



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Realizzazione dell' impianto di solar cooling dell' edificio F51 del  
centro ENEA della Casaccia - Monitoraggio dell'Impianto

*A. Simonetti, G. Corallo, R. Caria, L. Cipolletta*

Report RdS/2010/x 210

REALIZZAZIONE DELL' IMPIANTO DI SOLAR COOLING DELL' EDIFICIO F51 DEL CENTRO  
ENEA DELLA CASACCIA - MONITORAGGIO DELL'IMPIANTO

A. Simonetti, G. Corallo, R. Caria, L. Cipolletta (ENEA)

Settembre 2010

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi Finali

Tema: Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistita da fonti rinnovabili

Responsabile Tema: Nicolandrea Calabrese, ENEA

# Indice

---

1. Introduzione
2. Descrizione dell' edificio F51
3. Dati realizzativi dell'impianto
4. Simulazione dinamica edificio-impianto
5. Sistema di controllo ed acquisizione dati
6. Interventi di adeguamento sull'Impianto esistente
7. Dati di monitoraggio
8. Conclusioni

## 1.Introduzione

Tra le attività svolte nella precedente annualità del presente Accordo di Programma (Rif. Tema di Ricerca 5.4.4.7-8:”Studio e dimostrazione di forme di finanza innovativa e di strumenti di programmazione e pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici a scala territoriale ed urbana”) c’è stato il completamento dell’installazione dell’impianto di *Solar Cooling* nell’edificio F51 del CR ENEA Casaccia.

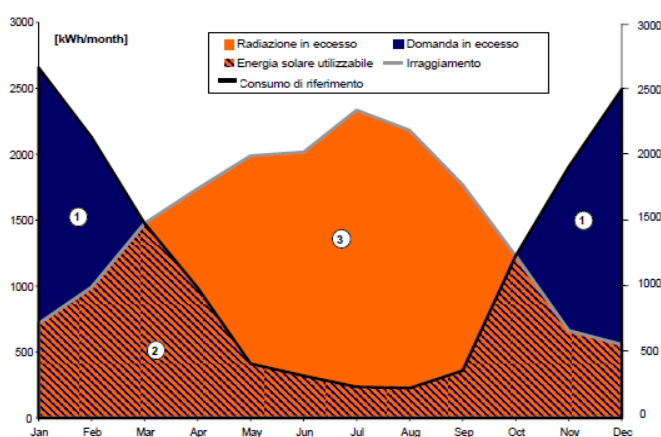
L’utilizzazione di una fonte rinnovabile come l’energia solare può diventare interessante da un punto di vista economico e di fattibilità tecnica, se il fabbisogno di energia per la climatizzazione, sia invernale che estiva risulta contenuto, come d’altra parte risultava chiaro a coloro che nel 1982, nell’ambito di una attività di ricerca sull’uso delle energie da fonte rinnovabile, hanno realizzato l’edificio F51 avendo come obiettivo “... la realizzazione di un edificio sperimentale a forte coibentazione con elementi di solarizzazione attiva e passiva ...”.

L’interesse dal punto di vista economico, esprimibile in termini di “pay-back”, è rappresentato dall’intervallo di tempo necessario affinché il capitale iniziale investito, per gli interventi (sia strutturali che impiantistici) necessari a realizzare un insieme edificio-impianto in grado di utilizzare la fonte rinnovabile, viene eguagliato dai risparmi ottenuti sui consumi delle fonti primarie necessarie ad assicurare i fabbisogni energetici di climatizzazione conformi agli standard qualitativi prescritti dalle normative vigenti.

La motivazione a valutare l’interesse economico dell’uso delle fonti rinnovabili risiede principalmente nel costo crescente delle fonti energetiche utilizzate per soddisfare gli standard qualitativi di climatizzazione; infatti, si deve rilevare che il tendenziale aumento del costo delle fonti energetiche è un fattore in comune tra la sperimentazione attuale e quella portata avanti negli anni 80 da coloro che realizzarono l’edificio F51.

Alla motivazione appena descritta si aggiungono altre e più attuali motivazioni tra le quali l’impegno assunto, mediante accordi internazionali, dai Paesi Industrializzati a diminuire la produzione di gas serra (obbiettivo raggiungibile con la diminuzione dei consumi di combustibili fossili utilizzati direttamente o, indirettamente, per la produzione di energia elettrica) e quella, di carattere più nazionale, di ridurre i consumi di energia elettrica nei settori terziario e residenziale a causa dell’aumento della potenza complessiva richiesta osservato negli ultimi anni, sia in inverno che in estate, che è andata avvicinandosi alla capacità limite di potenza erogabile dal sistema elettrico nazionale.

La fattibilità tecnica di un intervento che prevede l’uso dell’energia solare termica non può



Fonte: ITW - Graz

Fig. 1 Radiazione disponibile e richiesta

prescindere dalle caratteristiche peculiari di detta sorgente che il senso comune intuitivamente associa al riscaldamento in primo luogo dell’acqua utilizzata a scopi sanitari ed, in secondo luogo, a quello degli ambienti residenziali. Paradossalmente, l’irraggiamento solare ha il valore più elevato in estate e, pertanto, potrebbe dare le massime prestazioni quando le richieste di utilizzazione sono minime (vedi grafico Fig 1) (1).

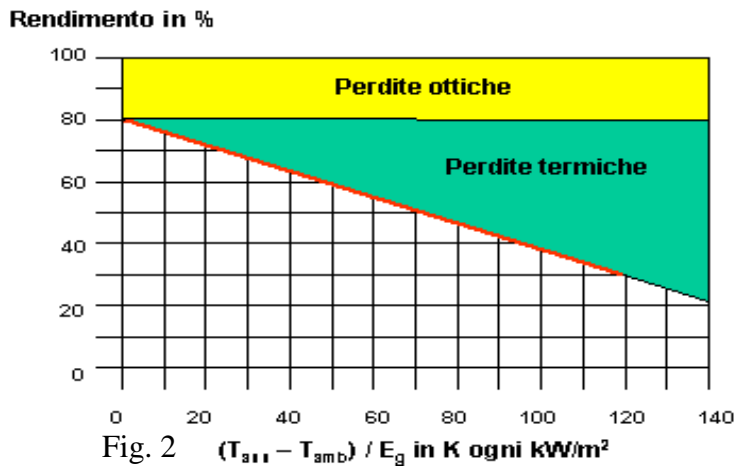


Fig. 2  $(T_{s,11} - T_{amb}) / E_g$  in K ogni  $kW/m^2$

dell'energia solare termica ha la sorgente maggiormente disponibile quando apparentemente non serve e lo strumento per utilizzarla, il pannello solare termico, fornisce le prestazioni peggiori quando serve.

Parimenti, i rendimenti dei pannelli solari termici tendenzialmente diminuiscono (vedi Fig. 2), talvolta anche in maniera sensibile, quando la differenza tra la temperatura media interna del pannello e quella dell'aria esterna aumenta e l'irraggiamento solare diminuisce cioè in inverno (2) (3).

Insomma, l'utilizzazione

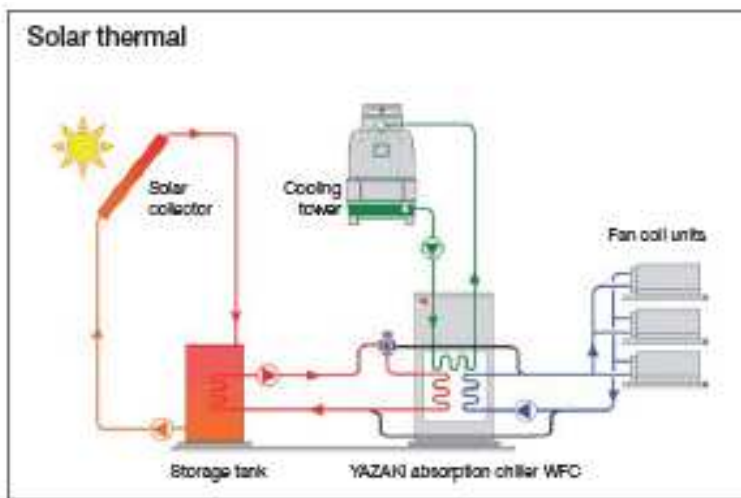


Fig. 3 Impianto Solar Cooling tipo

La ricerca sull'uso dell'energia solare termica non è nuova e, in particolare, non si è concentrata unicamente sull'utilizzazione più intuitiva (5) (6), in particolar modo quella che prevede l'uso di "... elementi di solarizzazione attiva ..." per il riscaldamento, ma, nel corso degli anni, si è cercato di trovare soluzioni tecnologiche in grado di eliminare le situazioni paradossali ovvero utilizzare l'energia solare termica in primo luogo per la climatizzazione estiva.

Le tecnologie che permettono la climatizzazione estiva degli edifici massimizzando l'utilizzazione dell'energia solare termica che sono note come *Solar Cooling* non sono una novità (4) anche se, ancora oggi, devono la loro scarsa diffusione per la maggiore complicazione impiantistica rispetto alle tecnologie che utilizzano l'energia solare per il solo riscaldamento.

La tipologia di impianto maggiormente utilizzata è quella basata sull'impiego di pannelli solari termici accoppiati a cicli termodinamici chiusi (Fig. 3), quali quelli delle macchine frigorifere ad assorbimento che utilizzano l'energia termica per produrre l'effetto frigorifero come illustrato nello schema di funzionamento della Fig. 4.

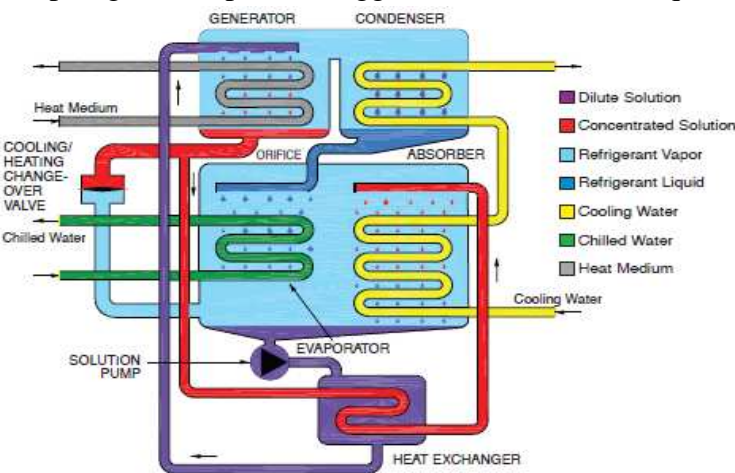


Fig. 4 – Rappresentazione ciclo ad assorbimento

Non si ripeteranno in questa sede le considerazioni svolte in altri rapporti sulle varie tipologie di macchine e loro combinazioni utilizzate nel *Solar Cooling*, ma si vuole focalizzare l'attenzione su

alcune problematiche che si incontrano con l'uso dell'energia solare termica in un contesto quale quello della climatizzazione degli ambienti residenziale e terziario.

