

1. PRESENTAZIONE

1.1. L'IDEA

Un gruppo di insegnanti dell'ITIS di materie tecniche (elettrotecnica, elettronica, meccanica, sistemi automatici), molti dei quali con esperienza professionale nel campo della progettazione e gestione di impianti, si propone, auspicando collaborazioni e impegno di risorse da parte di altri soggetti, di progettare, realizzare, gestire, studiare un impianto di riscaldamento, di media scala, applicato ad una parte dell'edificio scolastico, che utilizzi energia di fonte solare con un sistema a pannelli solari termici con accumulo stagionale dell'energia termica.

L'utilizzo sistematico dell'energia solare per il riscaldamento di ambienti si deve, infatti, confrontare con un semplice problema: quando, nei mesi estivi, la radiazione solare è maggiormente disponibile, per intensità e durata, il fabbisogno termico è minimo; all'opposto nel semestre freddo, l'utilizzo termico è elevato e la risorsa solare è scarsa. In generale quindi, non vi è (quasi) mai corrispondenza tra la disponibilità della risorsa e il fabbisogno.

1.2. L'ACCUMULO

L'accumulo del calore in un serbatoio di grande capacità termica durante la stagione favorevole e il successivo prelievo nei tempi e nelle misure dettate dalle condizioni ambientali è la soluzione offerta dal sistema proposto.

Il serbatoio, per le sue caratteristiche costruttive e per le modalità di gestione del calore in esso accumulato, è il nucleo del sistema e costituisce l'elemento critico per valutare la fattibilità e la razionalità dell'intero progetto.

Nella documentazione tecnica viene dimostrato che l'efficienza dell'accumulo, con l'opportuno dimensionamento della vasca e del suo isolamento, è ragionevolmente elevata e le perdite, considerato anche il costo-zero della risorsa, sono del tutto accettabili.

L'idea in sé è semplice e non certo originale; ma vi è un aspetto del sistema proposto che è opportuno sottolineare preliminarmente, poiché ne rappresenta un tratto di originalità.

1.3. LA STRATIFICAZIONE

Come è noto, in un serbatoio esteso in altezza, l'acqua riscaldata, se immessa con opportuna modalità, si stratifica in base alla temperatura (più calda in alto, meno calda in basso). I vari strati a temperature differenti spontaneamente non si mescolano, anzi possono essere mantenuti separati per lunghi periodi. La trasmissione del calore in senso discendente avviene molto lentamente ed è molto piccola rispetto agli altri fenomeni del sistema.

Pertanto, sia in fase di accumulo che di utilizzo, si è prevista la possibilità di immettere e prelevare acqua a diverse altezze, in corrispondenza delle diverse temperature dei singoli strati: in tal modo sia i pannelli che l'impianto di riscaldamento possono essere gestiti utilizzando il salto termico ottimale sotto il profilo termodinamico tra mandata e ritorno. Si realizza, così, la massima efficienza nell'utilizzo della risorsa termica, così come più dettagliatamente esposto nel seguito.

2. GLI SCOPI

Ci si propone quindi di realizzare un'applicazione con carattere esemplare e significativo:

- per le potenzialità didattiche di carattere sperimentale-operativo di un "laboratorio" aperto pluridisciplinare, offerte al mondo della scuola (al nostro istituto dove s'intende avviare una specializzazione "termotecnica", ma anche, per mezzo di progetti in collaborazione, ad altri istituti scolastici superiori);
- per le valenze formative nell'ambito dell'istruzione, tecnica e non solo, e culturali generali inerenti la problematica, all'ordine del giorno ma non contingente, del corretto utilizzo delle risorse energetiche;
- per la metodologia impiegata, basata su tecnologia non sofisticata, matura, di basso impatto ambientale, con aspetti innovativi per l'uso più corretto (sotto il profilo termodinamico) del calore a bassa temperatura;
- per le opportunità di collaborazione nella ricerca offerte a studiosi e operatori, pubblici e privati, operanti nel campo energetico-termotecnico;
- per la sede che lo ospita: edificio pubblico, istituto di istruzione tecnica di importanza rilevante nell'ambito sociale e territoriale.

Non viene posta particolare enfasi, ma è comunque significativa anche dal punto di vista quantitativo, la finalità del risparmio nel medio periodo dei consumi energetici termici dell'Istituto con relativa ricaduta economica.

I promotori del progetto sono consapevoli che anche altre misure (coibentazione, doppi vetri, sistemi più efficienti di distribuzione, regolazione e diffusione del calore, etc.) hanno grande efficacia nel risparmio e non escludono fin da ora di estendere, se si presenteranno risorse ed opportunità, il loro impegno con la proposta di altri progetti che perseguano le finalità sopra esposte, con priorità alle valenze didattiche, formative, di ricerca, di collaborazione sopra esposti.

2.1. L'IMPIANTO

L'impianto è costituito da:

- un sistema di raccolta dell'energia radiante con pannelli termici ad acqua tradizionali, provati, di potenza adeguata a coprire il fabbisogno termico di un'ala del nostro Istituto;
- un sistema di accumulo dell'energia termica costituito da un serbatoio d'acqua di capacità termica adeguata allo stoccaggio e al riutilizzo dell'energia su base stagionale;
- un sistema di prelievo e di regolazione automatico (con ampie possibilità di intervento manuale a scopo di ricerca) che ottimizzi l'utilizzo della risorsa termica sotto il profilo termodinamico;
- un sistema di misura delle grandezze fisiche in gioco (radiazione, temperature, portate) a scopo didattico e di ricerca.

2.2. LA PROPOSTA

Nonostante la semplicità dei principi del progetto e, tutto considerato, degli aspetti realizzativi, gli impianti ad accumulo stagionale non sono molto numerosi in Europa, rari in Italia, assenti in provincia di Brescia¹.

Il motivo di questa scarsa diffusione è, riteniamo, di ordine meramente economico: il risparmio, per quanto consistente, ripaga l'investimento iniziale nell'impianto solo nel lungo periodo.

Ci pare quindi ragionevole proporre la realizzazione del progetto agli Enti Pubblici, in primo luogo l'Amministrazione Provinciale proprietaria degli immobili, mettendo in evidenza non solo la finalità del risparmio, ma soprattutto il potenziamento dell'offerta formativa e didattica della scuola, l'opportunità di ricerca offerta al mondo economico industriale e dei servizi.

Nel contempo si fornisce all'Ente Pubblico l'opportunità di supportare un contributo esemplare sotto il profilo dell'efficacia e del valore simbolico d'immagine, nell'affrontare concretamente un aspetto rilevante del "problema energetico".

¹ Una documentazione al riguardo viene fornita più avanti al punto 2.4.

3. DESCRIZIONE

3.1. IL PROGETTO

Come è già stato anticipato il sistema proposto è costituito essenzialmente da un grande vasca (di dimensioni adeguate ad accumulare, nel periodo estivo, il calore necessario per il riscaldamento invernale) e da un sistema di pannelli solari.

L'elemento critico di tale impianto sperimentale è proprio il serbatoio di accumulo, in quanto è una opera di un certo peso economico e sulla quale non è pensabile di intervenire con aggiustamenti successivi, cosa possibile per gli altri elementi dell'impianto (pannelli, pompe, valvole, sensori e così via). La sua corretta progettazione e messa in opera è quindi cruciale.

Riguardo alla sua geometria e localizzazione, si prevede un serbatoio cilindrico, completamente interrato, delle dimensioni approssimative di circa 12 m di altezza per un diametro di circa 25 m. Maggiori dettagli si potranno trovare nella apposita sezione.

La forma cilindrica si presenta come la scelta migliore da un punto di vista ingegneristico, ma anche altre forme (come la classica vasca a parallelepipedo) potrebbero essere adottate se vi fossero dei problemi nell'ubicazione. Quest'ultima forma potrebbe essere ad esempio più adatta nel caso di un serbatoio per una palazzina di nuova edificazione, in modo da fare parte integrante delle fondamenta.

Tornando alla presente proposta il serbatoio cilindrico prevede al suo interno un pozzo di ispezione e manutenzione, anch'esso cilindrico. In questo pozzo di servizio andranno alloggiati tutti gli elementi di tipo idraulico, quali pompe, valvole ed, eventualmente, gli scambiatori di calore.

Sono previsti non meno di quattro circuiti di servizio impiegati sia per i pannelli che per l'utilizzo: ciascun circuito sarà costituito da due colonne che si svilupperanno per tutta la profondità del serbatoio. Una serie di 6 ingressi a differenti altezze, intercettati da valvole motorizzate, consentiranno il prelievo e l'immissione dell'acqua a diversi livelli onde sfruttare la stratificazione nel serbatoio. Le pompe saranno poste sul fondo del pozzo, in modo da lavorare sottobattente, una modalità che presenta meno problemi per l'adescamento.

Al fine di consentire un facile accesso a tutti gli elementi idraulici, il pozzo dovrà avere un diametro congruo (2 m) con un sistema di scale di sicurezza e molti piani di lavoro. Inoltre dovrà essere dotato di un sistema opportuno di ventilazione forzata per mantenere a livelli accettabili la temperatura al suo interno durante gli interventi di manutenzione.

