che coprirà oltre il 25% del fabbisogno, mentre la PdC riesce a fornire meno del 10% dell'energia necessaria. Il pannello copre quasi interamente il fabbisogno nei mesi da aprile a settembre e in generale soddisfa oltre il 65% della richiesta di ACS.

Supponiamo nella prossima simulazione di aumentare la taglia della PdC a 700W e di utilizzare 2 pannelli solari

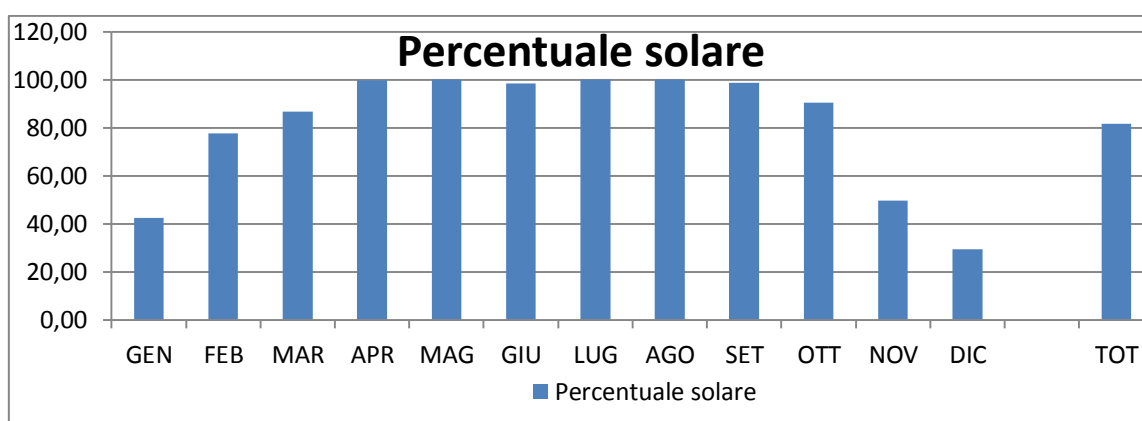
Risparmio in bolletta: 240,20 €/anno Investimento: 6950,00 € Risparmio in tasse: 451,75 €/anno

Emiss Kg di CO2: -329,95

(se è negativo indica
l'evitata emissione di CO2)

PBT: 10,0 anni

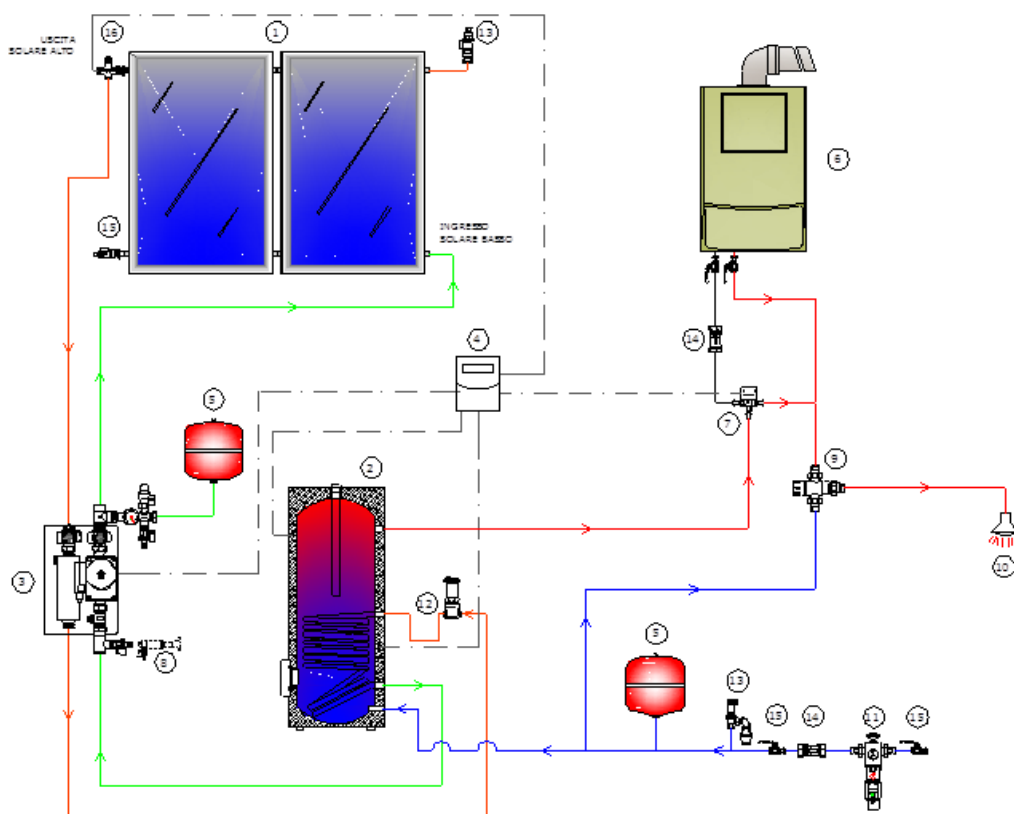
(Senza considerare aumenti di
bolletta e attualizzazioni del capitale)