La variabilità dei carichi frigoriferi e di riscaldamento richiesti negli edifici residenziali o terziari, a parte quelli dovuti, per trasmissione e irraggiamento, alle caratteristiche della struttura, non è sempre di facile determinazione a causa della variabilità dei carichi connessi alla presenza delle persone ed alle relative attività connesse (l'uso di computer, illuminazione ecc.). D'altra parte, mentre l'uso delle tecnologie convenzionali consente di seguire la variabilità dei carichi in maniera relativamente semplice, ad esempio con un controllo ON/OFF sull'alimentazione dell'energia utilizzata dalle relative macchine, nell'uso dell'energia solare termica, come ovvio, ciò non è possibile.

Inoltre, l'energia solare non ha un andamento costante nel tempo ed, in generale, l'irraggiamento massimo in estate si presenta in coincidenza di una tendenza alla diminuzione dei carichi dovuti alla presenza di persone (ad esempio nelle pause pranzo e nei periodi di ferie) che rappresentano in generale circa il 20-30% del carico frigo totale.

Pertanto, nell'uso dell'energia solare termica sono previsti accumuli termici che provvedono a creare una inerzia termica del sistema che non può essere grande a piacere come del resto non possono installarsi superfici estese di pannelli solari in quanto, specie negli edifici esistenti, comportano la necessità di spazi che devono essere compatibili con quelli disponibili, oltre che far risultare minima la funzione obiettivo relativa al "pay-back" dell'impianto (4) (9) (10).

In tali condizioni, assume un'importanza fondamentale il sistema di controllo dell'impianto di *Solar Cooling* che deve poter permettere al sistema di accumulare energia fin quando è possibile dalla capacità termica degli accumuli e cominciare a dissipare l'energia solare quando ciò non è più possibile mediante un sistema di smaltimento che eviti il fenomeno della stagnazione che compromette, talvolta in modo irreversibile, il rendimento dei pannelli solari (8).

Si deve rilevare che tra le tante motivazioni che non hanno reso attraente, anche nel passato, il *Solar Cooling*, a parte il costo iniziale rilevante delle apparecchiature fondamentali (Pannelli solari e macchina frigorifera ad assorbimento) c'è stato il problema della gestione dell'impianto che richiedeva un sistema di controllo abbastanza affidabile da risultare più costoso rispetto a quello di un impianto convenzionale (5).

Pertanto, la maggiore diffusione di pannelli solari a rendimento quasi costante (ad esempio quelli che utilizzano la tecnologia dei tubi evacuati) con costi tendenzialmente in diminuzione e la possibilità odierna di utilizzare sistemi di controllo potenzialmente sofisticati ed affidabili a costi contenuti potrebbero rendere questa particolare soluzione del *Solar Cooling* più attraente specialmente per la ristrutturazione degli edifici esistenti in cui siano disponibili spazi per l'installazione di pannelli solari e per gli accumuli termici. Tra l'altro, l'attività di implementazione o "retrofit" di un impianto inserisce l'impianto di *Solar Cooling* in quello esistente creando un "ibrido impiantistico" che ha come obiettivo l'utilizzazione di una fonte rinnovabile e la diminuzione dei consumi di energia elettrica.

Nella presente annualità, come previsto dall'Accordo di Programma citato, è stata completata l'installazione del sistema di controllo dell'impianto e quello di acquisizione dati a servizio dell'impianto di *Solar Cooling* installato lo scorso anno.

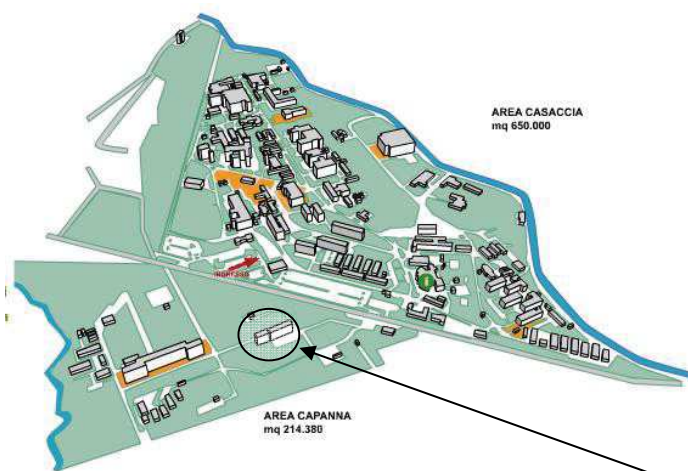
Il completamento del sistema di controllo e di acquisizione dati ha consentito l'inizio delle attività di monitoraggio sull'impianto realizzato.

## 2. Descrizione dell'edificio F51

L'edificio F51, con destinazione d'uso ad uffici, è ubicato nell'area Capanna del CR ENEA-Casaccia ed è stato realizzato tra il 1982 ed il 1983 per finalità sperimentali.

Dai dati realizzativi recentemente acquisiti dagli archivi del CR della Casaccia e dagli accertamenti effettuati mediante carotaggi nel corso dell'installazione dell'Impianto di *Solar Cooling*, l'edificio F51 risulta avere una struttura di buona costruzione dal punto di vista dell'efficienza energetica, diversamente da quanto descritto in un precedente rapporto (Report RSE/2009/55). Quest'ultima circostanza di fatto non inficia, come si vedrà nel seguito, il risultato della sperimentazione relativo alle soluzioni impiantistiche proposte nel rapporto tecnico citato ma diminuisce la quantità degli interventi strutturali ivi proposti.

Infatti, dalla documentazione acquisita dagli archivi il contratto d'Appalto per la sua realizzazione, stipulato il 28 Maggio 1981, aveva per oggetto "... la realizzazione di un edificio



sperimentale a forte coibentazione con elementi di solarizzazione attiva e passiva ...". Il costo complessivo di realizzazione dell'immobile, comprensivo degli impianti, fu di Lire 643.900.000 e comprendeva anche la realizzazione di veneziane esterne sugli infissi installati sul fronte Sud, con lo scopo di contenere il carico termico estivo limitandone la componente derivata dall'irraggiamento solare.



Fig.5 Ubicazione Edificio F51

L'edificio a pianta rettangolare delle dimensioni di 48,2 mt di lunghezza per 12,2 di larghezza ha un'altezza di circa 7 mt ed ha l'asse trasversale orientato con l'asse Nord-Sud.

Fig.2

Tab. 1 - Caratteristiche Principali Edificio F51

Superficie Edificio	mq	588
Superficie involucro	mq	1937
Volume lordo	mc	4116
Fattore di forma		0,47
Superficie ambienti riscaldati	mq	1176
Volume ambienti climatizzati	mc	3175

Le strutture verticali dell'edificio sono costituite da pilastri prefabbricati in cemento armato incastrati alle fondazioni e dotati di capitelli predisposti per l'appoggio in senso longitudinale e trasversale dei solai e delle relative travi d'appoggio, anch'esse

prefabbricate, realizzate in cemento armato precompresso.

Le strutture orizzontali del primo piano di calpestio (Piano terra) ad eccezione del locale della centrale Termica, sono state realizzate con travetti prefabbricati in cemento armato, laterizio di

alleggerimento e getto di completamento e caldana in conglomerato cementizio a cui è stato aggiunto un massetto coibente di cemento cellulare dello spessore di circa 5 cm.

Il solaio di calpestio della centrale termica è stato realizzato mediante un massetto di cemento cellulare di circa 15 cm di spessore posato su un piano di stabilizzato.

Le altre strutture orizzontali (il Piano intermedio e quello di copertura) sono state realizzate con lastre di solaio prefabbricato tipo predalles coibentate con pannelli di polistirolo dello spessore di circa 15 cm.

La copertura dell'edificio, a partire dall'estradosso, è stata realizzata mediante un massetto di cemento cellulare dello spessore medio di circa 18 cm a cui è sovrapposta l'impermeabilizzazione e la pavimentazione realizzata con marmette.

Le tamponature esterne sono costituite da una doppia parete ed una intercapedine con interposta una lastra di poliuretano dello spessore di circa 6 cm. La parete esterna è costituita da una lastra nervata realizzata in calcestruzzo precompresso con inerti di argilla espansa mentre la parete interna dello spessore di circa 6 cm è stata realizzata mediante due lastre di cartongesso con interposto una struttura interna alveolare di cartone.

Gli infissi sono stati realizzati in alluminio anodizzato e vetrocamera con intercapedine di 12 mm e spessore del vetro di 4mm.

Da quanto sopra descritto si può evincere che l'edificio è stato realizzato con criteri costruttivi, lungimiranti, dal punto di vista del contenimento dei consumi energetici, tanto da ottenere valori dei coefficienti di trasmissione termica molto prossimi a quelli richiesti attualmente dalla normativa vigente (D.Lgs 311/06) per i nuovi edifici e per quelli soggetti ad interventi di riqualificazione energetica ; infatti, nella relazione tecnica allegata al contratto di cui sopra venivano riportati i seguenti valori dei coefficienti di trasmissione termica:

- 1) Tamponature esterne  $K=0.52$  (Kcal/H mq °C) = **0.60** (W/mqK)
- 2) Copertura  $K=0.48$  (Kcal/H mq °C) = **0.56** (W/mqK)
- 3) Infissi  $K=2.50$  (Kcal/H mq °C) = **2.90** (W/mqK)

Si deve rilevare che i valori dei coefficienti di trasmissione sopra riportati di cui ai punti 1) e 2) sono superiori di circa il 20% rispetto a quelli prescritti dall'allegato B del Dlgs 311/06 per gli edifici costruiti tra il 1/01/2006 ed il 1/01/2009, mentre per quello di cui al punto 3) risulta inferiore di circa il 6.9% a quello prescritto del citato allegato.



### 3. Dati realizzativi dell'Impianto

L'impianto di *Solar Cooling* realizzato nell'edificio F51, è stato installato implementando l'impianto di climatizzazione esistente (Fig.6) costituito da una caldaia a gas naturale per il riscaldamento invernale, di un gruppo frigorifero per il raffrescamento estivo ed una distribuzione del tipo ad aria primaria e ventilconvettori .