Il resto dell'impianto sarà costituito da alcune batterie di pannelli solari, eventualmente anche di differenti tipologie, per una estensione totale di circa 1000 m²; la superficie dei pannelli potrebbe essere implementata in tempi successivi, senza per questo pregiudicare la riuscita della sperimentazione.

Il sistema nel suo complesso servirà a riscaldare, per tutto l'inverno, un'ala della scuola, identificata con il nome di *Satellite*, costituita da un edificio a sé stante. Il fatto che si tratti di una struttura già di per sé autonoma dal punto di vista impiantistico rende estremamente semplice non solo isolarla dal resto dell'impianto di riscaldamento dell'Istituto, ma anche la verifica puntuale delle prestazioni dell'impianto solare proposto.

Inoltre, ciò consente di garantire, in ogni caso, le corrette condizioni ambientali per l'edificio, poiché in caso di malfunzionamento dell'impianto sperimentale, in pochi minuti, con semplici interventi, ci si potrà ricollegare all'impianto di riscaldamento preesistente.

Per quanto riguarda i costi, saranno quantificabili con adeguata accuratezza al termine della fase di progettazione esecutiva: tuttavia si ritiene verosimile una cifra di circa 150.000 € per la vasca, 150.000 € per i pannelli e di 100.000 € per l'impiantistica, per un costo totale di massima di 400.000 €.

3.2. LE VALENZE DIDATTICHE

Il progetto ha molte ricadute didattiche, spendibili sia all'interno della scuola che esternamente. Nelle fasi progettazione e realizzazione non è prevista alcuna partecipazione di studenti, ma successivamente essi potranno essere coinvolti a molti livelli: dalla possibilità di ripercorrere le fasi della progettazione e analizzare le soluzioni tecniche adottate alla valutazione dei dati che verranno via via acquisiti, alla sperimentazione delle diverse tecniche di gestione.

Proprio in vista di un uso didattico dell'impianto, tutto il sistema avrà una modalità di funzionamento minimo essenziale, selezionabile con estrema facilità in qualsiasi momento, studiato in modo da garantire comunque la funzionalità e la sicurezza dell'impianto stesso.

Saranno, inoltre, previste diverse modalità di funzionamento in modo da consentire l'acquisizione di dati concreti relativi a tecniche alternative di gestione e di funzionamento dell'impianto, sia a scopo didattico che di sperimentazione. Le possibili alternative potranno riguardare essenzialmente i criteri e le modalità d'uso dei diversi tipi di pannelli, della stratificazione e dell'accumulo: le diverse possibili combinazioni potranno essere ottenute molto semplicemente modificando i circuiti idraulici tramite le valvole motorizzate.

Più nel dettaglio gli allievi delle diverse specializzazioni dell'ITIS potranno essere coinvolti in attività quali:

- **Acquisizione e trasmissione dei dati**, dai sensori ai sistemi di controllo;
- **Modellizzazione e gestione di sistemi** di una certa complessità;
- **Approfondimento delle tecniche di regolazione** (algoritmi particolari);
- **Regolazione della portata** e aspetti idraulici connessi;
- **Misure e telemisure** sui dispositivi di captazione (pannelli), anche con utilizzo di strumentazione specifica in dotazione al Laboratorio di Energia Solare, nel passato attivo nell'Istituto.
- **Approfondimento della normativa** e degli **aspetti economici**.

3.3. PROSPETTIVE DI COLLABORAZIONE E DI RICERCA CON ALTRI ENTI

Le prospettive che l'impianto proposto offre in termini di collaborazione e di ricerca con altri Enti, sia in ambito formativo che produttivo, sono notevoli. Esso, infatti, si caratterizza per l'intenzione di offrire alla realtà bresciana una concreta possibilità di studio e sperimentazione delle potenzialità delle tecnologie solari applicate in un impianto non puramente dimostrativo.

Ciò rende possibili significative collaborazioni con altri istituti superiori e centri di formazione di Brescia, nell'ambito dei rispettivi campi di interesse, a partire dalle visite d'istruzione fino alla realizzazione di progetti specifici. Ma non solo: anche i tecnici, gli imprenditori ed, in generale, le imprese dei settori interessati potranno essere proficuamente coinvolti a vari livelli nella sperimentazione.

La disponibilità di un impianto sperimentale perfettamente funzionante, aperto a sperimentazioni nel campo della risorsa solare e della verifica della bontà di differenti tecniche di gestione non potrà non coinvolgere anche l'università bresciana, in particolare la facoltà di ingegneria, la cui collaborazione è fortemente auspicata.

Più in generale, si punta ad un rapporto permanente con l'ISES e gli altri Enti, nazionali ed internazionali, operanti nel settore ricerca e promozione dell'utilizzo dell'energia solare nelle applicazioni civili, in modo da realizzare uno scambio di informazioni e dati sulla sperimentazione in atto in Italia e in Europa riguardante gli impianti termici solari ad accumulo stagionale.

3.4. PANORAMICA IMPIANTI ESISTENTI

3.4-1. IN ITALIA

Nel marzo 2002, nel centro balneare comunale di **Melegnano**, in provincia di Milano, è stato installato un impianto solare di 200 m² per la produzione di acqua calda sanitaria per le docce e di calore per le piscine, sia in estate che in inverno.

La progettazione è frutto della collaborazione tra l'Istituto *Ambiente Italia* e la Sergio Colombo & C. S.a.s. ed è stato realizzato con il contributo (pari al 40% del costo globale) della Commissione Europea.

La tecnologia scelta è del tipo *large scale*, ovvero degli impianti di grandi dimensioni. Ad esempio, si sono utilizzati collettori modulari di 12,5 m² ciascuno ed è stata applicata una strategia di bassa portata: 10 l/m²h. In tal modo è stato possibile non solo ridurre i tempi di installazione e semplificare i circuiti idraulici dell'impianto, ma anche ottenere effetti di scala positivi in termini di prestazioni energetiche e di costi economici.

L'impianto, attualmente monitorato dalla sezione di Fisica Tecnica ambientale del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano, è un *impianto pilota*, in vista della realizzazione di ulteriori impianti, di dimensioni ancora maggiori, destinati a fornire acqua calda sanitaria e calore per riscaldamento ad intere aree residenziali.

La **Provincia di Torino** ha emanato un bando di finanziamento per impianti solari pilota di grandi dimensioni al fine di promuovere il loro utilizzo in grandi edifici multifamiliari, ospedali, residenze per anziani o per studenti, strutture turistiche.

3.4-2. IN EUROPA

Alla fine del 2002 risultavano installati circa 65 impianti solari termici di grandi dimensioni (> 500 m² di pannelli), per un totale di 110.000 m² di collettori solari, corrispondenti ad una potenza di oltre 50 MW, nella maggior parte dei casi progettati per soddisfare il fabbisogno estivo, con accumulo ad acqua di breve durata (tipicamente diurno).

Il più grande impianto di questo tipo è quello di Kungälv, in Svezia, realizzato nel 2000, che utilizza pannelli piani per 10.000 m² con un serbatoio di accumulo ad acqua di 1000 m³. Dal punto di vista della salvaguardia dell'ambiente, esso ha consentito di evitare l'emissione di 1000 t/anno di anidride carbonica nell'atmosfera.

Per quanto riguarda gli impianti ad accumulo stagionale, come riportato in dettaglio nella tabella che segue, in totale assommano a 15 (23,1%), di cui: 8 in Germania, 3 in Danimarca, 2 in Olanda, 1 in Svezia e 1 in Svizzera.

Oltre al più grande impianto ad accumulo stagionale esistente in Europa, in Germania, ad Amburgo, dal 1996 è operativo un altro importante impianto da 1,6 GWh/anno, consistente in 3000 m² di pannelli, disposti su 18 villette a schiera, con una vasca d'accumulo stagionale, interrata, in cemento, di 4500 m³.

