



Ricerca di Sistema elettrico

## Prototipo di condizionatore d'aria compatto Solar DEC, sistema freescoc office: test funzionali

*N. Calabrese, B. Cucca, P. Finocchiaro, M. Beccali*

## PROTOTIPO DI CONDIZIONATORE D'ARIA COMPATTO SOLAR DEC, SISTEMA FREESCOO OFFICE: TEST FUNZIONALI

N. Calabrese (ENEA), B. Cucca (Scuola Master F.lli Pesenti), P. Finocchiaro (SOLARINVENT SRL), M. Beccali (Università degli Studi di Palermo)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

Obiettivo: Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi

Responsabile del Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Test funzionale ed ottimizzazione delle performance di un prototipo di condizionatore d'aria compatto, alimentato ad energia solare, progettato per la ventilazione, la deumidificazione ed il raffreddamento di utenze di tipo residenziale"* tra ENEA ed UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Responsabile scientifico ENEA: Nicolandrea Calabrese

Responsabile scientifico UNIPA :Marco Beccali

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	8
3 COMPONENTI PRINCIPALI DELL'IMPIANTO .....	12
3.1 APPARATO SOLARE .....	12
3.2 LETTI ADSORBENTI IN SILICA GEL .....	15
3.3 TORRE EVAPORATIVA .....	16
3.4 VENTILATORE PRINCIPALE .....	17
3.5 SCAMBIATORI DI CALORE EVAPORATIVO A PACCO.....	18
3.6 POMPA DI CIRCOLAZIONE DELL'ACQUA .....	20
3.7 ELETTROVALVOLA.....	21
3.8 SISTEMA DI MONITORAGGIO ED ACQUISIZIONE DATI .....	22
3.8.1 <i>Sensori di umidità</i> .....	22
3.8.2 <i>Sensori di temperatura</i> .....	24
3.8.3 <i>Misure di portata lato aria</i> .....	24
3.8.4 <i>Piranometro</i> .....	24
4 CASO STUDIO .....	27
4.1 DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO.....	27
4.2 RISULTATI SPERIMENTALI .....	29
4.3 ULTERIORI OSSERVAZIONI SUL FUNZIONAMENTO DELLA MACCHINA .....	38
5 CONCLUSIONI.....	41
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	43
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	43

## Sommario

L'attività di ricerca ha avuto come oggetto di studio un innovativo impianto solar DEC individuato dall'acronimo FREESCOO (FREE Solar COOLing).

Durante l'attività di ricerca sono stati testati due prototipi di solar DEC di taglia diversa e dedicati ad utenze di diversa destinazione d'uso: residenziale e terziario.

In particolare, presso il DEIM di Palermo è stata installata una unità *residential* e presso il C.R ENEA di Casaccia una unità *office* le cui caratteristiche sono di seguito descritte:

---

### Caratteristiche principali modello **freescOO residential**:

---

Superficie collettori solari: 2,4 m<sup>2</sup>

Dimensioni in pianta: 1,2 x 2 m<sup>2</sup>

Portata d'aria immessa in ambiente: 500 m<sup>3</sup>/h

Portata d'aria di rinnovo: 250 m<sup>3</sup>/h

Potenza frigorifera max: 2,7 kW (T<sub>est</sub> = 35°C x<sub>est</sub> = 14 g/kg)

Potenza elettrica assorbita: 0,15 kW




---

### Caratteristiche principali modello **freescOO office**:

---

Superficie collettori solari: 4,8 m<sup>2</sup>

Dimensioni in pianta: 2,4 x 2 m<sup>2</sup>

Portata d'aria immessa in ambiente: 1000 m<sup>3</sup>/h

Portata d'aria di rinnovo: 500 m<sup>3</sup>/h

Potenza frigorifera max: 5.5kW (Test = 35°C x<sub>est</sub> = 14 g/kg)

Potenza elettrica assorbita: 0,25 kW



L'attività di ricerca è stata quindi svolta con il contributo dell'Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM), che ha curato il monitoraggio e l'ottimizzazione del sistema freescOO residential, alimentato ad energia solare e dedicato ad applicazioni di tipo residenziale.