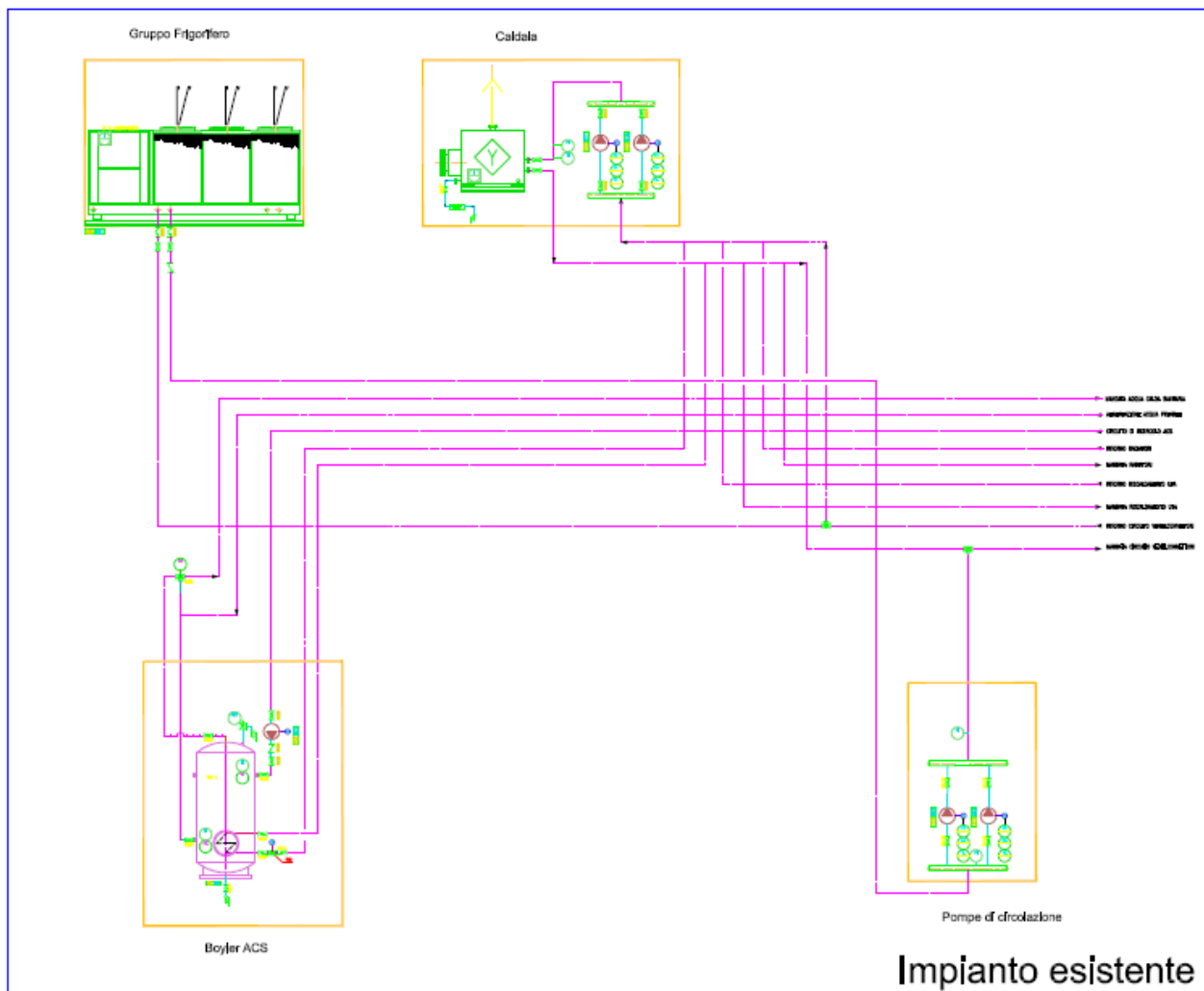


Fig.6 Impianto esistente prima della modifica

L'implementazione o "retrofit" dell'impianto esistente con il *Solar Cooling* è stato realizzato utilizzando apparecchiature e macchine commerciali di facile reperimento sul mercato ed è stato caratterizzato dai seguenti interventi principali,:

- 1) Installazione di un campo solare realizzato con pannelli solari a tubi evacuati;
- 2) Installazione di un accumulo di energia termica costituito da due serbatoi da 1500 lt ciascuno;
- 3) Installazione di un gruppo frigo ad assorbimento da 70 KW alimentato in parte dall'energia termica prodotta dal campo solare ed in parte dalla caldaia a gas metano esistente;
- 4) Installazione di un accumulo di acqua refrigerata prodotta dal gruppo frigorifero ad assorbimento costituito da un serbatoio da 2000 lt;
- 5) Installazione di una Torre evaporativa a servizio del Gruppo frigo ad assorbimento;

6) Installazione di un sistema di controllo ed acquisizione dei dati di funzionamento.

Pertanto, l'impianto attualmente realizzato è quello rappresentato nello schema di fig. 7.



Torre evaporativa



Gruppo Frigo Assorbimento



Serbatoi di accumulo a. fredda

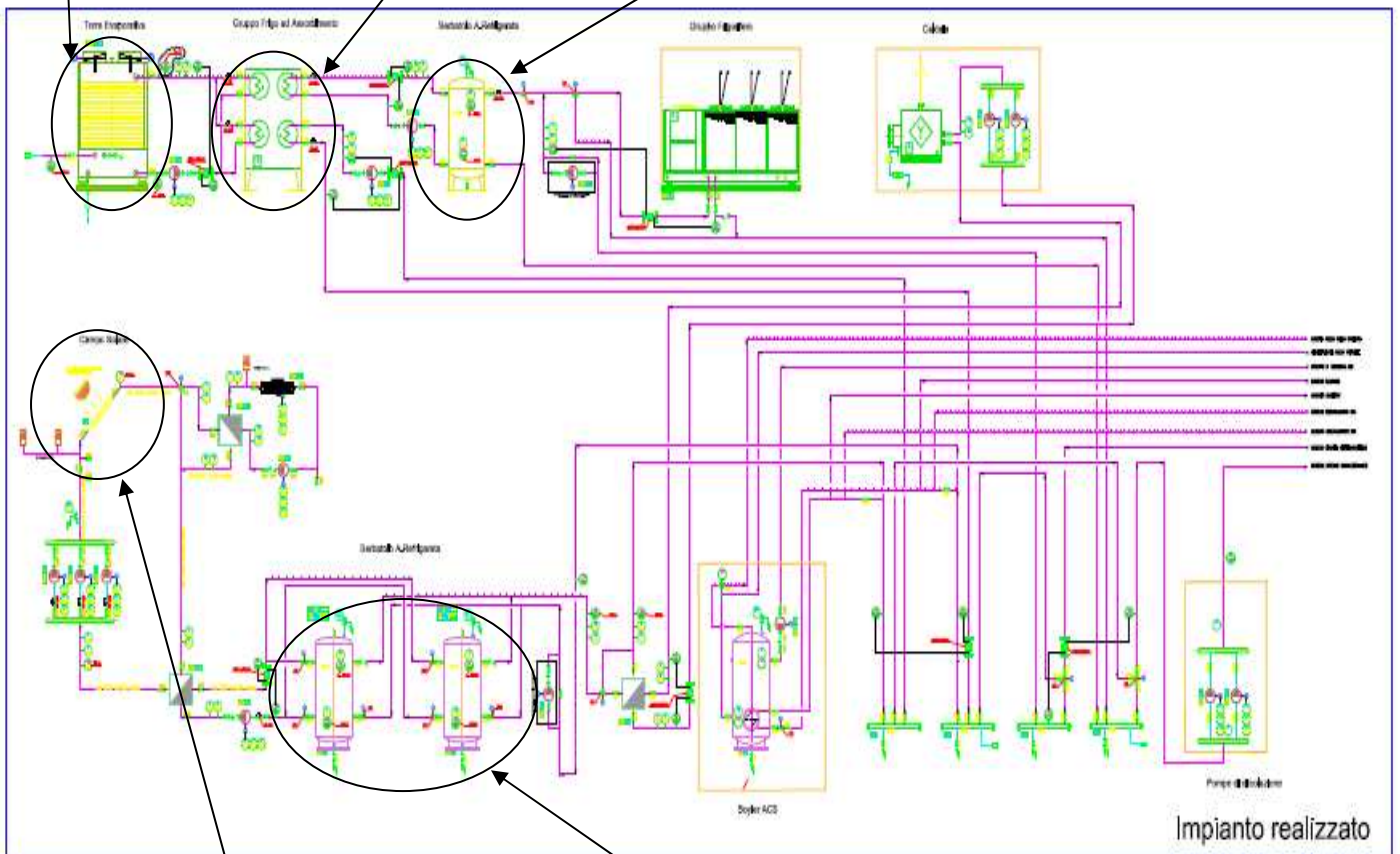


Fig.7 Impianto *Solar Cooling* realizzato



Campo Solare



Serbatoi di accumulo termico

### 3.1 Campo Solare

Il campo solare è stato realizzato con i pannelli solari a tubi evacuati modello SKY 21 (Fig. 8,9,10) prodotti dalla ditta Kloben le cui le caratteristiche vengono riportate nello stralcio del test Report emesso dall'ITW di Stoccarda.

Prüfbericht-Nr. / test report no.: 07COL623/1  
 Datum / date: 14.01.2008

#### Anhang C.3: Leistungskurve für SKY 21 CPC 58

Annex C.3: Power curve for SKY 21 CPC 58

**Bestimmung der Kollektorleistung:**  
 Determination of power per collector unit:

$$\dot{Q} = A \cdot G^* \left( \eta_0 - a_1 \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)}{G^*} - a_2 \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)^2}{G^*} \right)$$

mit / with:

Aperturfläche pro Kollektormodul / aperture area per collector unit

A = 3.31 m<sup>2</sup>

Konversionsfaktor / conversion factor

$\eta_0 = 0.718$

Wärmedurchgangskoeffizient / heat transfer coefficient

$a_1 = 0.974 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient /

temperature depending heat transfer coefficient

$a_2 = 0.005 \text{ W/(m}^2\text{K}^2)$

Peakleistung  $W_{\text{peak}}$  ( $G^* = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $(\vartheta_m - \vartheta_a) = 0$ ) pro Kollektormodul:

2377 W

Peak Power  $W_{\text{peak}}$  ( $G^* = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $(\vartheta_m - \vartheta_a) = 0$ ) per collector unit:

2377 W

#### Kollektorleistung pro Modul [W]

Power output per collector unit [W]

$\vartheta_m - \vartheta_a$ in [K]	Bestrahlungsstärke / Irradiance		
	400 W/m <sup>2</sup>	700 W/m <sup>2</sup>	1000 W/m <sup>2</sup>
0	951	1664	2377
20	880	1593	2305
40	795	1508	2221
60	698	1411	2124
80	587	1300	2013
100	463	1176	1889

Anmerkung: Die angegebenen Werte beziehen sich auf senkrechte Einstrahlung

Note: the reported values are for normal incidence

Dai dati caratteristici si rileva che il pannello solare dell'area di 3.31 mq con un irraggiamento di 1000 W/mq è in grado di produrre 570 W/mq (1889 W per pannello).

Sono stati installati di 30 pannelli e, pertanto, la superficie complessiva è di 99.3 mq che con un irraggiamento di 1000 W/mq (valore tipicamente estivo) può produrre 56.6 KW mentre con 400 W/mq (valore tipicamente invernale) produce 13.9 KW.