Tab. 1 - Impianti Solari Termici in Europa di grandi dimensioni (*large scale*) e con accumulo stagionale (in ordine di dimensioni)²

IMPIANTO			PANNELLI		ACCUMULO		UTENZA	
Località Anno	Proprietario Paese	Area coperta [m ²]	Tipo	Montaggio	Tipo	Volume [m ³]	Tipo	Energia [GWh/anno]
Neckarsulm 1997	Stadtwerke Neckarsulm GERMANIA	5.044	piani	integrati nel tetto+sul tetto	ducts in soil	~25.000	edifici nuovi	1,7 (??)
Rise 2001	Rise Fjernvarme DANIMARCA	3.575	piani	sul terreno	water tank	4.000	edifici già esistenti	3,7
Hamburg 1996	Hamburger Gaswerke GERMANIA	3.000	piani	integrati nel tetto	water-filled concrete tank in ground	4.500	edifici nuovi	1,6

² Fonte: *European LSSH Network - settembre 2002*

IMPIANTO			PANNELLI		ACCUMULO		UTENZA	
Località Anno	Proprietario Paese	Area coperta [m ²]	Tipo	Montaggio	Tipo	Volume [m ³]	Tipo	Energia [GWh/anno]
2MW 2002	ENECO Energy OLANDA	2.900	piani	sul tetto	8 x 9 m3 day - storage vessels + aquifer		edifici già esistenti	3,1
Friedrichshafen 1996	Techn. Werke Friedrichsh. GERMANIA	2.700 (+1.550)	piani	sul tetto	water-filled concrete tank in ground	12.000	edifici nuovi	2,2 (4)
Groningen 1985	De Huismeester OLANDA	2.400	sottovuoto	integrati nel tetto	ducts in sand/clay	24.000	edifici nuovi	1,1
Anneberg 2002	HSB Brf Anneberg Svezia	2.400	piani	sul tetto	ducts in rock	60.000	edifici nuovi	0,7
Augsburg 1998	Bayerisches Staatsministerium GERMANIA	2.000			water gravel pit	6.000	edifici nuovi	?
Hannover- Kronsberg 2000	Avacon AG GERMANIA	1.350	piani	sul tetto	water-filled concrete tank in ground	2750	edifici nuovi	0,7
Neuchatel 1997	Swiss Fed. Off. of Statistics SVIZZERA	1.120	piani	sul tetto	water tank	2.000	edifici nuovi per uffici	?
Tubberupvænge 1991	Herlev kom. Boligselskab DANIMARCA	1.030	piani	sul terreno	water-filled buried tank	3.000	edifici nuovi	1
Rostock - B-höhe 2000	WIRO mbH GERMANIA	1.000			aquifer	20.000	edifici nuovi	0,5
Ottrupgaard 1995	Ottrupgaards Fjernvarme DANIMARCA	562	piani	sul terreno	water pit	1500	edifici nuovi	0,4
Chemnitz 1998	Solaris Verwaltungs GmbH GERMANIA	540	sottovuoto	sul tetto	water gravel pit	8.000	edifici per uffici già esistenti	0,6
Steinfurt- Borghorst 1999	W & T Bau GbR GERMANIA	510	piani	integrati nel tetto	water gravel pit	1500	edifici nuovi	0,3

4. PROGETTO

4.1. DIMENSIONAMENTO UTENZA

4.1-1. IDENTIFICAZIONE

I consumi energetici termici medi annuali per il riscaldamento dell'ITIS "Castelli", $E_{it\text{is}}$, desunti dall'analisi delle bollette del metano prima e del teleriscaldamento poi, possono assumersi pari a circa 300.000 m³ di gas metano, corrispondenti a:

$$E_{it\text{is}} = 3,01 \cdot 10^9 \text{ kcal} = 12,6 \cdot 10^{12} \text{ J} = 3,49 \cdot 10^6 \text{ kWh} .$$

Per minimizzare l'entità (ed i costi) dell'intervento senza scendere al di sotto di una scala per cui le grandezze in gioco diventerebbero poco significativi e poco trasportabili ad altre applicazioni concrete, si è scelta come utenza di riferimento del progetto *Solare ITIS* il cosiddetto "*Satellite*", un edificio a sé stante della scuola, di costruzione più recente, avente una sola mandata ed un solo ritorno delle tubazioni del riscaldamento, con conseguente semplificazione degli interventi necessari.

Come illustrato nel punto seguente, il fabbisogno termico annuale del *Satellite* corrisponde all'incirca al 6 % dei consumi totali dell'Istituto.

4.1-2. FABBISOGNO TERMICO

Dall'esame dei radiatori dell'impianto di riscaldamento esistente nel *Satellite*, assunta per la differenza $\Delta\vartheta$ tra la temperatura media dell'acqua nei caloriferi e quella ambiente due possibili valori di riferimento: 50 e 40 °C, si ricava una potenza termica installata, P_{inst} , pari a:

$$P_{inst} = \begin{cases} 93,7 \text{ kW} = 80,5 \cdot 10^3 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} & \text{con } \Delta\vartheta = 50 \text{ }^\circ\text{C} \\ 69,8 \text{ kW} = 60,0 \cdot 10^3 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} & \text{con } \Delta\vartheta = 40 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} .$$

Pertanto è ragionevole assumere, con un certo margine di sicurezza, per la potenza termica di dimensionamento, P_{sat} , il valore di:

$$P_{sat} = 100 \cdot 10^3 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 116 \text{ kW} .$$

Considerato che per Brescia si hanno **2400 gradigiorno**, con temperature di riferimento e salto termico medio dati da:

$$\begin{cases} \vartheta_{interna} = 20 \text{ }^\circ\text{C} \\ \vartheta_{esterna} = -7 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \Rightarrow \Delta\vartheta_m = 27 \text{ }^\circ\text{C} ,$$

si ottiene una energia annua utilizzata per il riscaldamento del *Satellite*, E_{SAT} data da:

$$E_{sat} = \frac{P_{sat} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 2400}{\Delta\vartheta_m} = 767 \cdot 10^9 \text{ J} = 183 \cdot 10^3 \text{ kcal} = 213 \cdot 10^3 \text{ kWh} ,$$

pari al 6,08 % del fabbisogno termico annuo di tutto l'Istituto.

In conclusione, quindi, risulta ragionevole assumere come dato base di dimensionamento dell'impianto un valore di energia termica da accumulare, estate per l'inverno, E_{acc} , dato da:

$$E_{acc} = 200 \cdot 10^6 \text{ kcal} = 837 \cdot 10^9 \text{ J} = 233 \cdot 10^3 \text{ kWh} .$$

4.2. DIMENSIONAMENTO DEI PANNELLI

4.2-1. CRITERI DI SCELTA

Il dimensionamento dei pannelli deve tenere conto della tecnica di accumulo per stratificazione, in quanto essa rende possibile diversificare la tipologia dei pannelli impiegati a seconda delle esigenze e dell'irradiazione, ottenendo in ogni caso una resa ottimale.

Si possono identificare tre tipologie di pannelli, diversi per costi e prestazioni:

- Pannelli ad alta resa:
 - vetro a basso tenore di ferro
 - superficie trattate per basso irraggiamento
 - rendimento elevato: $0,8 \div 0,9$
 - temperatura massima elevata, fino a 100°C con 800 W/m^2
 - costi intorno ai 500 €/m^2
- Pannelli a bassa resa:
 - vetro normale
 - superficie annerite
 - rendimento medio: intorno a $0,7$
 - temperatura massima 70°C con 800 W/m^2
 - costi intorno ai 250 €/m^2
- Tubi neri in polietilene
 - Vetro normale
 - Rendimento basso ($<0,5$)
 - temperatura massima 40°C con 800 W/m^2
 - costo intorno ai 50 €/m^2

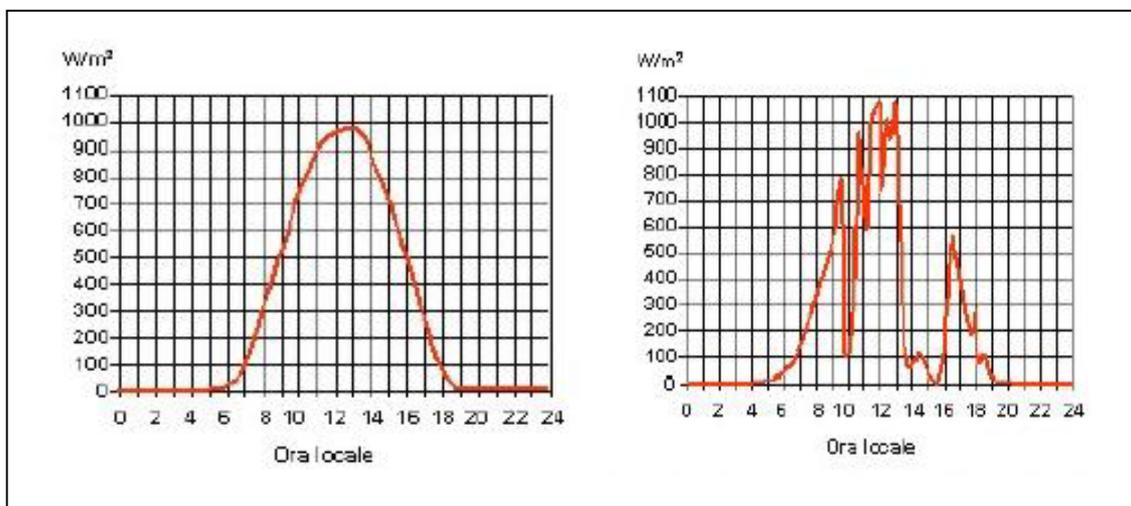
Nel dimensionamento dei pannelli ci si trova, quindi, davanti a possibili scelte diverse, fermo restando l'obiettivo di produrre l'acqua a 80°C con costi di investimento ridotti.

La possibile scelta di dimensionare tutto con pannelli di elevata qualità presenta aspetti negativi non solo sul piano economico, ma anche su quello più propriamente tecnico, in quanto per buona parte dell'anno questi verrebbero sottoutilizzati per produrre acqua a bassa temperatura.

E' possibile pensare allora di realizzare il sistema con pannelli delle diverse tipologie indicate sopra, utilizzando ciascuna di esse quando serve: i pannelli a basso costo e i tubi neri per produrre acqua fino a $40\text{-}50^{\circ}\text{C}$, mentre i pannelli ad alta resa per produrre, quando possibile, acqua ad alta temperatura, fino ad 80°C . I pannelli ad alta resa funzionerebbero anche contemporaneamente a quelli a resa più bassa (con produzione di acqua a temperatura più alta), ma non viceversa.