RIASSUNTO	N° pan:	1	tilt [°]:	18	P _{PdC} [W]:	300	V _{acc} [V]:	300	P _{Res} [W]:	3000
ANNUO										
	En _{risc} [kWh]:	En _{ACS} [kWh]:	En _{dis int} [kWh]:	En _{SOL} [kWh]:	En _{PdC} [kWh]:	En _{Res} [kWh]:				
GEN	0,00	271,31	15,07	121,20	91,64	81,00				
FEB	0,00	248,06	17,87	206,44	37,11	33,00				
MAR	0,00	275,19	22,54	258,52	19,68	18,00				
APR	0,00	267,44	23,76	290,89	2,50	0,00				
MAG	0,00	271,31	26,08	299,67	0,00	0,00				
GIU	0,00	267,44	25,42	288,51	0,00	0,00				
LUG	0,00	275,19	26,72	304,24	0,00	0,00				
AGO	0,00	271,31	26,60	297,94	0,00	0,00				
SET	0,00	271,31	24,26	291,98	0,49	0,00				
OTT	0,00	271,31	22,51	265,90	10,43	9,00				
NOV	0,00	263,56	15,24	138,55	74,84	66,00				
DIC	0,00	279,07	14,52	86,47	103,5	105,00				
TOT	0,00	3232,52	260,60	2850,31	340,1	312,00				
	Ore on PdC:	COP medio:	Ore on Res:	% En _{SOL} :	% En _{PdC} :	% En _{Res} :				
GEN	235	1,72203	27	42,32	32,00	28,28				
FEB	96	1,67900	11	77,63	13,95	12,41				
MAR	49	1,71596	6	86,83	6,61	6,05				
APR	5	2,04838	0	99,89	0,86	0,00				
MAG	0	#DIV/0!	0	100,00	0,00	0,00				
GIU	0	#DIV/0!	0	98,51	0,00	0,00				
LUG	0	#DIV/0!	0	100,00	0,00	0,00				
AGO	0	#DIV/0!	0	100,00	0,00	0,00				
SET	1	2,30132	0	98,79	0,17	0,00				
OTT	23	2,31171	3	90,49	3,55	3,06				
NOV	176	1,87473	22	49,69	26,84	23,67				
DIC	295	1,57655	35	29,45	35,25	35,76				
TOT	880	1,71669	104	81,60 %	9,74 %	8,93 %				
	(COP medio annuale)									
Tot fabb:	3493	(le percentuali hanno un incertezza di ± 1% a causa dei picchi di richiesta)								
	kWh/anno									

Questa soluzione permette di soddisfare il fabbisogno per oltre l'80% con i pannelli solari e questo determina una considerevole riduzione dei consumi e quindi di emissione di CO₂, ma l'impianto risulta costoso, la pompa di calore fornisce solamente il 10% circa dell'energia richiesta ed è comunque necessaria una fonte ausiliaria per coprire i picchi.