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) • Pfaffenwaldring 6 • 70550 Stuttgart  
 Tel. 0049(0)711/685-63536 • Fax 0049(0)711/685-63503 • e-mail: tzs@itw.uni-stuttgart.de

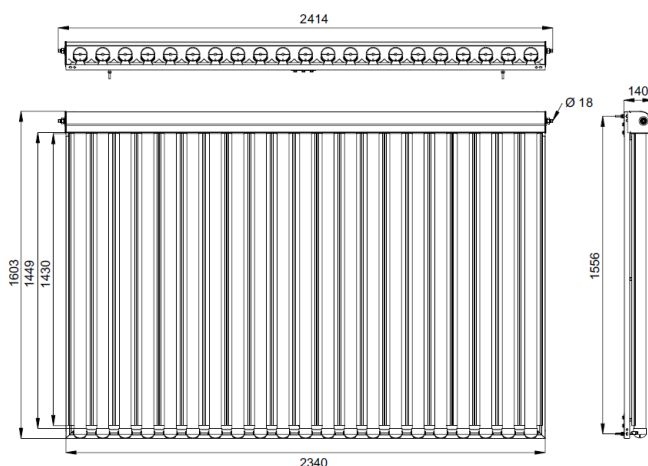


Fig. 8 Dimensioni Pannello SKY 21

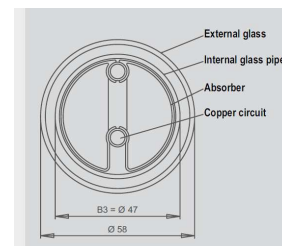


Fig. 9 Sezione Tubo evacuato

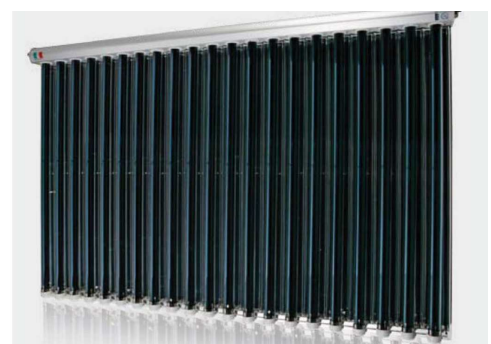
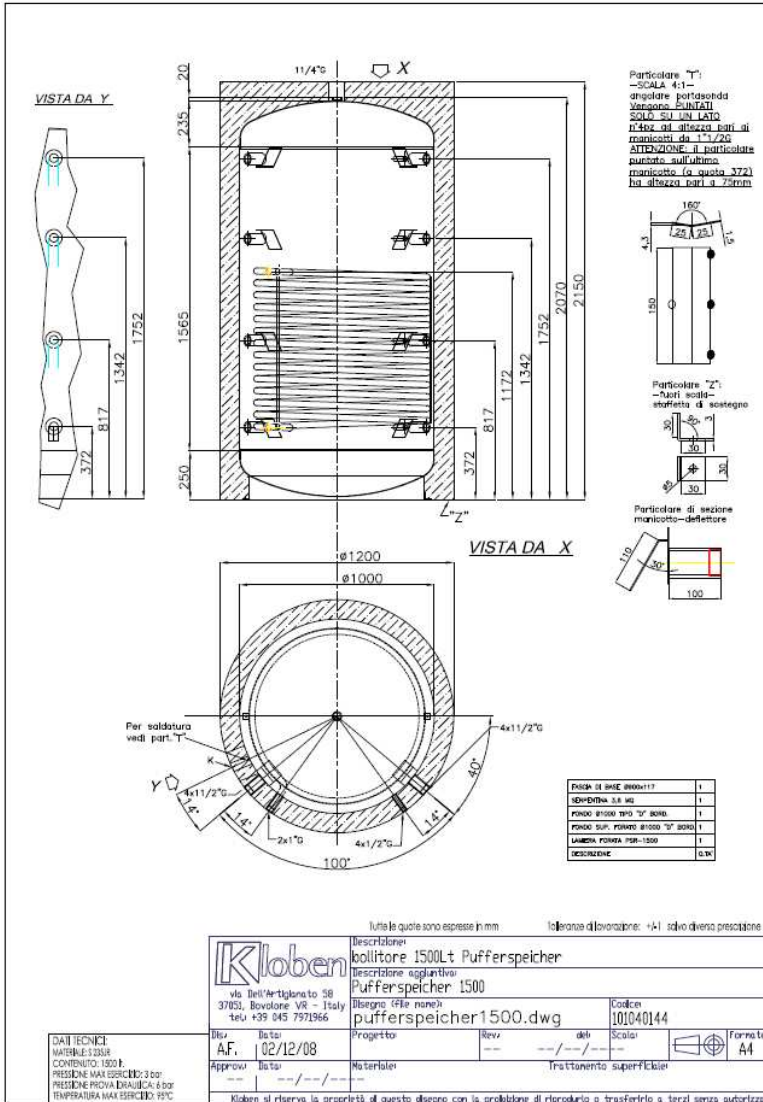


Fig. 10 Pannello SKY 21

### 3.2 Accumuli termici

Gli accumuli termici, sia quelli dell'acqua calda che di quella refrigerata, sono stati realizzati con serbatoi prodotti dalla ditta Kloben le cui caratteristiche dimensionali sono riportate nel disegno allegato (Fig. 11).



Il volume dei due recipienti dell'acqua calda è di 1500 lt mentre quello dell'acqua refrigerata è di 2000 lt.

I serbatoi dell'acqua calda sono stati installati nella locale tecnico mentre il serbatoio dell'acqua refrigerata è stato installato all'esterno vicino al gruppo frigo ad assorbimento.

Fig. 11 – Dimensione Serbatoio d'accumulo termico

### 3.3 Gruppo frigorifero ad assorbimento

Il Gruppo frigorifero ad assorbimento installato è il modello WFC SC20 prodotto dalla Yazaki che eroga una potenza frigorifera di circa 70 KW con una potenza termica di alimentazione di 100 KW e di acqua calda di alimentazione alla temperatura di 88 °C.

Modello		WFC-SC 10	WFC-SC 20	WFC-SC 30		
Potenza frigorifera		kW	35	70	105	
Acqua refrigerata	Temperatura	Ingresso °C		12,5		
		Uscita °C		7		
	Perdite di carico	kPa	56,1	65,8	70,1	
	Pressione massima di lavoro	kPa		588		
	Portata nominale	l/s	1,53	3,06	4,58	
Acqua raffreddamento	Temperatura	Ingresso °C		31		
		Uscita °C		35		
	Perdite di carico	kPa	85,3	45,3	46,4	
	Fattore sporcamento	M <sup>2</sup> h <sup>2</sup> K/kW		0,086		
	Pressione massima di lavoro	kPa		588		
Acqua calda	Temperatura	Ingresso °C		88		
		Uscita °C		83		
	Range °C		Min. 70 – Max. 95			
	Perdite di carico	kPa	90,4	46,4	60,4	
	Pressione massima di lavoro	kPa		588		
Alimentazione elettrica	Potenza	W	210	260	310	
		Intensità di corrente	A	0,43	0,92	1,25
	Controllo	Refrigerazione		ON - OFF		
		Larghezza	mm	760	1.060	1.380
		Profondità	mm	970	1.300	1.545
Dimensioni	Altezza (compresa piastra di fissaggio)	mm	1.920	2.030	2.065	
	Peso	A vuoto	kg	500	930	1.450
		In esercizio	kg	604	1.156	1.801
Rumorosità	Livello sonoro dB(A) a 1 metro		46	49	52	
	Circuito acqua refrigerata	mm	DN 40	DN 50	DN 50	
Diametro tubazioni (A)	Circuito acqua di raffreddamento	mm	DN 50	DN 50	DN 65	
	Circuito acqua calda	mm	DN 40	DN 50	DN 65	
Armadio	Impermeabile idoneo ad installazione all'aperto, dotato di pannellature di acciaio zincato verniciato color alluminio					

Fig. 12 – Caratteristiche tecniche WFC – SC20

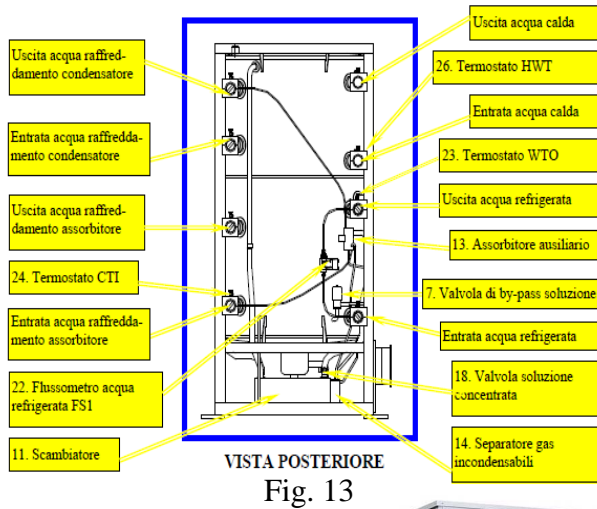


Fig. 13



Fig. 14 – Yazaki – WFC

Il gruppo frigo ad assorbimento può lavorare con una potenza termica di alimentazione inferiore e un acqua calda a temperature più basse di quelle precedentemente indicate con una riduzione della produzione di potenza frigorifera mantenendo un coefficiente di prestazione costante pari a COP=0.7 con una temperatura dell'acqua di raffreddamento in ingresso pari a 31 °C.

Il gruppo frigorifero ha un proprio sistema di controllo a cui sono collegate le alimentazioni delle pompe di circolazione dell'acqua calda di alimentazione, di quella refrigerata, di quella di raffreddamento e il comando degli elettroventilatori della torre evaporativa.

Il sistema di controllo del Gruppo frigo è a sua volta connesso con quello dell'impianto di Solar Cooling per l'acquisizione dei dati di funzionamento e per il comando ON / OFF remoto del gruppo stesso.

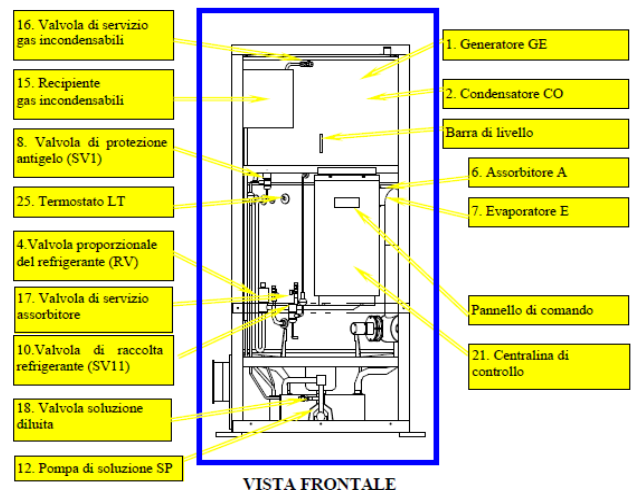


Fig. 15

### 3.4 Torre evaporativa

La torre evaporativa installata è il modello Thermac 12TCN 40 prodotto dalla BI.DIEFFE s.r.l. che ha una potenza di raffreddamento di 179 KW. La torre evaporativa ha un reintegro dell'acqua direttamente dall'acquedotto e un drenaggio continuo per prevenire la concentrazione di sali disciolti e le relative incrostazioni.