Tale soluzione comporta una maggiore estensione complessiva dei pannelli in m^2 rispetto a quella basata sui soli pannelli ad alta resa, ma i costi d'impianto sono sensibilmente inferiori.

4.2-2. LA FONTE SOLARE



4.2-3. LA SUPERFICIE CAPTANTE

Allo stato attuale di sviluppo della tecnologia solare³, è possibile assumere una resa energetica media giornaliera per pannello, E'_{pan} , pari a:

$$E'_{pan} = 1,7 \cdot 10^3 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{g}}$$

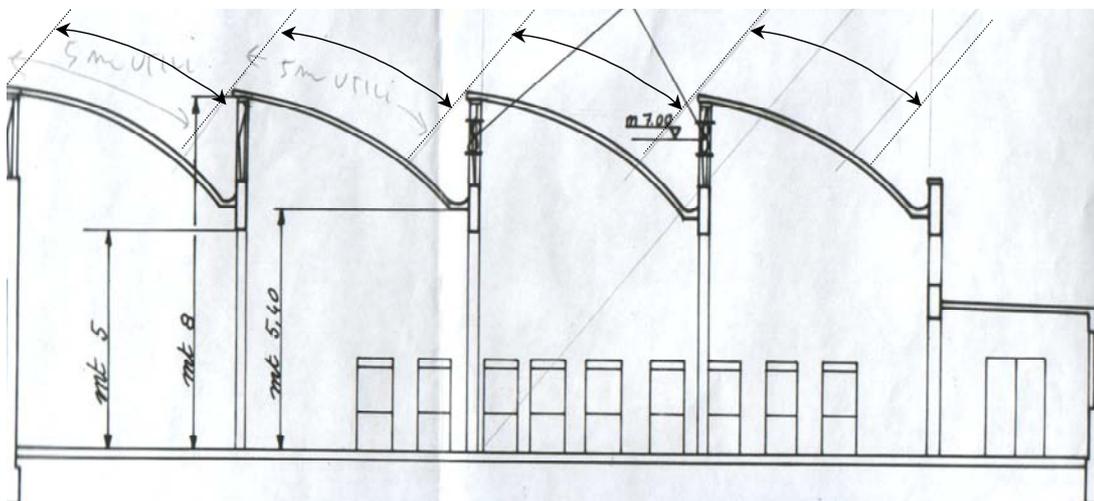
ed un periodo utile di captazione, Δt_{utile} , di 120 g.

Ciò posto, per la superficie totale, S_{pan} , dei pannelli da installare si ricava il valore:

$$S_{pan} = \frac{E_{acc}}{E'_{pan} \cdot \Delta t_{utile}} = \frac{200 \cdot 10^6}{1,7 \cdot 10^3 \cdot 120} = 980 \text{ m}^2 ,$$

arrotondata a **1000 m²**, in modo da avere un ulteriore margine di sicurezza.

corrispondenti alla ricopertura di 4 campate del tetto delle officine, ciascuna delle dimensioni di 50 x 5 m.



4.3. IL SISTEMA DI ACCUMULO

4.3-1. CRITERI GENERALI

Per l'immagazzinamento stagionale dell'energia termica prodotta dai pannelli solari si è scelto, come detto, di utilizzare un serbatoio cilindrico consistente in una cisterna con pareti in calcestruzzo, completamente interrata.

La progettazione di tale vasca di accumulo deve soddisfare a requisiti termotecnici e strutturali tali non solo da garantirne la durata nel tempo ma anche rendere possibile il monitoraggio compartivo delle diverse soluzioni impiantistiche e di gestione adottate. La valutazione della bontà delle soluzioni di accumulo del calore e del mantenimento nel tempo (per decine di anni) dell'efficienza dell'impianto è uno dei contenuti fondamentali del progetto.

Per rispondere a tali esigenze si sono operate le seguenti scelte tecniche:

- **funzione di accumulo termico affidata all'acqua** (pur essendo possibili altre soluzioni di minor ingombro, ma non ancora del tutto collaudate);
- **vasca non in pressione** con l'acqua che non lambisce la copertura per la presenza di uno strato d'aria di 50 cm. Ciò perché la costruzione di un serbatoio in grado di resistere

³ C. Rumor - G. Strohmenger; Riscaldamento, Ventilazione, Condizionamento, Recupero Energetico, Impianti Sanitari; Ed. Hoepli, Milano, 1982.

alle pressioni tipiche degli impianti termotecnica (alcuni bar) risulterebbe notevolmente più complicata e costosa con vantaggi modesti;

- per il buon utilizzo degli spazi, si propende per la soluzione **vasca interrata**, usufruendo di un ulteriore vantaggio nell'isolamento termico nella stagione invernale e di una naturale protezione dall'azione corrosiva degli agenti atmosferici;
- **serbatoio in cemento armato**: esso potrebbe essere realizzato anche in metallo, ma, dovendo resistere alla spinta del terreno anche quando è vuoto, questa scelta porterebbe ad una struttura con nervature di un certo impegno. Inoltre si dovrebbero mettere in atto misure idonee ad evitare fenomeni corrosivi (l'acqua nel serbatoio non in pressione è miscelata all'aria). La soluzione in calcestruzzo armato, da un calcolo preliminare effettuato, porta ad uno spessore di 30 cm per vasca circolare, come illustrato in dettaglio nel progetto esecutivo.
- **vasca di forma cilindrica** in quanto la più semplice in relazione alle caratteristiche strutturali. In alternativa sono possibili soluzioni a parallelepipedo con opportuni contrafforti.
- **fondo e copertura in cemento armato**, sporgenti oltre il perimetro esterno della vasca per offrire una sede protetta al materiale isolante
- **isolamento termico con pannelli di polistirolo espanso**, in quanto ragionevole compromesso tra efficienza dell'isolante e costi. Si prevede di utilizzare il **polistirolo non rigenerato**, che offre stabilità chimica nel tempo, sufficiente resistenza meccanica e basso assorbimento di acqua. Saranno, eventualmente, da valutare protezioni contro sostanze corrosive, peraltro normalmente non presenti nel terreno. L'eventuale isolamento termico del fondo potrebbe essere realizzato con calcestruzzo polistirolico, che offre una adeguata resistenza meccanica, al di sotto della piastra di fondazione.
- **monitoraggio del comportamento del serbatoio**, tramite sensori, inseriti ad altezze opportune mediante carotaggio nello spessore isolante. Si prevede di monitorare la temperatura, l'umidità e le condizioni di resistenza meccanica dell'isolante.
- **pozzo impiantistico**

4.3-2. DIMENSIONAMENTO ENERGETICO DELLA VASCA

Ricordando il valore della quantità di calore da accumulare, E_{acc} , prima determinato, e posto pari a **40 °C** il salto termico $\Delta\vartheta_{stagionale}$ tra la temperatura massima raggiunta dall'acqua nel serbatoio durante il periodo estivo ($\vartheta_{i_{max}} = 75 \text{ °C}$) e quella minima utilizzabile a fine stagione invernale ($\vartheta_{i_{min}} = 35 \text{ °C}$), è possibile calcolare la massa d'acqua necessaria e, quindi, il volume utile del serbatoio:

$$m_{acqua} = \frac{E_{acc}}{1 \cdot \Delta\vartheta_{stagionale}} = 5 \cdot 10^6 \text{ kg} \Rightarrow V_u = 5 \cdot 10^6 \text{ l} = 5,00 \cdot 10^3 \text{ m}^3.$$

Ciò posto, fissata un'altezza utile di 10 m, si otterrebbe un diametro di base di circa 25,3 m.

Ma al centro della vasca è necessario un "pozzo" impiantistico cilindrico di almeno 2 m di diametro, sia come sostegno strutturale della copertura che come vano di installazione dei punti di presa ed immissione, delle pompe, degli scambiatori di calore e di tutto quanto necessario. Tenuto conto anche dello spessore dei 2 strati di calcestruzzo della parete interna della vasca, si arriva ad un **diametro interno della parete esterna della vasca di 25,4 m** (con un volume utile effettivo di 5014 m^3).

Considerato, poi, che la presenza dello strato d'aria nella parte superiore porta l'**altezza interna** del serbatoio a **10,5 m** e che lo spessore del calcestruzzo porta l'**altezza esterna** a **11,1 m** ed il **diametro esterno** a **26 m**, il **volume globale** occupato della struttura risulta essere di circa **$5,89 \cdot 10^3 \text{ m}^3$** .