ENEA ha realizzato un impianto sperimentale presso il C.R ENEA di Casaccia al fine di testare e quindi sperimentare il sistema freescOO office, alimentato ad energia solare e dedicato ad applicazioni tipo uffici. Il sistema infatti è pensato per effettuare il ricambio d'aria degli ambienti a costo energetico nullo.

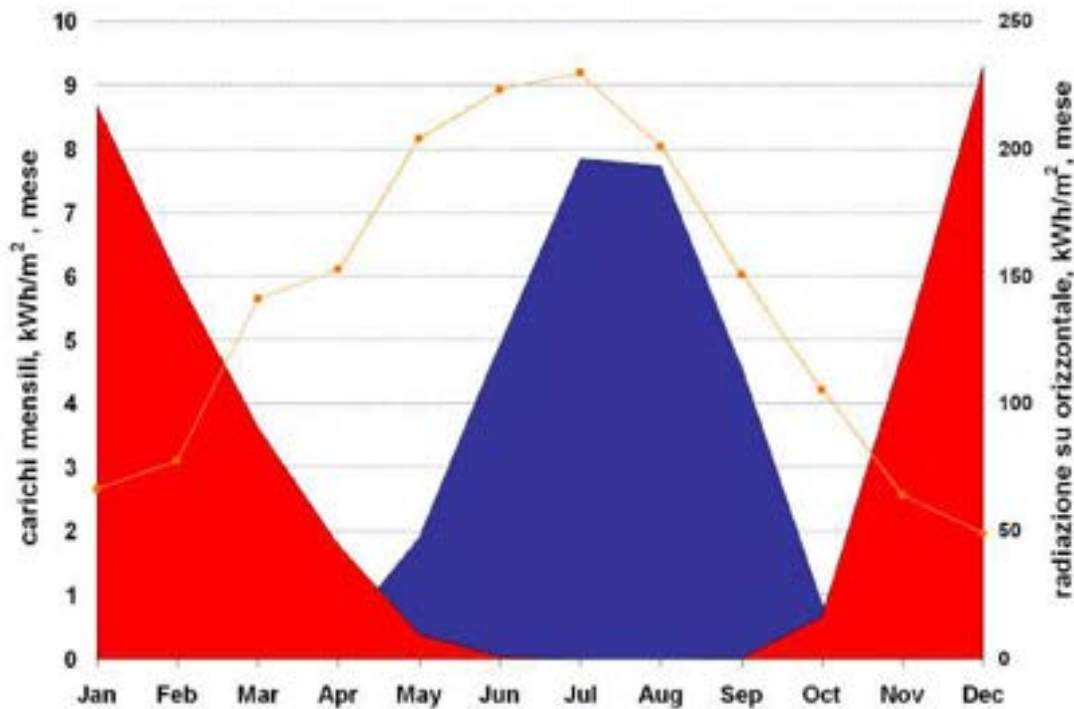
Il rapporto tecnico di seguito presentato si riferisce all'attività sperimentale ENEA, mettendo in evidenza i risultati ottenuti effettuando i test sul sistema freescOO office.

L'attività sperimentale è stata condotta utilizzando un locale di prova appositamente strumentato. Tale locale è servito dall'impianto AI.CO.WA. con pompa di calore a CO<sub>2</sub> e fan coil quali terminali d'impianto. L'impianto AI.CO.WA. ha lo scopo di mantenere la temperatura del locale a 26°C mentre l'impianto FREESCOO realizza il ricambio d'aria dell'ufficio secondo UNI 10339, immettendo in ambiente aria con determinate caratteristiche di temperatura, umidità e purezza (aria neutra).