Considerando che gli utenti avranno comunque bisogno di una caldaia esterna per il fabbisogno di riscaldamento invernale, è consigliabile coprire il fabbisogno di ACS solo con i pannelli solari e, per rispondere ai picchi di richiesta, intervenire con la caldaia per il riscaldamento istantaneo dell'acqua adottando quindi il seguente schema impiantistico semplificato:



Legenda:

- 1) Pannello solare o collettore solare
- 2) Serbatoio d'accumulo o boiler solare
- 3) Gruppo di circolazione (comprende la pompa del circuito solare)
- 4) Centralina elettronica di controllo
- 5) Vaso d'espansione
- 6) Caldaia a metano
- 7) Valvola deviatrice
- 8) Eventuale pompa per carico manuale del fluido termovettore
- 9) Valvola miscelatrice termostatica
- 10) Utenza di acqua calda sanitaria
- 11) Filtro dell'acqua fredda in ingresso
- 12) Sifone con degasatore
- 13) Valvola di sicurezza
- 14) Valvola di non ritorno
- 15) Saracinesca
- 16) Degasatore

Al fine di sfruttare al meglio le potenzialità dei pannelli solari e della Pompa di calore, è preferibile eliminare la caldaia classica e puntare a soddisfare sia il fabbisogno di ACS che di riscaldamento invernale.

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva delle prestazioni di un impianto termoidraulico composto da 2 pannelli solari, un accumulo da 300 litri e una pompa di calore da 4,5kW. Queste dimensioni dei componenti sono state scelte in seguito alle valutazioni tecnico economiche effettuate su varie prove con taglie diverse dei componenti.

RIASSUNTO	N° pan: 2	tilt [°]: 18	P _{PdC} [W]: 4500	V _{acc} [l]: 300	P _{Res} [W]: 3000	
ANNUO						
	En _{risc} [kWh]:	En _{ACS} [kWh]:	En _{dis int} [kWh]:	En _{SOL} [kWh]:	En _{PdC} [kWh]:	En _{Res} [kWh]:
GEN	994,92	271,31	12,45	124,32	1035	123,00
FEB	1047,5	248,06	11,68	254,73	925	138,00
MAR	785,31	275,19	16,30	381,89	616	69,00
APR	0,00	267,44	22,99	295,01	5,51	3,00
MAG	0,00	271,31	25,58	296,51	0,00	0,00
GIU	0,00	267,44	24,38	290,40	0,00	0,00
LUG	0,00	275,19	25,95	304,19	0,00	0,00
AGO	0,00	271,31	25,99	296,04	0,00	0,00
SET	0,00	271,31	23,78	294,32	0,00	0,00
OTT	225,67	271,31	18,80	339,64	155	9,00
NOV	668,40	263,56	12,77	140,69	722	81,00
DIC	1184,2	279,07	11,86	89,90	1231	153,00
TOT	4906,1	3232,5	232,52	3107,65	4692	576,00
	Ore on PdC:	COP medio:	Ore on Res:	% En _{SOL} :	% En _{PdC} :	% En _{Res} :
GEN	238	2,42696	41	9,72	80,98	9,62
FEB	224	2,31574	46	19,49	70,80	10,56
MAR	140	2,42855 9	23	35,47	57,24	6,41
APR	1	3,59270	1	100,00	1,90	1,03
MAG	0	#DIV/0!	0	99,87	0,00	0,00
GIU	0	#DIV/0!	0	99,51	0,00	0,00
LUG	0	#DIV/0!	0	100,00	0,00	0,00
AGO	0	#DIV/0!	0	99,58	0,00	0,00
SET	0	#DIV/0!	0	99,74	0,00	0,00
OTT	30	3,03129	3	65,85	30,16	1,74
NOV	153	2,61974	27	14,89	76,48	8,57
DIC	283	2,39889	51	6,09	83,45	10,37
TOT	1069	2,44207	192	37,12 %	56,05 %	6,88 %
	(COP medio annuale)					
Tot fabb:	8371 kWh/anno	(le percentuali hanno un incertezza di ± 1% a causa dei picchi di richiesta)				

Si noti che l'energia solare copre oltre il 37% del fabbisogno e che il resistore elettrico entra in funzione meno di 200 ore in un anno fornendo meno del 7% dell'energia richiesta.