Per quanto riguarda l'isolamento termico verso il terreno circostante, si pensa di realizzarlo con blocchi di polistirolo contro terra, sia lateralmente che sulla piastra di copertura. Per la piastra di fondo, invece, considerati la bassa temperatura dello strato d'acqua con cui è a contatto ed il notevole carico meccanico cui è sottoposta, si prevede di non utilizzare alcun isolamento

particolare oppure uno strato di calcestruzzo polistirolico (resistenza meccanica minima > 10 kg/cmq) sotto la platea di fondazione. (Vedi planimetria allegata)

4.3-3. PARAMETRI DI PROGETTO

Riassumendo, sulla base delle considerazioni fino ad ora svolte, per i principali parametri di progetto del serbatoio i valori identificati sono i seguenti:

➤ Vasca in calcestruzzo

- volume utile	V_u	=	$5,00 \cdot 10^3 \text{ m}^3$
- altezza utile	h_u	=	10 m
- altezza strato superficiale aria	Δh_{aria}	=	0,5 m
- diametro pozzetto	d_{poz}	=	2 m
- spessore pareti in calcestruzzo	Δs_c	=	0,3 m
- diametro interno parete esterna	d_{tot}	=	25,4 m
- superficie disperdente laterale esterna	S_l	=	798 m ²
- superficie disperdente coperchio	S_b	=	507 m ²
- diametro totale esterno	d_{tot}	=	26,0 m
- altezza totale esterna	h_{tot}	=	11,1 m
- volume totale occupato	V_{tot}	=	$5,89 \cdot 10^3 \text{ m}^3$

➤ Isolamento in polistirolo;

- spessore superiore	Δs_{cop}	=	1 m
- spessore laterale	Δs_{lat}	=	1 m
- sottofondo calcestruzzo polistirolico	Δs_{fondo}	=	1 m

➤ Parametri termici di riferimento

- temperatura stagionale massima dell'acqua	$\vartheta_{i_{\text{max}}}$	=	75 °C
- temperatura stagionale minima dell'acqua	$\vartheta_{i_{\text{min}}}$	=	35 °C
- temperatura interna media dell'acqua	ϑ_{i_m}	=	60 °C
- temperatura esterna media del terreno	ϑ_{t_m}	=	10 °C
- temperatura invernale media dell'aria	ϑ_{a_m}	=	5 °C
- conduttività termica calcestruzzo	λ_c	≅	2,5 W/(m·°C)
- conduttività termica polistirolo	λ_p	≅	0,05 W/(m·°C)

4.3-4. DISPERSIONE TERMICA

La dispersione del calore contenuto nella vasca verso l'esterno avviene essenzialmente attraverso le superfici a contatto con il terreno: quella laterale esterna e quella superiore; si trascurano in questa fase, le perdite attraverso la piastra di fondo. (Un calcolo dettagliato della conduzione in senso discendente e del comportamento del fondo è disponibile a parte).

➤ Perdite attraverso la parete laterale esterna

Indicati con:

α_i l'adduttanza acqua/calcestruzzo, intorno a $500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$

χ_p l'insieme dei termini dovuti agli strati del terreno circostante,

è possibile determinare la conduttanza termica equivalente specifica della parete laterale della vasca con la formula:

$$K_{\text{parete}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\Delta s_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta s_{\text{lat}}}{\lambda_p} + \chi_p}$$

Trascurando il termine χ_p e, quindi, ipotizzando condizioni di dispersione del calore peggiori di quelle reali, si ottiene:

$$K_{\text{parete}} = 0,0497 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Di conseguenza, la potenza P_{parete} , mediamente dispersa attraverso la parete laterale, vale:

$$P_{\text{parete}} = K_{\text{parete}} \cdot S_l \cdot (\vartheta_{i_m} - \vartheta_{t_m}) = 1,99 \text{ kW} = 1,72 \cdot 10^3 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

➤ Perdite attraverso il coperchio superiore

Indicati con:

α_c l'adduttanza aria/calcestruzzo, intorno a $15 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

χ_c il termine dovuto al terreno sovrastante,

è possibile determinare la conduttanza termica equivalente specifica del coperchio del serbatoio:

$$K_{\text{coperchio}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c} + \frac{\Delta S_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta S_{\text{cop}}}{\lambda_p} + \chi_c}$$

Ipotizzando, anche in questo caso un certo margine in eccesso, possiamo ancora trascurare il termine χ_c , ottenendo:

$$K_{\text{coperchio}} = 0,0414 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

e, quindi, una potenza termica $P_{\text{coperchio}}$, mediamente dispersa attraverso la piastra di chiusura superiore del serbatoio, pari a:

$$P_{\text{coperchio}} = K_{\text{coperchio}} \cdot S_b \cdot (\vartheta_{i_{\text{max}}} - \vartheta_{a_m}) = 1,77 \text{ kW} = 1,53 \cdot 10^3 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

➤ Perdite totali

Sommando i due termini appena calcolati, si ottiene per la potenza totale persa, P_{persa} il seguente valore:

$$P_{\text{persa}} = P_{\text{parete}} + P_{\text{coperchio}} = 3,76 \text{ kW} = 3,25 \cdot 10^3 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

4.3-5. ENERGIA UTILE

Supponendo che l'impianto di riscaldamento sia utilizzato nel periodo invernale per 200 giorni, l'energia totale persa per dissipazione termica attraverso la parete laterale ed il coperchio della vasca di accumulo, E_{persa} , risulta:

$$\begin{aligned} E_{\text{persa}} &= P_{\text{persa}} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 200 = \\ &= 65,0 \cdot 10^9 \text{ J} = 15,5 \cdot 10^6 \text{ kcal} = 18,1 \cdot 10^3 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Pertanto, ricordando che l'energia accumulata nei 120 giorni utili del periodo estivo, E_{acc} , è pari a $200 \cdot 10^6 \text{ kcal}$, si ottiene per l'energia effettivamente utile, E_{utile} , il valore, approssimato per difetto, di:

$$E_{\text{utile}} = E_{\text{acc}} - E_{\text{persa}} = 770 \cdot 10^9 \text{ J} = 184 \cdot 10^6 \text{ kcal} = 214 \cdot 10^3 \text{ kWh}$$

con un rendimento complessivo del sistema di accumulo dato da:

$$\eta_{\text{acc}} \% = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{acc}}} \cdot 100 = 92,0 \% .$$

4.4. IL CIRCUITO IDRAULICO

Il circuito idraulico è la via di connessione tra i diversi elementi del sistema (pannelli-serbatoio-utilizzatori) e deve permettere una gestione flessibile delle risorse. Una accurata progettazione dell'impianto e una scelta accorta delle soluzioni tecniche è quindi fondamentale per garantire un impianto flessibile ed adatto alla sperimentazione di condizioni operative diverse.

L'impianto può essere suddiviso in due parti:

- connessione serbatoio-utenze
- connessione serbatoio-pannelli solari.

4.4-1. CONNESSIONE SERBATOIO-UTENZE

Come detto, l'idea fondamentale del progetto è quella dell'utilizzo della stratificazione termica dell'acqua nel serbatoio d'accumulo, cioè il prelievo dell'acqua da mandare ai radiatori alla temperatura a cui serve, senza l'eventuale miscelazione con acqua fredda.

Per fare questo sono previste quattro colonne di mandata, con relative pompe sul fondo del pozzo di servizio, e quattro di ritorno. Le colonne sono intercettate in 6 punti ad altezze diverse da valvole motorizzate in modo da consentire il prelievo e la reimmissione dell'acqua alle diverse altezze corrispondenti alle diverse temperature degli strati presenti nel serbatoio. I dati di temperatura di ciascuno strato, necessari per la corretta esecuzione delle operazioni dette, saranno forniti da appositi sensori posti nei diversi punti di prelievo e reimmissione.

La realizzazione di più colonne verso gli utilizzatori è necessaria in vista delle diverse modalità operative che si intendono sperimentare e del tipo di utilizzatori presenti nel Satellite.

Infatti, dal momento che i dispositivi attualmente presenti nell'edificio sono caloriferi di tipo tradizionale e, quindi, con temperature di funzionamento piuttosto alte (anche oltre i 70 °C), bisognerà produrre acqua calda ad 80°C, con conseguente funzionamento in condizioni di bassa resa dei pannelli solari. Ciò nonostante, si ritiene che, grazie alle soluzioni tecnico-realizzative previste, l'impianto sarà perfettamente in grado di provvedere al riscaldamento invernale del Satellite, risultando in tal modo un ottimo test di verifica di soluzioni tecnologicamente semplici ed economicamente poco costose delle problematiche dell'accumulo stagionale alle nostre latitudini e nelle nostre climatiche.

In prospettiva, però è ipotizzabile l'uso di tipologie di corpi riscaldanti più efficienti, come i pannelli a parete, che, funzionando a temperature più basse, consentano di migliorare la resa dell'impianto. La predisposizione di un secondo circuito idraulico, completamente distinto dal primo ed in grado di sfruttare il prelievo selettivo dell'acqua a temperature diverse, renderà possibile il passaggio progressivo a questa seconda tipologia, i cui effetti benefici sul piano della resa potranno essere accuratamente valutati.

Gli impianti idraulici andranno connessi all'attuale rete idraulica in modo che con la sola attivazione di poche valvole si possa passare dal vecchio impianto al nuovo e viceversa. In questo modo, inoltre, eventuali emergenze causate da un malfunzionamento dell'impianto sperimentale non si ripercuoteranno sul riscaldamento delle aule del satellite, potendo tornare immediatamente alla configurazione standard corrispondente all'attuale.