L'impianto Solar DEC realizza, attraverso l'utilizzo della radiazione solare e dell'acqua, la deumidificazione ed il ricambio dell'aria degli ambienti in accordo con gli obiettivi di risparmio energetico individuati dall'Unione Europea, di sviluppo sostenibile e di basso impatto ambientale. Tale sistema di solar DEC è un sistema reso completamente autonomo dalla rete elettrica mediante l'integrazione di un sistema fotovoltaico per la fornitura dell'energia elettrica necessaria al funzionamento dei componenti costituenti la macchina. Il sistema FREESCOO è dotato di due batterie per lo stoccaggio dell'energia elettrica prodotta dal collettore solare fotovoltaico.

## 1 Introduzione

Lo sfruttamento della radiazione solare per la produzione di un effetto utile quale il raffreddamento ed la deumidificazione di un ambiente, è un aspetto molto interessante ed innovativo. L'utilizzo del calore fornito dal sole, fonte energetica rinnovabile, è ancora più conveniente se si considera il fatto che la maggiore richiesta di condizionamento coincide proprio con i mesi dell'anno in cui la radiazione solare è massima (Figura 1) e le giornate sono caratterizzate da una maggiore eliofania (durata media del soleggiamento).

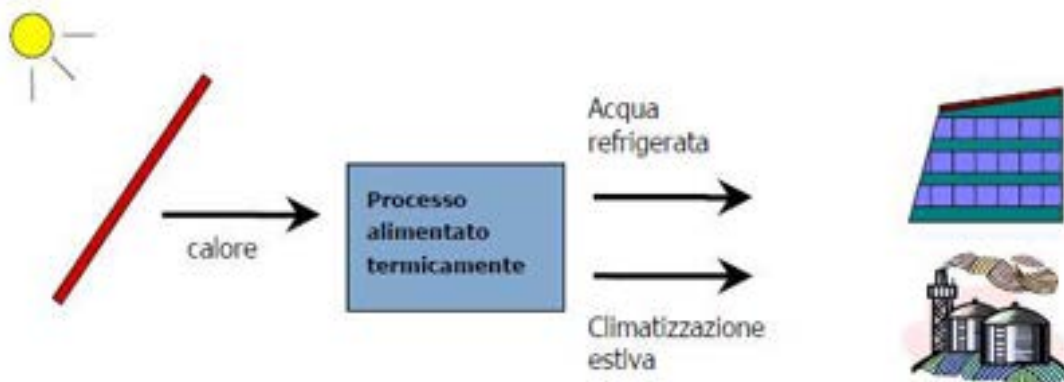


**Figura 1. Andamento richiesta energia frigorifera**  
(Motta M., Raffrescare con il sole – Tecnologie e prospettive per il solar cooling, 2007)

Il raffrescamento degli ambienti da fonte solare è diventata una valida alternativa ai sistemi convenzionali da quando, soprattutto negli ultimi anni, la domanda di elettricità nel periodo estivo ha raggiunto picchi estremi per l'uso eccessivo dei tradizionali condizionatori d'aria, fino a causare talvolta dei black out della rete elettrica. L'uso dell'energia solare per produrre il freddo diventa quindi un'opportunità vantaggiosa, come dimostrato dai numerosi progetti pilota realizzati anche in altri paesi europei, soprattutto in Germania e Spagna.

I sistemi di climatizzazione ad energia solare possiedono l'indubbio vantaggio di utilizzare fluidi di lavoro innocui, come l'acqua o le soluzioni saline. Sono rispettosi dell'ambiente, rispondono a criteri di efficienza energetica e possono essere usati, da soli o integrati ai sistemi di condizionamento tradizionali, per migliorare la qualità dell'aria all'interno di qualsiasi tipo di edificio. Il loro principale obiettivo è quello di utilizzare tecnologie ad "emissione zero" per ridurre i consumi di energia e le emissioni di CO<sub>2</sub>.