Il comando di marcia e di arresto della torre è dato direttamente da gruppo frigo ad assorbimento.

Fig. 16 – Torre evaporativa

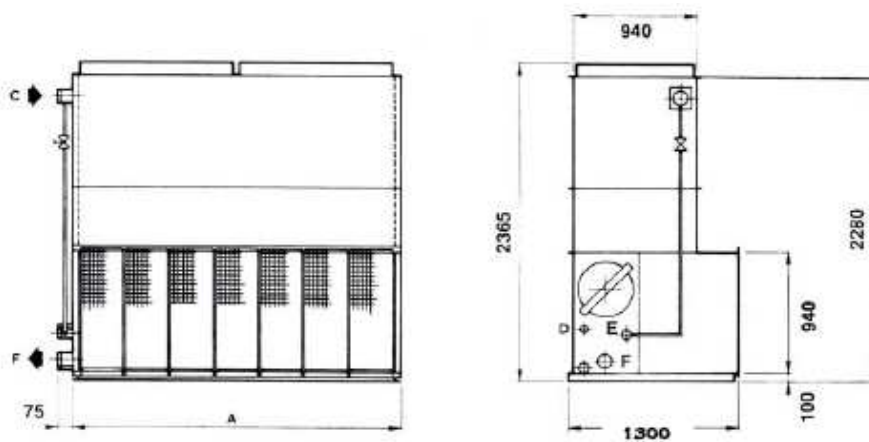


Fig. 17 Dimensioni Torre evaporativa

#### 4.Simulazione dinamica edificio-impianto

La determinazione delle potenze necessarie al riscaldamento ed al raffrescamento dell'edificio F51 sono state ricavate mediante una simulazione dinamica dell'edificio, elaborata con il software TRNSYS versione 16.01.0002.

La simulazione attraverso il software TRNSYS consente il dimensionamento dell'impianto attraverso la definizione delle caratteristiche termofisiche dell'involucro dell'edificio e delle condizioni climatiche del sito (temperatura, umidità relativa, radiazione solare, direzione e velocità del vento).

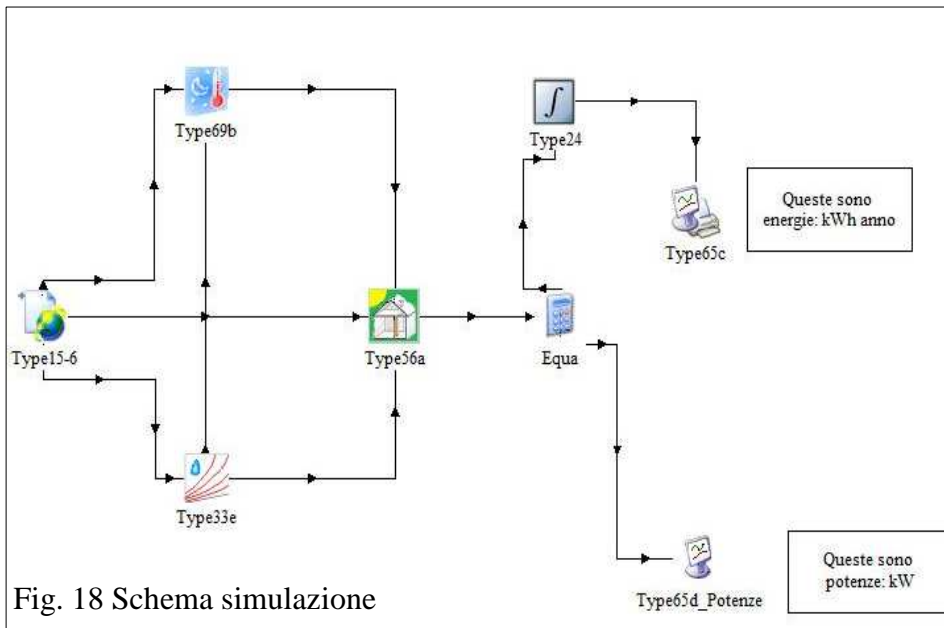


Fig. 18 Schema simulazione

Il modello elaborato (Fig. 18) consente di ottenere un grado di notevole dettaglio definendo, ora per ora, il numero delle presenze, il livello di attività delle persone, l'illuminazione ed i carichi operanti all'interno dell'edificio ecc.

Le basi di calcolo prevedono la presenza

nell'edificio F51 di 38 uffici ed una sala riunioni per una superficie totale di circa 1176 mq. La presenza media negli ambienti di lavoro è di circa 30 persone giornaliere con altrettante postazioni di lavoro costituite in media da un personal computer, un monitor ed una stampante (Potenza installata circa 700 W con coefficiente di utilizzazione di circa 0.5).

Nell'edificio è presente un impianto per l'illuminazione interna della potenza di circa 9.5 KW e un impianto di climatizzazione con 40 ventilconvettori, normalmente in funzione, della potenza di circa 50 W ciascuno. Pertanto, la potenza elettrica specificata installata è di circa 31 W/mq.

L'impianto di aria primaria ha una portata di circa 2500 mc/h con un carico frigorifero di circa 35 KW (T aria esterna 34° e U.R. 70%- T aria interna 26°C e U.R. 55%).

Inoltre, sull'edificio F51, nel corso dei lavori di installazione dell'Impianto di *Solar Cooling*, è stata incrementata l'isolamento termico della copertura con l'installazione di uno strato di polistirene di circa 4 cm che ha ridotto del 35% il coefficiente di trasmissione termica portandolo da 0.56 W/mq K a circa 0.36 W/mq K.

Nella Fig. 19 vengono riportati i risultati della simulazione dinamica relative ad un ciclo annuale.



Fig. 19 Risultato dei Calcoli

Dai risultati della simulazione risulta che il massimo carico di raffreddamento è di circa 59 KW mentre quello in riscaldamento è di circa 64 KW ipotizzando come aria di ventilazione quella dovuta alla sola infiltrazione.

Inoltre, come è possibile osservare dal grafico di cui sopra, nei periodi in cui è stato effettuato il monitoraggio (seconda metà di Luglio e prima decade di Settembre - intervallo orario compreso tra 4360 e 6000) il carico frigorifero risultante dalla simulazione dinamica risulta in media non superiore ai 45 KW.



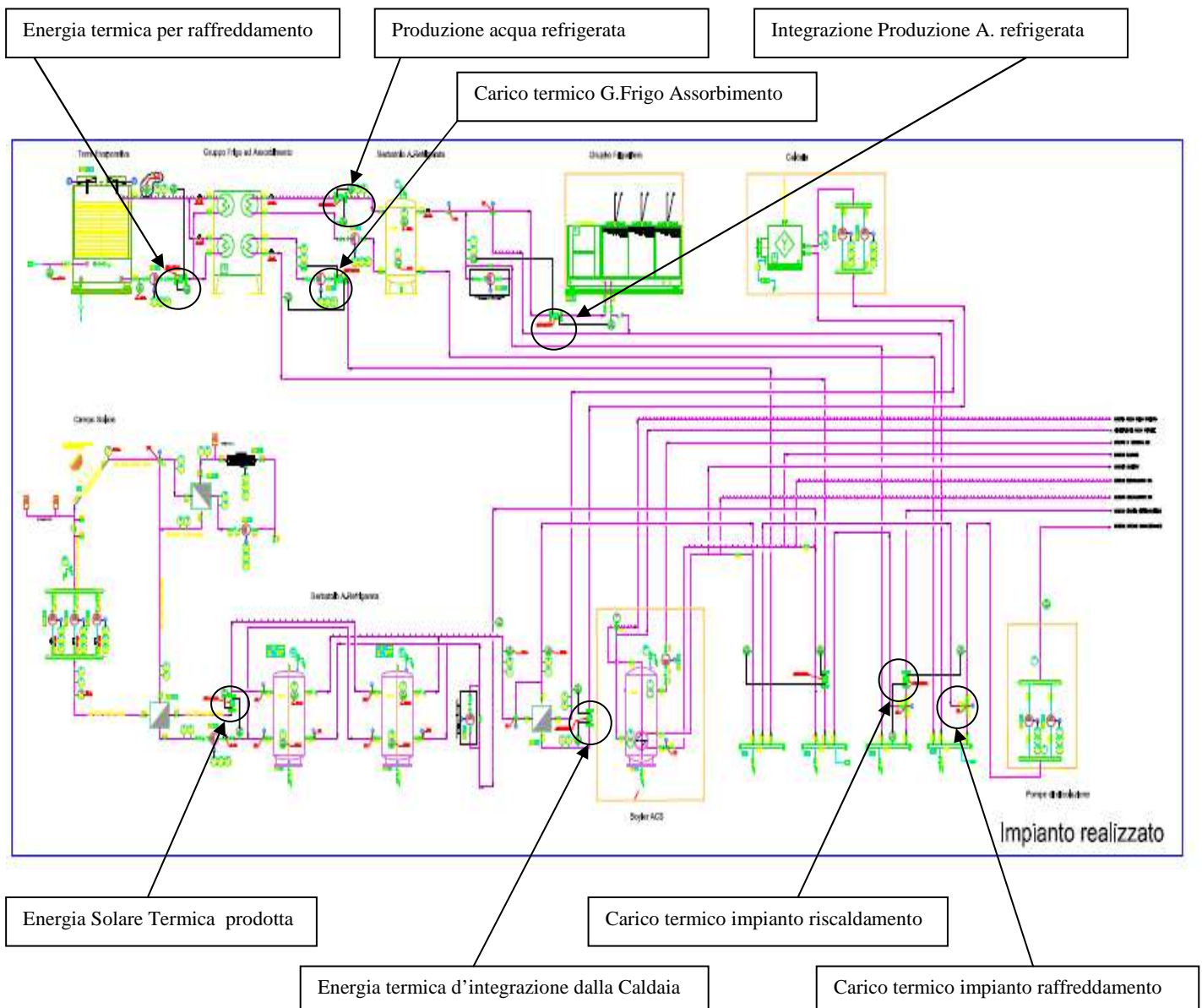
## 5. Sistema di controllo ed acquisizione dati

Nella presente annualità all'impianto di *Solar Cooling* realizzato è stato installato un sistema di controllo ed acquisizione dati.

Il sistema di controllo rileva principalmente i parametri di funzionamento del campo solare (temperatura dell'acqua prodotta dal campo solare, temperatura all'interno dei serbatoi di accumulo, temperatura dell'acqua di mandata al Gruppo Frigo ad assorbimento) agendo sulle pompe di circolazione e sui sistemi di emergenza oltre ad interfacciarsi con il gruppo frigo a compressione e la caldaia esistenti per il comando di accensione e spegnimento degli stessi. Inoltre, il sistema di controllo acquisisce dal sistema di controllo del Gruppo Frigo ad assorbimento gli stati di funzionamento delle macchine a servizio di quest'ultimo (Torre evaporativa, pompe di circolazione dell'acqua di raffreddamento, di quella refrigerata e di quella calda) e consente il comando di accensione e spegnimento del gruppo frigo stesso.