A tale scopo, in particolare, si prevede che l'attuale circuito a radiatori sia connesso al serbatoio di accumulo tramite scambiatore di calore, in modo che, in ogni caso, la pressurizzazione del circuito dei radiatori resti invariata e si mantenga l'utilizzo della pompa attualmente presente.

4.4-2. CONNESSIONE SERBATOIO-PANNELLI

Anche per questa parte dell'impianto, l'utilizzo della stratificazione in connessione con la gestione contemporanea di più sezioni di pannelli, di tipologia e caratteristiche differenti, impone la realizzazione di più colonne e relative pompe.

L'impiego di 3 circuiti idraulici distinti sembra essere quello più idoneo.

È, infatti, auspicabile la sperimentazione di pannelli a bassa, media ed alta resa, in modo da verificarne concretamente i comportamenti ed i rendimenti effettivi, anche in relazione ai costi.

Si noti che i circuiti idraulici di utilizzo e di produzione (ovvero i 6 punti di immissione ed i 6 di prelievo del disegno di massima del pozzetto) potrebbero essere parzialmente gli stessi, in quanto la produzione (periodo estivo) avviene in tempi sostanzialmente diversi rispetto all'utilizzo (periodo invernale).

Nel collegare i pannelli al serbatoio va valutata l'opportunità di inserire o meno degli scambiatori di calore.

In generale meno elementi ci sono nel circuito idraulico meglio vanno le cose in termini di temperatura ottenibile e resa dei pannelli.

Il problema in questo caso è quello del gelo invernale che, in assenza di scambiatori, costringerebbe a utilizzare liquido antigelo anche nel serbatoio.

Questo problema può essere aggirato nel caso dei pannelli a bassa resa, praticamente consistenti in semplici tubi neri, per i quali, infatti, basterà semplicemente procedere allo svuotamento invernale del liquido vettore. Pertanto, sarà sufficiente progettare la corrispondente di pannelli solari ed il relativo circuito idraulico in modo da consentire un facile ripristino del liquido ed una efficiente eliminazione dell'aria.

Purtroppo questa soluzione non è detto che sia praticabile anche per altre tipologie di pannelli.

In generale, per una scelta oculata è necessario essere in possesso di informazioni dettagliate del costruttore sulla struttura interna dei pannelli: è possibile, ad esempio, che i tempi di eliminazione dall'aria siano particolarmente lunghi a causa di piccole intercapedini o controtendenze eventualmente presenti.

In questo, come in altri possibili casi, risulta necessario l'inserimento di uno scambiatore di calore tra pannello e serbatoio, in modo limitare l'antigelo al solo circuito dei pannelli.

4.4-3. IL POZZO IMPIANTISTICO

Come già anticipato nella descrizione del progetto, all'interno della vasca è previsto un pozzo impiantistico che ha lo scopo di accogliere le connessioni con la vasca, le pompe e le valvole per la gestione della stratificazione dell'acqua.

Sono previsti 4 circuiti idraulici, con 4 pompe di mandata sul fondo, in grado di prelevare l'acqua a diverse altezze, e 4 ritorni analogamente in grado di immettere l'acqua a differenti quote (fig....). Come si nota complessivamente vi saranno ben 48 prese nel pozzo (12 per ogni circuito idraulico) e quindi la soluzione costruttiva del pozzo più idonea sembra essere quella metallica (acciaio inox) per la semplicità nella realizzazione delle prese rispetto alla soluzione in cemento. Anche la realizzazione degli altri elementi del pozzo, ripiani, scale e accessori di servizio e sicurezza non presenta particolari problemi.

4.4-4. DETTAGLIO DEI CIRCUITI IDRAULICI

La proposta di realizzare quattro differenti circuiti idraulici deriva da alcune considerazioni:

- nel periodo estivo di massima produzione possono lavorare contemporaneamente, come già detto, tutti e tre i circuiti dei pannelli solari;
- nel periodo invernale è prevedibile l'utilizzo dei due circuiti di riscaldamento e al massimo di un circuito dei pannelli solari, quello più efficiente;
- nelle stagioni intermedie è possibile ipotizzare il funzionamento dei due circuiti per il riscaldamento e di due circuiti solari.

Considerando la natura sperimentale del progetto si propone di realizzare una sorta di griglia di interconnessioni tra i vari circuiti idraulici (illustrata nelle figure allegate), che consenta l'intercambiabilità delle pompe rispetto ai circuiti. In questo modo è possibile fruire di una pompa di riserva che in caso di malfunzionamento di una pompa permette di evitare il fermo dell'impianto. La pompa, o le pompe, che vengono pensate come "jolly", cioè in grado di sostituirsi ad un'altra eventualmente non funzionante, dovranno essere azionate da un sistema ad inverter per potersi adattare alla diversa tipologia del carico.

4.5. CRITERI DI GESTIONE DEL SISTEMA

4.5-1. GESTIONE DEL SISTEMA IN FASE DI UTILIZZO

Nella fase di utilizzo, è possibile gestire il sistema di accumulo termico stagionale secondo due modalità operative di prelievo ed immissione dell'acqua nel serbatoio:

- con una sola presa di prelievo in alto ed una sola presa di immissione in basso (*prese singole*),
- utilizzando un certo numero di prese di prelievo e di immissione distribuite ad altezze opportune (*stratificazione termica*).

Nel primo caso, per molto tempo, fintanto che la temperatura media dell'acqua accumulata è inferiore alla temperatura dell'acqua di ritorno, si ha una continua miscelazione del fluido nel serbatoio, tale che, al termine della stagione, in esso risulta presente una notevole quantità d'acqua miscelata ad una temperatura media inferiore alla massima di inizio stagione.

Se, invece, si utilizza la tecnica della *stratificazione termica*, a parità di diagramma di carico, nel serbatoio si vengono a creare strati d'acqua a diversa temperatura, il cui utilizzo può essere ottimizzato nei periodi più critici della stagione invernale.

Infatti, prelevando l'acqua dalla presa corrispondente allo strato a temperatura adeguata alle esigenze e reimmettendola nella presa corrispondente allo strato a temperatura più vicina a quella dell'acqua di ritorno si impedisce il rimescolamento dell'acqua presente nel serbatoio.

In tal modo, oltre ad avere al termine della stagione una disponibilità d'acqua a temperatura elevata (eventualmente utilizzabile d'estate per usi sanitari), si ha anche una notevole quantità d'acqua a temperatura bassa (e questo migliora il rendimento dei pannelli solari che durante la stagione estiva dovranno ricaricare il serbatoio con acqua alla massima temperatura prevista di 80 °C).

I risultati della simulazione effettuata, riportati nel seguito, dimostrano che con la tecnica della *stratificazione termica*, al termine della stagione nel serbatoio è ancora presente una quantità d'acqua alla massima temperatura prevista (80 °C) ed una quantità notevole di acqua a temperatura minima di 28,34 °C.

Viceversa con la tecnica delle *prese singole* si verifica che, con portata d'acqua totale prevista, lo strato a temperatura massima (80 °C) si esaurisce e, di conseguenza, almeno per una fase del diagramma di carico, non vi è acqua a temperatura adeguata a soddisfare le richieste dell'utenza. Al termine del ciclo termico, poi, nel serbatoio resta disponibile al massimo acqua a 48,25 °C (sia pure in quantità notevole), mentre alla temperatura minima di 28,34 °C è presente una quantità d'acqua minore rispetto a prima.

4.5-1.1. Simulazione al computer

I dati e le ipotesi di riferimento, utilizzati nella simulazione delle due tecniche sopra dette sono:

➤ **Diagramma di Carico**

Si ipotizza un utilizzo di acqua pari a 15 ore al giorno per un totale di 200 giorni, così raggruppati in funzione della temperatura di mandata (di prelievo) assunta, ϑ_m :

Temperatura di mandata [°C]	Intervallo [g]
30	52
40	80
50	42
60	20
70	6

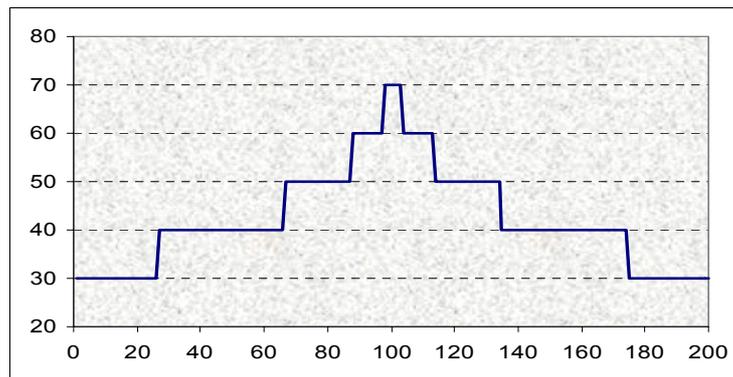
200

In base alle condizioni climatiche medie del periodo invernale di utilizzo dell'impianto, si sono identificate 10 fasi:

Fase	Intervallo [g]	Temperatura di mandata [°C]
1°	26	30
2°	40	40

Fase	Intervallo [g]	Temperatura di mandata [°C]
3°	21	50
4°	10	60
5°	3	70
6°	3	70
7°	10	60
8°	21	50
9°	40	40
10°	26	30

da cui il diagramma di carico seguente:



➤ **Serbatoio**

- altezza utile $h = 10 \text{ m}$
- diametro utile $d = 20 \text{ m}$
- volume utile $V \cong 3140 \text{ m}^3$

4.5-1.2. Utilizzo con Stratificazione Termica

➤ **Ipotesi:**

1. Il serbatoio sia dotato di 6 punti di presa per il prelievo e 6 per l'immissione, posti su livelli uniformemente distribuiti in altezza, a partire dal fondo⁴:

Livello	Altezza [m]
1	0,20
2	2,12
3	4,04
4	5,96
5	7,88
6	9,80

2. Alla fine della stagione estiva, il serbatoio si suppone pieno, con acqua tutta a 80° C.
3. Le temperatura di mandata, ϑ_m , e le corrispondenti temperature di ritorno, ϑ_r , assunte sono:

Temperature [°C]		Salto termico [°C]
mandata	ritorno	
80	70,00	10,00
70	61,67	8,333
60	53,34	6,667
50	45,00	5,000
40	36,67	3,333
30	28,34	1,667
20	20,00	0

⁴ Si ipotizza uno strato di 0,2 m sul fondo, non utilizzabile a causa di eventuali depositi di sporco, ed uno strato vuoto di 0,2 m alla sommità del serbatoio.