Il principio generale di questi sistemi di climatizzazione è la produzione di freddo a partire da una sorgente di calore.

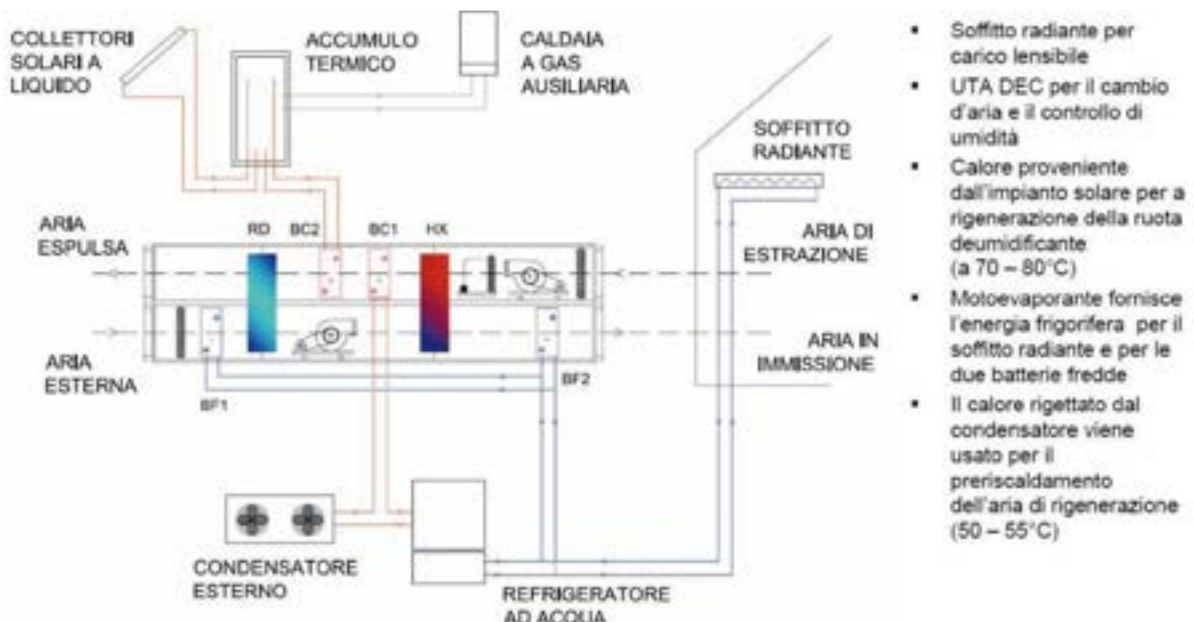


**Figura 2. Principio di funzionamento per il condizionamento con sorgenti calde (Motta M., Raffrescare con il sole – Tecnologie e prospettive per il solar cooling, 2007)**

In sintesi i passaggi che ne descrivono la produzione sono riassunti in figura 2:

- la sorgente di calore “sole” irraggia energia che viene assorbita dai collettori solari;
- la produzione di freddo avviene per mezzo di macchine frigorifere che vengono alimentate con l’acqua calda prodotta dai collettori solari;
- il fluido freddo termovettore, acqua o aria a seconda del tipo di macchina, viene impiegato ai fini del condizionamento degli ambienti