Il sistema di acquisizione dati provvede ad acquisire i dati di funzionamento dell'impianto (portate, temperature ed energia) relativamente ai flussi rappresentati nella fig.20.

Fig.20 – Ubicazione dei Contacalorie installati



Il sistema di controllo installato è il DESIGO PX prodotto dalla Siemens (Fig.21) che ha la caratteristica di essere modulare e con la possibilità di estensione del sistema, ad esempio, al controllo degli impianti tecnologici presenti nell'edificio (elettrico, illuminazione, climatizzazione) costituendo in tal modo un sistema integrato in grado realizzare un controllo finalizzato all'ottimizzazione dei consumi dell'edificio in funzione delle esigenze degli utenti e degli standard qualitativi richiesti .

Inoltre, il sistema di controllo ed acquisizione dati DESIGO consente il controllo e la gestione dell'impianto da un Web client

remoto consentendo, in caso di modifiche dei parametri di funzionamento e/o di guasto di poter trasmettere i relativi messaggi di avviso consentendone la diagnostica remota tramite Web client.

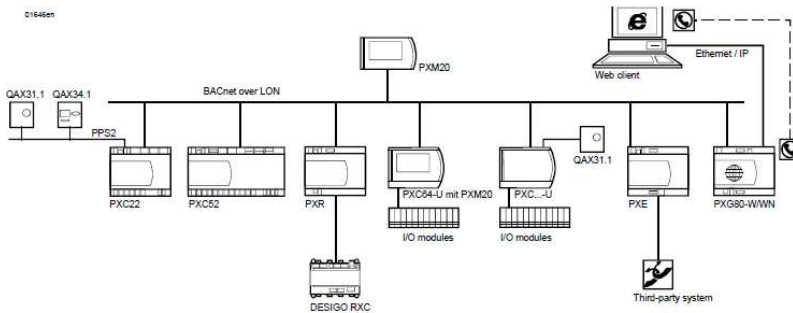


Fig.21 – Schema di principio del sistema DESIGO

Al sistema di controllo ed acquisizione dati DESIGO sono state collegate le sonde di temperatura modello QAE2110.010 della Siemens, il comando e gli stati di funzionamento (marcia, arresto e allarme) delle apparecchiature (pompe, gruppi frigo, caldaia), il comando e lo stato delle apparecchiature di regolazione (valvole miscelatrici, valvole motorizzate ON/OFF, valvole motorizzate stagionali) ed i conta calorie Siemens Ultraheat UH-50 che rilevano le temperature di mandata e di ritorno, la portata, la Potenza istantanea e l'energia prodotta del fluido controllato.

## 5.1 Logica di funzionamento del sistema di controllo

I componenti fondamentali che costituiscono l'impianto sono:

- 1) Campo solare costituito da Pannelli solari sottovuoto;
- 2) Due serbatoi d'accumulo per lo stoccaggio di acqua di impianto sui quali lavorano il campo solare;
- 3) Scambiatori tra campo solare e accumuli;
- 4) Un assorbitore a bromuro di litio;
- 5) Un serbatoio d'accumulo per la funzione di volano freddo;
- 6) Una torre evaporativa per il raffreddamento dell'assorbitore.

### 5.1.1 Funzionamento Solare

Il campo solare è costituito da 30 collettori modello Sky 21.

Il campo solare lavora su due bollitori che verranno riscaldati dall'energia solare termica sin quando la differenza di temperatura tra i due è maggiore di almeno 5°C.

Pertanto, il sistema di controllo rileverà la temperatura della sonda TE002 del campo solare e se risulta maggiore di 5°C rispetto alle sonde TE005 e TE006 installate sui bollitori, aprirà le valvole a due vie installate sui serbatoi, rispettivamente, VR8-VR9 e VR11-VR12.

Il sistema di controllo può stabilire la priorità ad uno solo dei bollitori in modo che, una volta raggiunta la temperatura massima di stoccaggio, il campo solare potrà lavorare sull'altro.

### 5.1.2 Circuito caldo di alimentazione

A valle dei serbatoi di accumulo sono presenti due valvole a due vie, VR7 e VR10, che potranno essere entrambe se i serbatoi lavorano in parallelo o, in alternativa, potranno avere le seguenti posizioni: VR7 sarà chiusa quando VR10 è aperta.

Nel caso di funzionamento in serie degli accumuli, la valvola VR7 solo quando la differenza tra TE017 e TE005 sarà di almeno 5°C in tal caso valvola VR10 si chiuderà.

Il consenso all'assorbitore sarà dato dall'utenza che sceglierà se:

- 1) Alimentare l'assorbitore con il campo solare e con la caldaia d'integrazione;
- 2) Tenere la caldaia d'integrazione spenta e far lavorare solo il campo solare ad alimentazione dell'assorbitore;
- 3) Tenere spento l'assorbitore e far lavorare soltanto la il gruppo frigo esistente.

#### 5.1.2.1 Alimentare l'assorbitore con il solare e con la caldaia

In questa modalità di funzionamento è necessario che la sonda TE007 rilevi la temperatura del serbatoio d'accumulo e gestisca la valvola a tre vie VR6: se la temperatura è minore di 80°C, la valvola consentirà il passaggio nello scambiatore a piastre.

L'accensione della caldaia dipenderà dalla sonda TE008, se la temperatura risulta inferiore a 80°C la caldaia dovrà necessariamente integrare.

Con l'accensione della caldaia dovranno essere accesi sempre contemporaneamente le pompe di circolazione esistenti PCX017 e PCX018.

#### 5.1.2.2 Alimentare l'assorbitore con il solare e senza caldaia

In questa modalità di funzionamento la valvola a tre vie VR6 non consentirà il passaggio d'acqua nello scambiatore a piastre e la caldaia rimarrà spenta.

### *5.1.3 Funzionamento con il Gruppo Frigo a pompa di calore esistente (funzionamento sia estivo che invernale)*

In questo caso la valvola VR2 dovrà chiudersi e la valvola a tre vie VR1 dovrà aprire in direzione AB-A.

### *5.1.4 Circuito di raffreddamento*

La macchina ad assorbimento stabilisce l'accensione della torre e delle pompe di circolazione PCX001 dell'acqua di raffreddamento, PCX002 dell'acqua refrigerata e PCX006 dell'acqua calda di alimentazione dando un consenso alla centralina Siemens.

Il sistema di controllo acquisisce i dati di funzionamento mediante

### *5.1.5 Configurazione con impianto distribuzione*

Per quanto concerne la valvola deviatrice VR1 presente sul ritorno dell'impianto di distribuzione del freddo, questa deve essere gestita come segue.

Il sistema di controllo DESIGO rileva la temperatura TE018 sul ritorno dall'utenza: la valvola miscelatrice a tre vie VR1 devierà al fine di avere la temperatura richiesta di 7°C sul collettore di distribuzione (più la temperatura aumenta, più devierà verso la direzione AB-A).

### *5.1.6 Funzionamento invernale*

In modalità invernale le valvole a tre vie VR3 e VR4 devieranno il flusso sin direzione AB-B

### *5.1.7 Funzionamento con caldaia*

In questa modalità di funzionamento è necessario che la sonda TE007 rilevi la temperatura e gestisca la valvola a tre vie VR6: se la temperatura è minore di 80°C, la valvola consentirà il passaggio nello scambiatore a piastre.

L'accensione della caldaia dipenderà dalla sonda TE008, se la temperatura risulta inferiore a 80°C la caldaia dovrà necessariamente accendersi.

### *5.1.8 Funzionamento con pompa di calore*

La valvola VR2 dovrà chiudersi e la valvola VR1 sarà in direzione AB-A, tutto il resto rimane uguale al punto precedente.

### *5.1.9 Dissipatore termico*

Se la temperatura del campo solare TE002 dovesse superare il valore di 100°C, la valvola VR13 devierà verso il dissipatore che dovrà accendersi contemporaneamente al circolatore PCX030.

## 5.2 Sistema di controllo DESIGO

Il sistema di controllo DESIGO della Siemens consiste in un sistema modulare di apparecchiature programmabili e connesse tra loro mediante un BUS dati che consente la realizzazione di sistemi espandibili con il tempo ed integrabili con altri sottosistemi.

Il sistema installato all’Impianto di *Solar Cooling* e rappresentato nella Fig. 22, è composto di controllori di automazione modulari della serie PXC64-U a cui sono collegabili 64 moduli di input output anch’essi modulari del tipo TX1.8U.

I moduli I/O forniscono l’interfaccia fisica agli elementi in campo e sono collegati ai controllori di automazione tramite le barre distribuite e connessi ai controllori di automazione attraverso il moduli TXB1.PBUS come rappresentato nello schema di Fig. 22.

Il sistema di controllo ed acquisizione dei dati è a sua volta connesso, mediante rete Ethernet, con le postazioni di controllo remote con le quali è possibile interagire mediante gli usuali protocolli di connessione ad es. TCP/IP.