► Modalità di calcolo

Nella simulazione si sono determinate, in funzione del diagramma di carico, le portate Q_s di prelievo e di immissione nel serbatoio in funzione della temperatura di mandata voluta e della

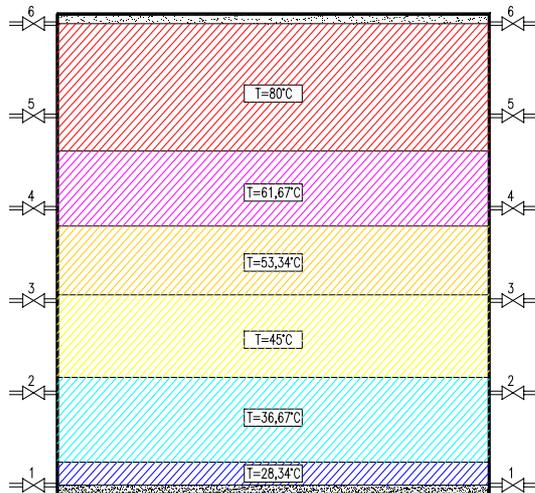
corrispondente temperatura di ritorno: $Q_s = \frac{Q_t \cdot (\vartheta_m - \vartheta_r)}{(\vartheta_s - \vartheta_r)}$, essendo:

- Q_s la portata (in l/h) da prelevare dal serbatoio e da miscelare con l'acqua di ritorno alla temperatura ϑ_r per ottenere la temperatura di mandata voluta ϑ_m ;
- Q_t la portata totale d'acqua (in l/h) da inviare al circuito di riscaldamento, assunta pari a 12.000 l/h;
- ϑ_s la temperatura dell'acqua prelevata dal serbatoio.

Avendo a disposizione più prese di prelievo e di immissione, quando possibile, è stata utilizzata l'acqua degli strati formatisi durante il ciclo di riscaldamento (a condizione che lo strato d'acqua venga a corrispondere ad una presa), in modo da preservare il più possibile l'acqua ad 80°C.

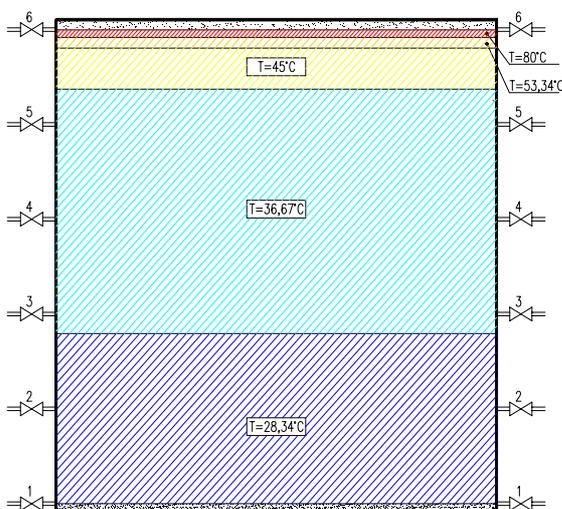
► Risultati

a) Situazione serbatoio a metà stagione (dopo 103 giorni)



STRATI		
N.	Temperatura [°C]	Spessore [m]
1	80	2,65
2	61,7	1,56
3	53,3	1,43
4	45	1,72
5	36,7	1,76
6	28,3	0,48

b) Situazione serbatoio a fine stagione

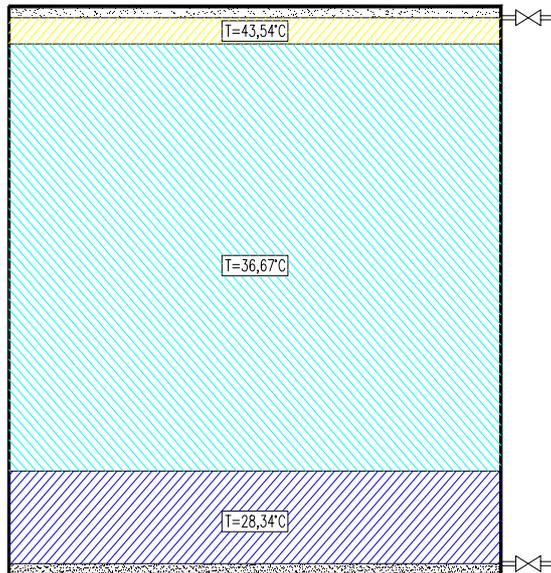


STRATI		
N.	Temperatura [°C]	Spessore [m]
1	80	0,156
2	61,7	0
3	53,3	0,214
4	45	0,830
5	36,7	4,95
6	28,3	3,45

4.5-1.3. Utilizzo senza Stratificazione Termica

I dati tecnici di riferimento sono gli stessi utilizzati nel caso della stratificazione termica. I risultati ottenuti sono i seguenti:

Situazione serbatoio a fine stagione



STRATI		
N.	Temperatura [°C]	Spessore [m]
1	80	0
3	43,5	0,45
5	36,7	7,52
6	28,3	1,63

A differenza del caso precedente, a fine stagione, nel serbatoio non vi è presenza di acqua né a 80°C, né a 61,67°C, né a 53,34°C e neppure a 45°C: al loro posto è presente un unico strato alla temperatura di 43,54°C.

Vi è, poi, una notevole quantità d'acqua alla temperatura di 36,67°C ed una certa quantità, minore che in precedenza, a 28,34 °C.

Inoltre, prima della conclusione della fase 8 del diagramma di carico, si verifica il completo esaurimento dello strato alla temperatura di 80°C: pertanto, si è costretti ad inviare nell'impianto di riscaldamento acqua a 48,25°C (massima temperatura massima disponibile nel serbatoio) nonostante la temperatura di mandata richiesta sia di 50°C.

Questo perché, disponendo di una sola presa, in tutte le fasi di utilizzo nella stagione invernale si è costretti a prelevare l'acqua sempre alla sommità del serbatoio in corrispondenza dello strato a temperatura massima.

4.5-1.4. Considerazioni conclusive

L'ipotesi del serbatoio tutto ad 80 °C all'inizio del periodo di utilizzo invernale è stata assunta per semplicità di calcolo e per fornire un riferimento chiaro ai fini del confronto. Nella realtà, si prevede un serbatoio non tutto ad 80 °C, ma di capacità maggiore (5000 m³, come indicato nei disegni). Tale scelta consente l'utilizzazione della fonte solare ai fini della ricarica dell'accumulo anche nel periodo terminale della stagione estiva.

Si sono inoltre trascurate (sempre per semplicità), da un lato la conduzione in senso discendente e la corrispondente dispersione del fondo e dall'altro l'azione di disturbo idrodinamico delle immissioni d'acqua. (Alcuni dati relativi sono disponibili separatamente; essi confermano sostanzialmente gli aspetti fondamentali).

4.5-2. GESTIONE DEL SISTEMA IN FASE DI PRODUZIONE

Per affrontare le problematiche della produzione di acqua calda per un sistema di accumulo stagionale con pannelli solari termici si analizzeranno i seguenti punti fondamentali:

- la fonte solare
- la stratificazione termica;
- la portata nei pannelli;
- la temperatura di produzione dell'acqua;

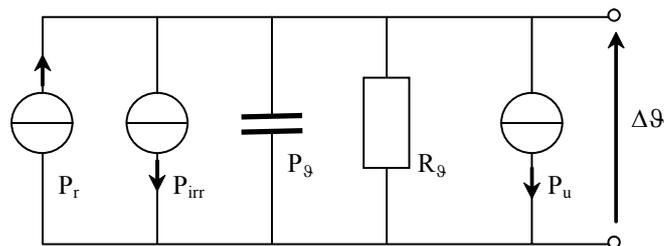
- il pannello pilota;
- la politica di produzione.