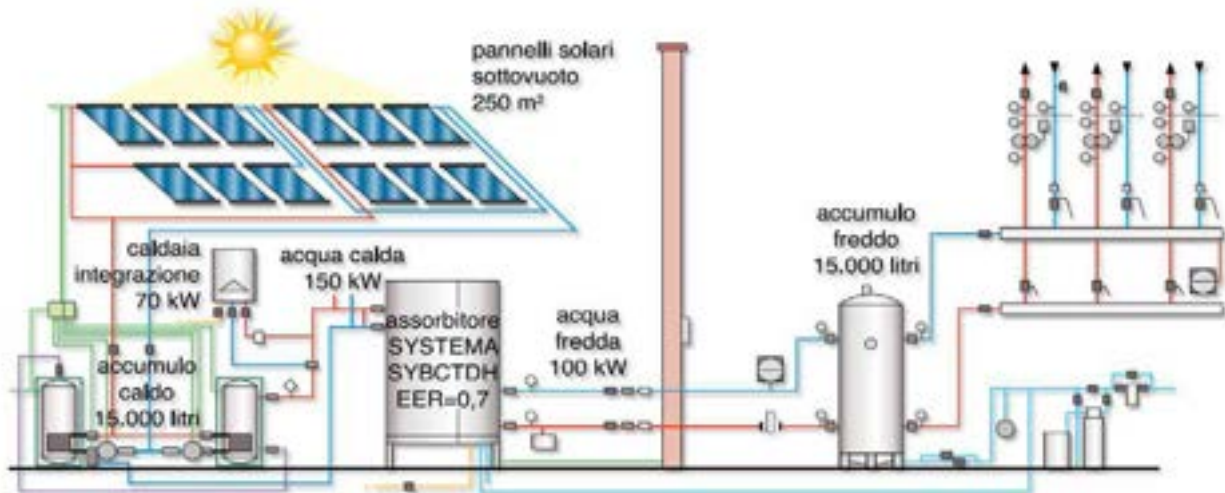
L’impiego di impianti di condizionamento alternativi a quelli tradizionali è rappresentato, principalmente, dagli impianti ad energia solare che garantiscono ridotti consumi elettrici e che sono in grado di sfruttare l’energia solare ampiamente disponibile proprio nel periodo di massima richiesta di condizionamento. I sistemi che convertono un apporto termico in un output frigorifero si possono classificare principalmente in due tipologie: sistemi a ciclo aperto e sistemi a ciclo chiuso. I sistemi basati su un ciclo aperto (figura 3) utilizzano l’acqua in raffreddamento per il trattamento diretto dell’aria; per questo è sempre richiesta una rete di distribuzione del freddo basata su un sistema di ventilazione.



**Figura 3. Sistema aperto abbinato ad impianti radianti alimentati da gruppo frigo a compressione (Fonte: Dipartimento di Ricerche Energetiche e Ambientali dell’Università degli Studi di Palermo)**

I sistemi chiusi (figura 4), invece, sono costituiti da macchine frigorifere alimentate da vettori termici, acqua calda o vapore, che producono acqua refrigerata; il fluido termovettore può essere impiegato direttamente nelle unità di trattamento degli impianti di condizionamento ad aria (raffreddamento o deumidificazione

nelle batterie dell'impianto) o distribuita attraverso una rete di tubazioni ai terminali di condizionamento decentralizzati nei vari locali da climatizzare. Possono essere utilizzati con qualsiasi tecnologia di distribuzione del freddo (sistemi di ventilazione, fancoil, superfici radianti).