Il coefficiente di prestazione della pompa di calore ha valori medi mensili sempre maggiori di 2,3.

Risparmio in bolletta: 519,26 €/anno

Investimento: 11930 €

Risparmio in tasse: 775,45 €/anno

Emiss Kg di CO2: 16,47

(se è negativo indica

l'evitata emissione di CO2)

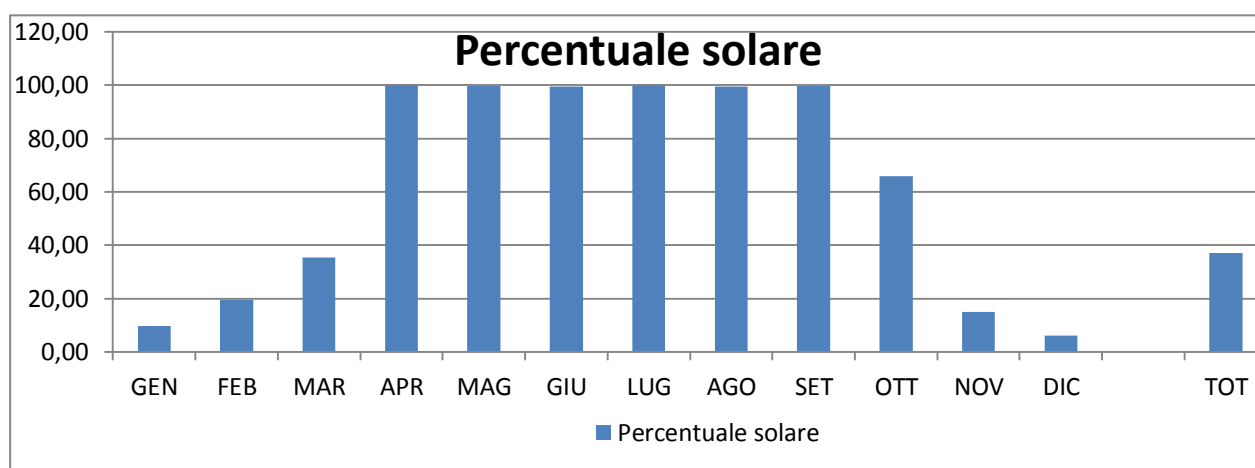
PBT: 9,2 anni

(Senza considerare aumenti di
bolletta e attualizzazioni del capitale)

Classe energetica dell'edificio:

Con Caldaia a metano: fabb= 58,133 kWh/m2*anno classe: C

Con PdC+Solare Termico: fabb= 37,597 kWh/m2*anno classe: B



Da aprile a settembre 2 pannelli solari coprono il 100% della richiesta energetica, mentre nei mesi da novembre a febbraio compresi sono quasi inutili, ma la pompa di calore riesce a soddisfare il fabbisogno consentendo agli utenti di risparmiare sulle bollette del metano in modo da ammortizzare l'investimento dell'impianto in circa 9 anni, inoltre la classe energetica dell'immobile e quindi il suo valore ne risulta incrementata.

Le emissioni globali di anidride carbonica risultano leggermente incrementate in quanto l'utilizzo di energia elettrica presuppone la produzione di molta CO2 nelle centrali a monte. Tali emissioni risulterebbero molto più ridotte aumentando il numero dei pannelli solari termici, ma economicamente non è giustificabile l'impiego di più di due pannelli.

Una variabile d'impianto degna di nota è la seguente costituita da un accumulo da 500l rifornito di energia da 4 pannelli e una pompa di calore da 3000W.