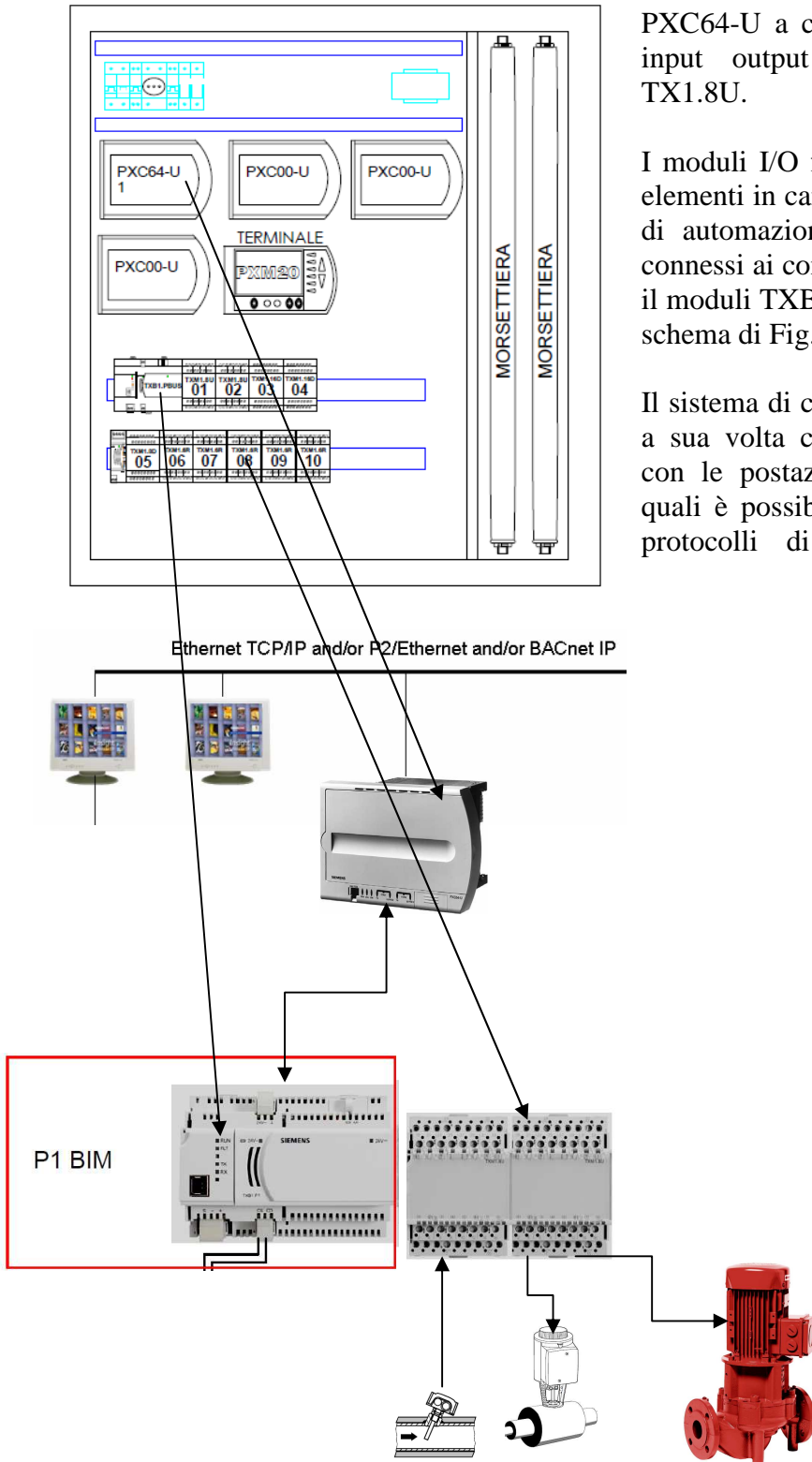
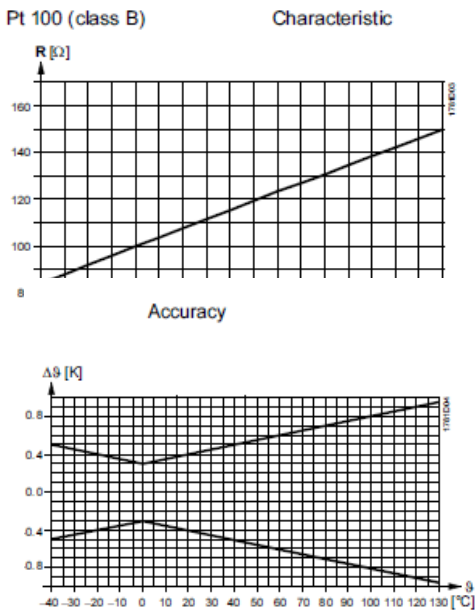


Fig. 22 Sistema di controllo e acquisizione

### 5.3 Sensore di Temperatura

Il sensore di temperatura modello QAE2110.010 (Fig.23, 24) ad immersione è del tipo PT100 per un funzionamento nel campo di misura tra -30°C e +130° avente le caratteristiche riportate nei grafici allegati.



Il sensore acquisisce la temperatura del mezzo misurato rilevando la variazione di resistenza, al variare della temperatura, del suo elemento sensibile. Il segnale rilevato viene poi inviato al controllore collegato o al sistema di controllo che provvede, acquisito il dato, a realizzare la catena logica di controllo.

#### Dimensions (in mm)

QAE2110.010  
QAE2110.015  
QAE2120.010  
QAE2120.015  
QAE2140.010

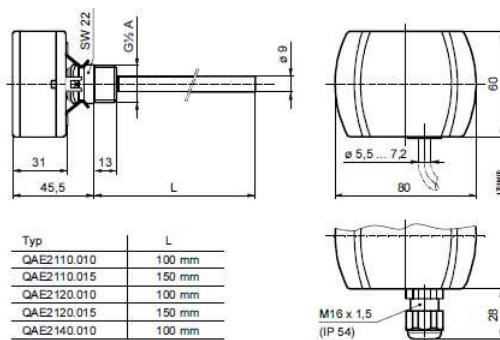


Fig. 23 – Dimensioni sonda di Temperatura



Fig. 24 Sonda QAE 2110.010

## 5.4 Contacalorie

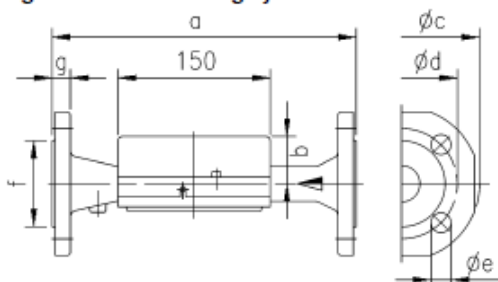
Il contacalorie installato è il modello Ultraheat UH-50 della Siemens e costituito da due sonde termometriche del tipo PT100 e di un misuratore di portata ad ultrasuoni e da un dispositivo di acquisizione ed elaborazione dei dati misurati per rendere immediata la lettura sia dei dati stessi che di quelli derivati quali, ad esempio, la potenza istantanea e l'energia totale.

I dati vengono memorizzati sia localmente che trasferiti al sistema di controllo ed acquisizione (DESIGO) per le successive elaborazioni.

Il contacalorie Ultraheat UH-50 è costruito secondo la classe 2 EN 1434-3.



Large meters with flange joint



Order no.	qp m <sup>3</sup> /h	PN bar	DN	a	b	∅c	∅d	∅e	No. of holes	f	g
UH50-x46	3,5	25	25	260	51	115	85	14	4	68	18
UH50-x52	6	25	25	260	51	115	85	14	4	68	18
UH50-x61	10	25	40	300	48	150	110	18	4	88	18
UH50-x65	15	25	50	270	46	165	125	18	4	102	20
UH50-x69	15	25	50	200							
UH50-x70	25	25	65	300	52	185	145	18	8	122	22
UH50-x74	40	25	80	300	56	200	160	18	8	138	24
UH50-x82	60	16	100	360	68	235	180	18	8	158	24
UH50-x83	60	25	100	360	68	235	190	22	8	158	24

Fig. 25 Contacalorie UltraHEAT 50 (UH50)

## **6. Interventi di adeguamento sull'Impianto esistente**

Dai dati di funzionamento fin qui rilevati, l'impianto di *Solar Cooling* realizzato richiederà degli ulteriori adeguamenti che riguarderanno principalmente la Caldaia d'integrazione ed il Gruppo Frigo a compressione esistenti.

Per quanto riguarda la Caldaia si dovranno apportare le opportune modifiche (sostituzione della valvola di scarico termico con termostato di blocco a riarmo manuale) per portare la temperatura massima di produzione a circa 95 °C.

Per quanto riguarda il gruppo Frigo a compressione esistente si dovrà provvedere alla sostituzione con uno di potenzialità di circa la metà di quella attuale.



## 7. Dati di monitoraggio

Il gruppo frigo ad assorbimento installato (YAZAKI modello WFC 20) eroga la potenza frigorifera di 70 KW (vedi grafico Fig. 26) alla temperatura di alimentazione dell'acqua calda di circa 88 °C, assorbendo circa 100 KW di potenza termica (vedi grafico Fig. 27).

Si deve rilevare che l'impianto realizzato è stato progettato per alimentare il gruppo frigo ad assorbimento con tutta l'energia termica che può essere prodotta dal campo solare installato di superficie di circa 100 mq con l'eventuale integrazione della caldaia esistente.

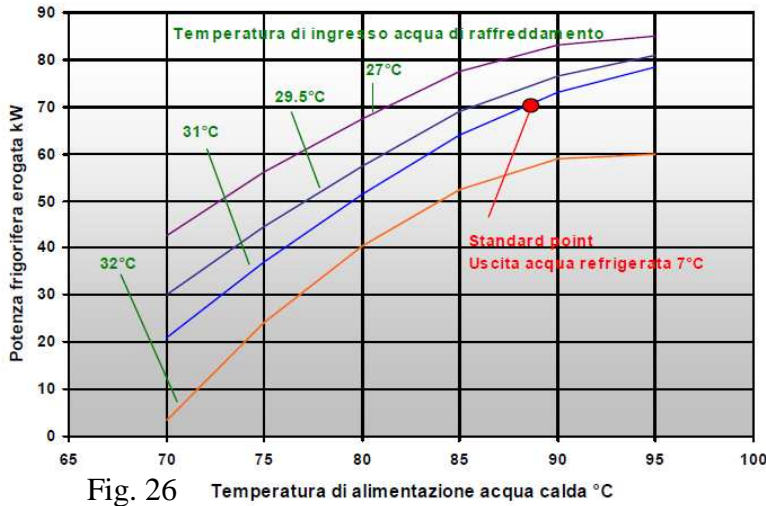


Fig. 26 Temperatura di alimentazione acqua calda °C

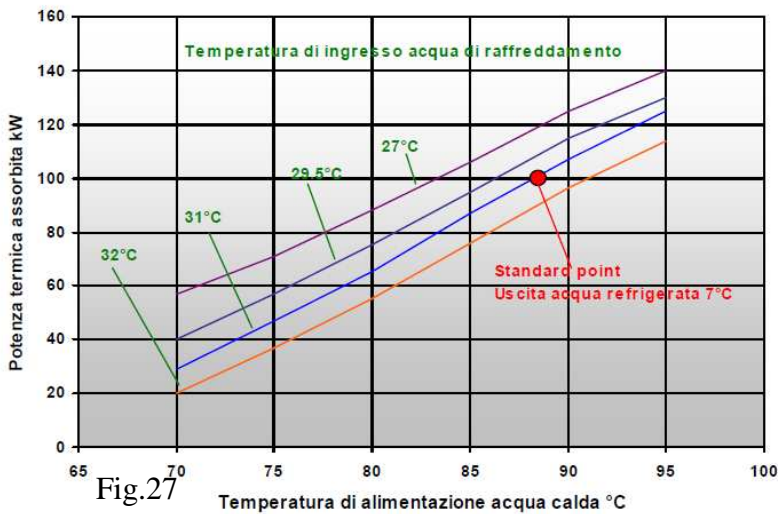


Fig. 27 Temperatura di alimentazione acqua calda °C

con una produzione relativa di potenza frigorifera tra i 20 ed 40 KW in dipendenza della temperatura d'ingresso dell'acqua di raffreddamento.

Da quanto premesso, i dati rilevati della potenza termica prodotta (Tab 3) evidenziano che la potenza istantanea prodotta dal campo solare è quella attesa (circa 60 KW per il mese di Luglio) e che la potenza frigorifera prodotta dal gruppo frigorifero è quella attesa dalle specifiche per i livelli termici dell'acqua calda di alimentazione come riportato nella tabella 2.

Le temperature riportate e i dati della potenza istantanea riportati nelle tabella sono quelli rilevati nei punti rappresentati nella fig. 27. I dati sono stati rilevati nelle ore di massima insolazione (tra le 13.00 e le 16.00).