4.5-2.1. Il Modello circuitale

Come già detto l'idea qualificante del sistema di accumulo proposto è il meccanismo della stratificazione termica dell'acqua nel serbatoio di accumulo, che offre sensibili vantaggi non solo nella fase di utilizzo, ma anche nella fase di accumulo del calore.

Per comprendere quali sono le relazioni tra stratificazione e pannelli solari si deve considerare il comportamento del pannello in relazione alla radiazione solare.

Un modello circuitale, molto semplificato, del pannello termico può essere quello sotto riportato:



ove:

P_r	=	potenza radiazione solare incidente	[W]
P_{irr}	=	potenza reirradiata dal pannello	[W]
P_u	=	potenza utile trasportata dall'acqua	[W]
C_g	=	capacità termica del pannello	[J/°C]
R_g	=	resistenza termica pannello-aria	[°C/W]
ϑ_m	=	temperatura media del pannello	[°C]
ϑ_a	=	temperatura ambiente esterno	[°C]
$\Delta\vartheta$	=	salto termico $\vartheta_m - \vartheta_a$	[°C] .

Risolvendo, si ottiene :

$$\frac{d\Delta\vartheta}{dt} = \frac{1}{C_g} \cdot \left((P_r - P_{irr}) - P_u - \frac{\Delta\vartheta}{R_g} \right) ,$$

da cui, a regime, ovvero per $\frac{d\Delta\vartheta}{dt} = 0$:

$$\frac{\Delta\vartheta}{R_g} = \frac{\vartheta_m - \vartheta_a}{R_g} = (P_r - P_{irr}) - P_u .$$

Assumendo, poi, che la P_u sia nulla (pannelli funzionanti a vuoto), si ha:

$$\vartheta_m = \vartheta_{m_{max}} = \vartheta_a + (P_r - P_{irr}) \cdot R_g ,$$

cioè, il valore massimo, $\vartheta_{m_{max}}$, di temperatura media raggiungibile dai pannelli dipende dal valore della potenza netta $(P_r - P_{irr})$ assorbita.

A carico, cioè in condizioni di potenza P_u asportata dall'acqua circolante nei pannelli diversa da zero, la temperatura mediamente raggiunta dai collettori sarà minore.

In un sistema non basato sulla stratificazione termica ci si può facilmente trovare nelle condizioni di produzione di acqua calda in uscita di pannelli a temperatura più bassa di quella dello strato superiore dell'acqua nella vasca di accumulo.

In questo caso la scelta è tra produrla comunque, incrementando il livello energetico totale dell'accumulo, ma abbassandone la qualità: la temperatura media cresce ma cala quella massima, oppure non produrre acqua, sprecando risorse.

Nel caso del sistema con stratificazione invece ciò non avviene: infatti si è in grado di utilizzare quasi sempre l'acqua prodotta, in un ampio margine di temperatura, in quanto si può immetterla nel giusto strato del serbatoio, incrementando l'energia media immagazzinata senza abbassarne la qualità.

4.5-2.2. La Portata

Un secondo aspetto importante, legato alla stratificazione termica, è la gestione della portata.

Volendo produrre acqua calda a temperature prossime alla massima (cosa che può accadere in alcune situazioni), si dovrebbe utilizzare un prelievo di potenza molto basso, cioè una portata estremamente piccola. Così facendo si dovrebbe adottare un sistema di controllo della portata, con maggiori costi, sia di impianto che di gestione, ed inoltre potrebbero sorgere problemi legati alla formazione di depositi nei condotti e alla cattiva ripartizione della portata nei vari pannelli.

Una soluzione alternativa più efficiente è la seguente:

- immettere acqua fredda nei pannelli, prelevata dal fondo del serbatoio o da un altro punto ritenuto opportuno
- attendere finché non raggiunge la temperatura voluta
- immetterla nel serbatoio al giusto livello.

A questa tecnica si può dare il nome di *singolo passaggio*.

4.5-2.3. La Temperatura di Produzione

Un terzo punto di interesse è la temperatura alla quale produrre l'acqua.

Per rispondere a questo quesito è necessario parlare del rendimento di un pannello solare.

Il rendimento è definito come rapporto tra la potenza utile, P_u , prelevata dal pannello attraverso l'acqua, e la potenza incidente, P_r , della radiazione elettromagnetica.

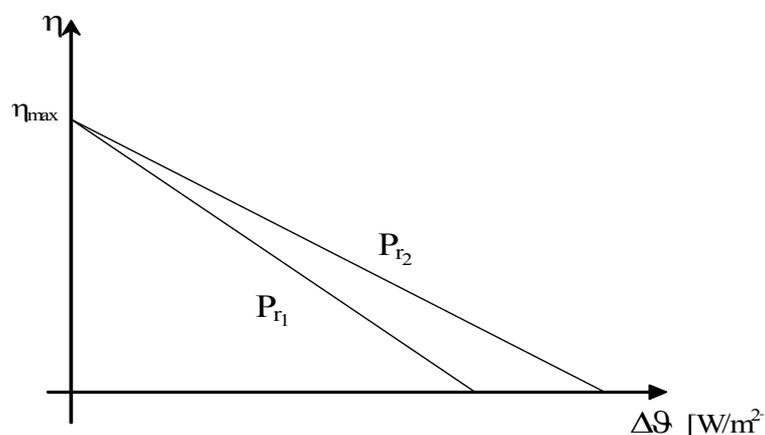
Dalle relazioni viste prima sul modello semplificato si ottiene, a regime:

$$P_u = (P_r - P_{irr}) - \frac{\Delta\theta}{R_g},$$

da cui :

$$\eta = \frac{P_u}{P_r} = \frac{(P_r - P_{irr})}{P_r} - \frac{\frac{\Delta\theta}{R_g}}{P_r}.$$

Questa relazione è sostanzialmente espressa dal seguente grafico, in cui sono riportati gli andamenti per due valori di potenza radiante incidente, P_{r1} e P_{r2} , con $P_{r2} > P_{r1}$:



Il valore di η_{\max} dipende dal tipo di pannello e nel migliore dei casi vale circa 0,8.

Il grafico ci dice che più è alta la temperatura dell'acqua prodotta più il rendimento è basso: quindi, a seconda della radiazione incidente, si dovrà scegliere di produrre acqua ad una temperatura tale da garantire un livello di rendimento accettabile, ad esempio sopra il 50%.

La determinazione di tale temperatura di lavoro, ϑ_l , può essere fatta per via analitica, però l'esperienza maturata in anni di misure, sia con pannelli in circolazione continua che in impianti a singolo passaggio, porta a definire una temperatura ottimale per la produzione di acqua data da:

$$\vartheta_l = \vartheta_a + \frac{2}{3} (\vartheta_{m_{\max}} - \vartheta_a) ,$$

dove :

ϑ_a	=	temperatura ambiente esterno	[°C]
ϑ_l	=	temperatura di lavoro	[°C]
$\vartheta_{m_{\max}}$	=	temperatura massima dal pannello (in assenza di produzione di acqua calda)	[°C]

L'applicazione pratica di tale formula comporta la necessità di utilizzare un certo numero di sensori di temperatura opportunamente disposti.

4.5-2.4. Il Pannello Pilota

Per determinare il valore di $\vartheta_{m_{\max}}$, ovvero della temperatura massima raggiungibile dal pannello a vuoto, si può far ricorso ad un pannello (*pannello pilota*) avente le stesse caratteristiche funzionali, in particolare di assorbimento e reirradiazione, di quelli principali, ma di minori dimensioni e non attraversato dall'acqua.

Un sensore di temperatura montato direttamente sul pannello fornirà questo importante parametro in tempo reale, permettendo di ridefinire la temperatura dell'acqua prodotta al variare delle condizioni istantanee di irraggiamento.

4.5-2.5. La politica di Produzione

Dal punto precedente si potrebbe pensare che la relazione presentata risolva il problema della temperatura di produzione dell'acqua.

Non è così.

Infatti la relazione dice solo a quale temperatura sarebbe conveniente produrre acqua per avere un rendimento accettabile, ma non è detto che questa sia la temperatura alla quale effettivamente produrla. In primo luogo, non è esclusa la possibilità di produrla a temperatura più alta, se si è disponibili a pagare il prezzo di un minor rendimento, considerato che la risorsa è gratuita.

Il problema si interseca, quindi, con la stratificazione nel serbatoio ma anche con l'andamento stagionale e giornaliero di irradiazione. Infatti il discorso fatto per l'utilizzo sulla distribuzione della temperatura dell'acqua mandata ai caloriferi si ripete in modo del tutto analogo per la temperatura massima disponibile per la produzione, solo sfasato di 6 mesi.

In marzo e aprile si avrà una $\vartheta_{m_{\max}}$ più bassa che in giugno e luglio e di nuovo in settembre ottobre la $\vartheta_{m_{\max}}$ tenderà a diminuire.

All'inizio della stagione si può considerare accettabile produrre acqua alla temperatura più adatta per ottimizzare il rendimento, ma se nel mese di agosto non si è ancora prodotta la quantità di acqua a temperatura elevata 80°C necessaria allora sarà bene produrla a qualsiasi prezzo, anche con rendimenti bassi.

La politica di produzione è quindi un punto importante che può essere approfondito secondo differenti approcci.