RIASSUNTO	N° pan: 4	tilt [°]: 18	P _{PdC} [W]: 3000	V _{acc} [l]: 500	P _{Res} [W]: 3000	
ANNUO						
	En _{risc} [kWh]:	En _{ACS} [kWh]:	En _{dis int} [kWh]:	En _{SOL} [kWh]:	En _{PdC} [kWh]:	En _{Res} [kWh]:
GEN	994,92	271,31	15,99	290,55	917,03	81,00
FEB	1047,55	248,06	16,33	542,34	670,03	123,00
MAR	785,31	275,19	23,57	683,06	375,39	24,00
APR	0,00	267,44	32,35	311,01	0,00	0,00
MAG	0,00	271,31	34,36	301,44	0,00	0,00
GIU	0,00	267,44	33,32	296,53	0,00	0,00
LUG	0,00	275,19	35,03	311,56	0,00	0,00
AGO	0,00	271,31	34,28	309,01	0,00	0,00
SET	0,00	271,31	32,10	301,08	0,00	0,00
OTT	225,67	271,31	28,64	498,15	7,33	0,00
NOV	668,40	263,56	16,99	322,81	591,00	33,00
DIC	1184,2	279,07	14,68	219,21	1142,8	111,00
TOT	4906,1	3232,52	317,65	4386,76	3703,6	372,00
	Ore on PdC:	COP medio:	Ore on Res:	% En _{SOL} :	% En _{PdC} :	% En _{Res} :
GEN	297	2,4579	27	22,66	71,52	6,32
FEB	230	2,35886	41	41,34	51,07	9,38
MAR	122	2,43343	8	63,01	34,63	2,21
APR	0	#DIV/0!	0	100,00	0,00	0,00
MAG	0	#DIV/0!	0	98,61	0,00	0,00
GIU	0	#DIV/0!	0	98,59	0,00	0,00
LUG	0	#DIV/0!	0	100,00	0,00	0,00
AGO	0	#DIV/0!	0	100,00	0,00	0,00
SET	0	#DIV/0!	0	99,23	0,00	0,00
OTT	2	2,78557	0	94,77	1,39	0,00
NOV	184	2,53972	11	34,02	62,28	3,48
DIC	374	2,41458	37	14,83	77,32	7,51
TOT	1209	2,43618	124	51,88 %	43,80 %	4,40 %

(COP medio annuale)

Tot fabb: 8456,32 kWh/anno

(le percentuali hanno un incertezza di ± 1% a causa dei picchi di richiesta)

La percentuale di energia solare è aumentata dal 37% al 52% circa, il resistore elettrico entra in funzione meno di 124 ore in un anno fornendo meno del 5% dell'energia richiesta. Il coefficiente di prestazione della pompa di calore ha valori medi mensili di poco più alti del caso precedente.

Dal punto di vista economico questa soluzione è meno conveniente, ma la certificazione energetica dell'edificio sale di due classi e si ha un notevole risparmio di emissioni di CO2.

Risparmio in bolletta: 561,74 €/anno

Investimento: 13550 €

Risparmio in tasse: 880,75 €/anno

Emiss Kg di CO2: -440,74

(se è negativo indica

l'evitata emissione di CO2)

PBT: 9,4 anni

(Senza considerare aumenti di

bolletta e attualizzazioni del capitale)

Classe energetica dell'edificio:

Con Caldaia a metano:

fabb=

58,133 kWh/m2*anno

classe:

C

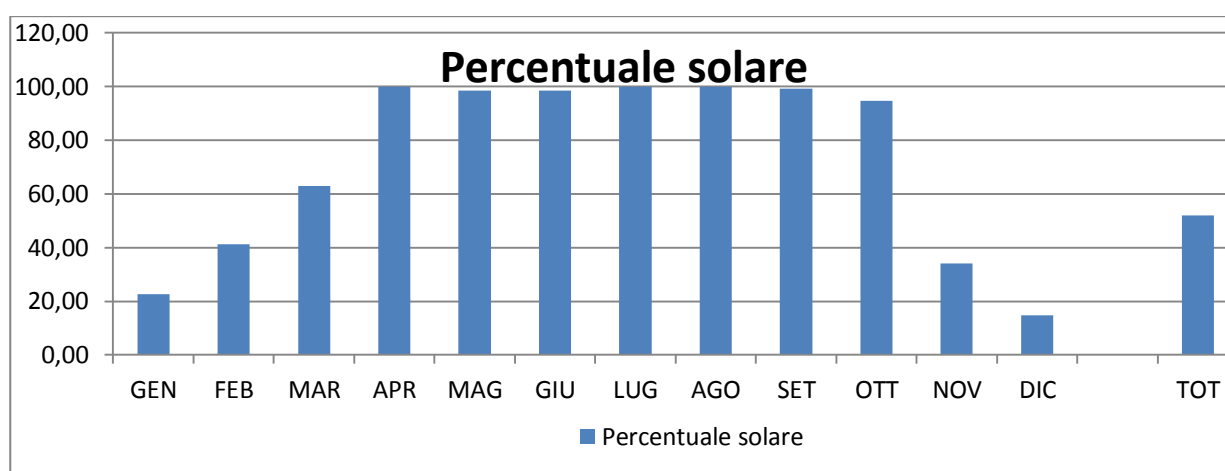
Con PdC+Solare Termico:

fabb=

29,068 kWh/m2*anno

classe:

A



In definitiva La tecnologia della pompa di calore può essere convenientemente affiancata a quella dei pannelli solari termici per soddisfare sia la richiesta di ACS che di riscaldamento.

Così facendo l'utente può diventare indipendente dai servizi di rifornimento di metano, consentono un risparmio economico e la riduzione dei consumi dei combustibili fossili, con conseguente diminuzione dell'inquinamento locale. Questi effetti risultano incrementati nei casi in cui l'utente sostituisca la caldaia a gasolio o a GPL e anche nel caso in cui l'utente disponga di un impianto fotovoltaico per l'autoproduzione dell'energia elettrica.

Bigliografia

Testi:

- J.A. Duffie, W.A. Backman: “Solar engineering of thermal processing”, Wiley-interscience publication, Madison, Winsconsin, 1980.
- Y.A. Çengel: “Termodinamica e trasmissione del calore”, Mc Graw-Hill Libri Italia, Milano, Italy, 1998.
- M. Moscioni, D. Lauri: Catalogo Sunerg Solar s.r.l. Via Donnini 51, Cinquemiglia, Città di Castello (PG), Italia

Pubblicazioni Scientifiche e Documenti Tecnici:

- Dal sito internet www.midea.com: “Heat pump 2012” , Midea headquarter building n°6, Midea Avenue, Beijiao, P.R. China
- Dal sito internet www.midea.com: “owners and installation manual” , Midea headquarter building n°6, Midea Avenue, Beijiao, P.R. China
- Dal sito internet www.midea.com: “ ALL IN ONE Type Heat Pump Water Heater Technical Manual” , Midea headquarter building n°6, Midea Avenue, Beijiao, P.R. China
- Dal sito internet www.ibidrotermica.it: “Dati Bollitori”, IB Idrotermica Via della Margherita, 179– 37051 Bovolone (VR) - Italia
- Dal sito internet www.galletti.it: “Guida Pompe di Calore”, Galletti Group, Via Bentivoglio 12 (BO), Italia.
- Dal sito internet www.sviluppoeconomico.gov.it: “Bilancio energetico nazionale 2007”, osservatorio statistico energetico italiano.
- Dal sito internet www.sviluppoeconomico.gov.it: “Scenario tendenziale dei consumi e del fabbisogno al 2020”, direzione generale energia e risorse minerarie.
- Dal sito internet www.rossatogroup.it: “Guida alla Progettazione” di Davide Rossato e ing. Cinzia Trivigno, Rossato Group srl, Strada Portosello, 77/b Borgo San Donato Latina , Italia.