La massima produzione del campo solare nelle condizioni di irraggiamento ottimale (mese di Luglio) produrrebbe circa 50 -70 KW di energia termica mentre i rimanenti 50 - 30 KW dovrebbero essere erogati dalla caldaia d'integrazione nel caso il carico frigo richiesto dalle utenze fosse di 70 KW. In tal caso la temperatura massima a cui dovrebbe lavorare la caldaia deve essere di almeno 90 °C in modo da alimentare il gruppo frigo ad assorbimento alla temperatura di circa 87-88 °C.

Tuttavia, la caldaia esistente ha una sua temperatura massima di lavoro di circa 75 °C e, pertanto, la massima potenza termica alimentabile al gruppo frigorifero è di circa 60-70 KW

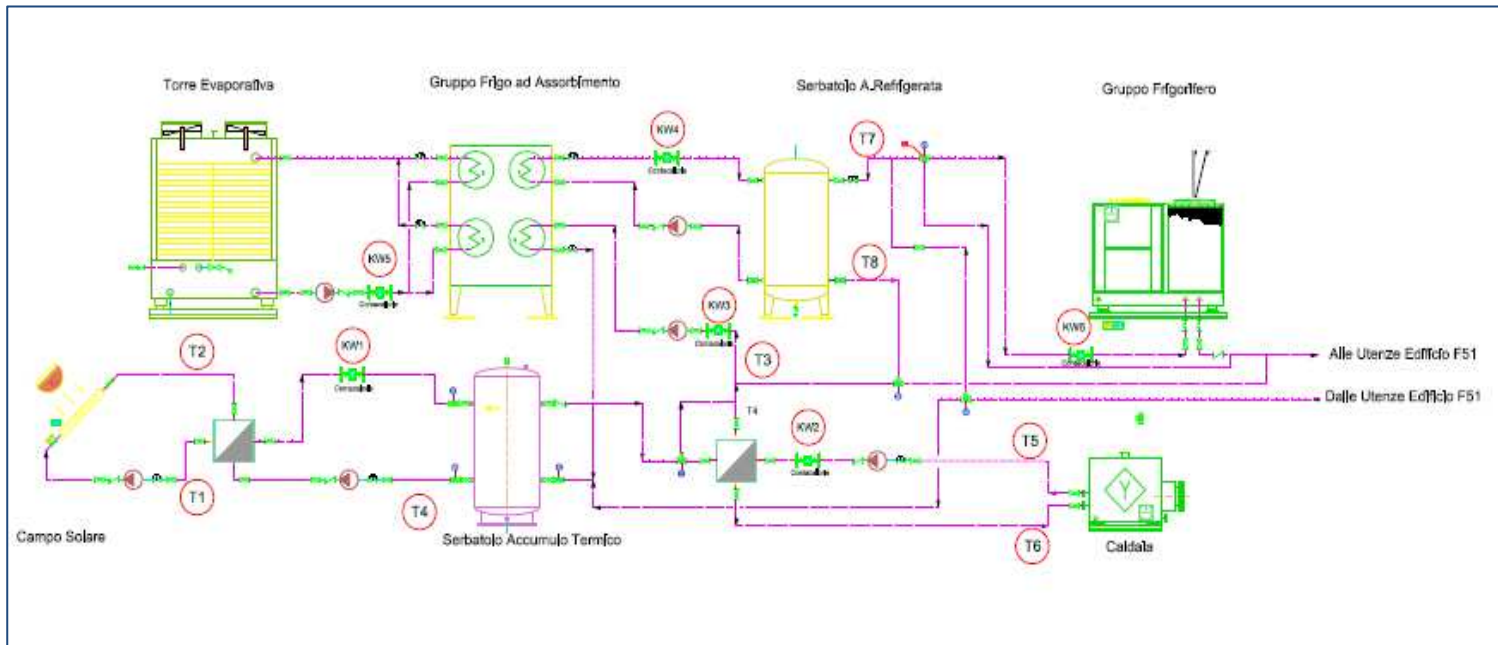


Fig.28 – Schema funzionale dell’Impianto di Solar Cooling

**Tabella 2 – Temperature (°C) – Funzionamento estivo**

Mese	Giorno	Ora	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
7	15	13	78.0	87.0	74.0	71.4	77.0	77.0	11.9	8.8
7	15	14	75.8	86.4	72.0	69.7	75.0	75.0	11.5	8.9
7	15	15	71.0	80.0	72.0	69.7	75.0	74.4	11.8	9.2
7	15	16	66.0	73.5	71.0	68.9	74.0	73.0	12.1	9.7
8	11	13	77.8	86.5	75.3	73.1	78.3	78.3	11.6	9.3
8	11	14	76.0	85.0	74.0	72.0	77.0	76.9	11.5	9.2
8	11	15	71.0	80.0	73.0	71.2	76.0	75.5	11.9	9.7
8	11	16	66.2	75.0	71.0	69.5	74.0	73.3	12.1	10.4
8	23	13	76.0	85.0	75.3	72.4	78.3	77.6	11.9	8.6
8	23	14	75.0	84.5	74.0	71.4	77.0	76.2	11.5	8.4
8	23	15	71.0	82.0	73.0	70.5	76.0	74.8	11.8	8.9
8	23	16	65.0	75.0	71.0	68.9	74.0	72.6	11.9	9.4
9	3	13	76.0	84.5	72.0	69.7	75.0	74.6	11.9	9.3
9	3	14	75.0	84.0	71.7	69.5	74.7	74.0	11.5	8.9
9	3	15	71.0	81.3	72.0	69.7	75.0	73.8	11.8	9.2
9	3	16	67.0	75.0	71.0	68.9	74.0	72.4	12.2	9.3

**Legenda:**

- T1 Temperatura mandata al Campo Solare
- T2 Temperatura ritorno dal Campo Solare
- T3 Temperatura mandata A. calda al G. Frigo ad assorbimento
- T4 Temperatura ritorno dal Serbatoio d’accumulo termico
- T5 Temperatura mandata dalla Caldaia
- T6 Temperatura mandata alla Caldaia
- T7 Temperatura mandata Acqua refrigerata al G.Frigo ad Assorbimento
- T8 Temperatura ritorno Acqua refrigerata dal G.Frigo ad Assorbimento

**Tabella 3 – Potenze istantanee (KW) – Funzionamento estivo**

Mese	Giorno	Ora	KW1	KW2	KW3	KW4	COP
7	15	13	58.1	0.6	58.7	41.0	0.700
7	15	14	49.3	0.7	50.0	35.5	0.709
7	15	15	36.9	13.1	50.0	35.5	0.709
7	15	16	22.7	22.9	45.6	32.7	0.718
8	11	13	49.1	0.3	49.4	35.0	0.708
8	11	14	41.0	3.2	44.2	31.1	0.703
8	11	15	29.6	10.6	40.2	28.2	0.701
8	11	16	16.5	15.7	32.3	22.8	0.708
8	23	13	48.3	15.9	64.1	44.7	0.696
8	23	14	39.6	19.0	58.7	41.0	0.700
8	23	15	27.6	26.8	54.4	38.3	0.703
8	23	16	14.0	31.6	45.6	32.7	0.718
9	3	13	39.8	10.2	50.0	35.5	0.709
9	3	14	32.2	16.5	48.7	34.7	0.711
9	3	15	21.6	28.5	50.0	35.5	0.709
9	3	16	9.4	36.2	45.6	32.7	0.718

**Legenda:**

- KW1 Potenza termica prodotto dal campo solare  
KW2 Potenza termica prodotta dalla Caldaia d'integrazione  
KW3 Potenza termica alimentata al G. Frigo ad assorbimento  
KW4 Potenza frigorifera prodotta dal G. Frigo ad assorbimento  
COP (KW4/KW3) Coefficiente di prestazione del G. Frigo ad assorbimento

## 8. Conclusioni

I dati riportati nelle tabelle 1 e 2 si riferiscono al monitoraggio effettuato sull'impianto realizzato nel periodo compreso tra la seconda metà di Luglio e la prima decade di Settembre e, come si può osservare, non viene riportato il contributo di produzione del carico frigo del gruppo frigorifero a compressione esistente in quanto, nell'intervallo di tempo osservato, non è entrato in funzione.

Pertanto, i dati di monitoraggio confermano quanto elaborato dalla simulazione dinamica descritta nel paragrafo 4.

In particolare, si deve osservare che il campo solare è stato in grado di produrre l'energia termica necessaria (circa 60-50 KW) a fornire il carico frigorifero richiesto (circa 35-45 KW) nelle condizioni sopra specificate per le ore di massima insolazione (dalle ore 13 alle ore 14 ora legale) senza la necessità di ricorrere all'integrazione del carico termico fornito dalla Caldaia esistente.

Nel caso in cui negli uffici sia richiesto il carico frigorifero massimo, ad esempio, con la presenza di circa 40-50 persone, tutte le postazioni di lavoro operative e con l'impianto Aria primaria in funzione - condizione stimabile per il periodo che va da metà giugno a metà luglio - è prevedibile che il carico frigorifero totale dovrebbe essere di circa di 105 KW. In queste condizioni, il gruppo frigorifero a compressione dovrebbe erogare circa 35 KW mentre il gruppo frigorifero ad assorbimento i rimanenti 70 KW prodotti dall'energia termica derivante dal campo solare con l'integrazione della Caldaia esistente.

Nel caso siano verificate le condizioni appena descritte - che, tra l'altro, non è stato possibile testare in questa stagione in quanto il sistema di monitoraggio è stato completato nella prima decade di Luglio - per ottenere dall'impianto una prestazione adeguata è necessario elevare la temperatura di funzionamento della Caldaia esistente fino a 90 °C, come riportato nel precedente paragrafo 7, alimentando il gruppo frigorifero ad assorbimento con acqua calda alla temperatura di 88 °C in modo che quest'ultimo sia in grado di erogare la richiesta Potenza frigorifera di 70 KW.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) B. Y. H. Liu – R.C. Jordan - The Interrelationship and Characteristic Distribution of direct, diffuse and total Solar Radiation
- (2) B. Y. H. Liu – R.C. Jordan - The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors
- (3) Raymond W. Bliss - The Derivations of Several "Plate-Efficiency Factors" Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors
- (4) P. V. Pedersen - System design optimization for large building integrated solar heating systems for domestic hot water - Solar Energy Vol. 50, No. 3, pp. 267-273, 1993
- (5) G. Grossman A. Johannsen - Solar Cooling and air conditioning - Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 7, Pergamon Press Ltd., 1981
- (6) Mirunalini Thirugnanasambandam a, S. Iniyar b,\* , Ranko Goic - A review of solar thermal technologies - Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010)
- (7) Soteris A. Kalogirou - Solar thermal collectors and applications - Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004)
- (8) Robert Hausner - Christian Fink Rapporto della IEA SHC - Incarico 26 - Impianti solari combinati Novembre 2002
- (9) Edward Speyer - Optimum Storage of Heat with a Solar House
- (10) Dan s. Ward - George O.G. Lof - Design and construction of a residential Solar heating and cooling system - Solar Energy, Vol. 17, pp. 13-20. Pergamon Press 1975