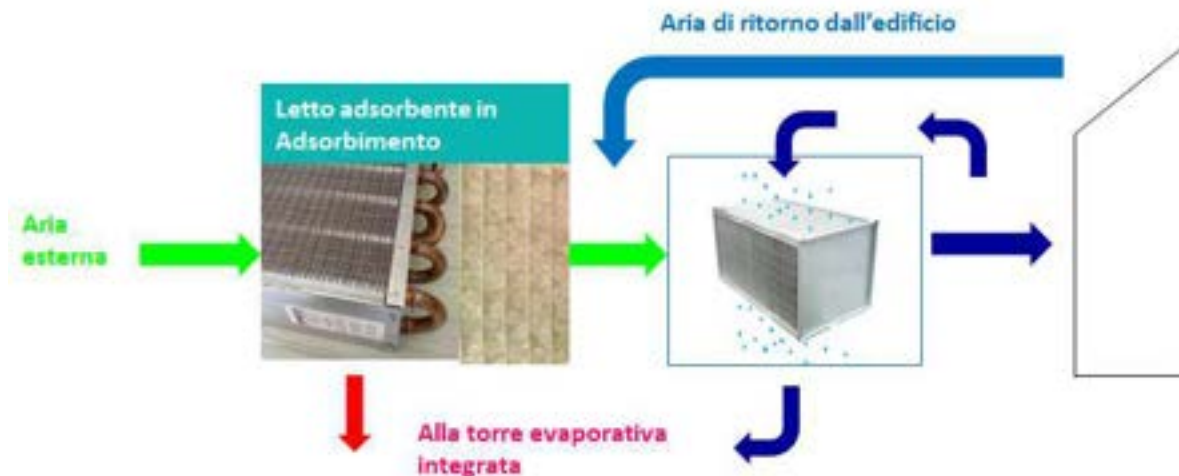


**Figura 4. Sistema chiuso. Impianto solar cooling con caldaia d'integrazione e sistemi d'accumulo per acqua calda e acqua refrigerata. Schema idraulico indicativo (Fonte: SYSTEMA S.P.A.: Gruppo frigo e torre evaporativa monoblocco)**

La tecnologia del solar desiccant cooling ben si colloca in tale scenario, essendo un sistema a ciclo aperto. Essa permette, tramite l'uso di materiali essiccanti e del raffreddamento evaporativo, di realizzare la deumidificazione ed il raffrescamento sfruttando gli apporti gratuiti forniti sotto forma di energia termica prodotta a partire da un apposito sistema di captazione della radiazione solare, il tutto caratterizzato da un consumo minimo o nullo di energia elettrica quando il sistema è dotato di collettori fotovoltaici.

Tre le tecnologie desiccant cooling più innovative si trova il sistema a letti adsorbenti fissi e raffreddati utilizzato nell'unità freescool installata.

Il principio di funzionamento di tale tecnologia può essere sintetizzato nello schema riportato in figura 5.



**Figura 5a. Schema di funzionamento Solar DEC: fase di immissione aria nell'ambiente servito**

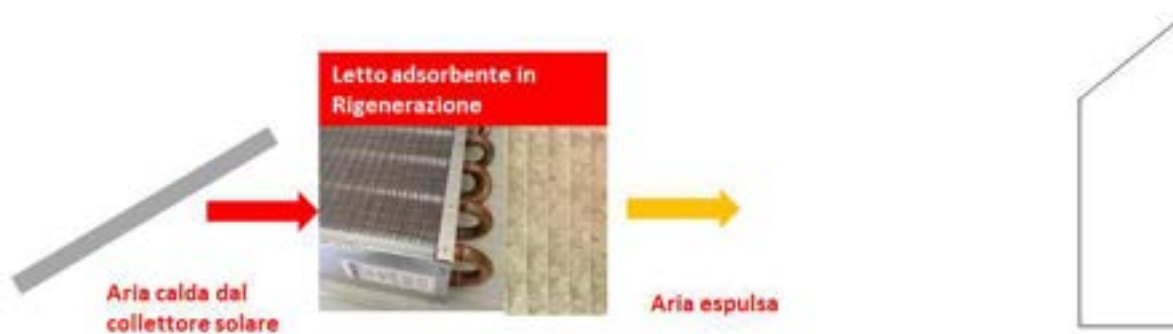


Figura 5b. Schema di funzionamento Solar DEC: fase di rigenerazione

I principali componenti della macchina solar DEC sono:

- collettore solare termico ad aria;
- scambiatori evaporativi a pacco;
- torre evaporativa;
- letto adsorbente;
- ventilatori;
- ausiliari.

La produzione di aria con umidità relativa e temperatura tali da realizzare la climatizzazione di un ambiente avviene in due fasi: durante la prima fase secca viene effettuata una deumidificazione dell'aria a temperatura pressoché costante; in una seconda fase l'aria viene raffreddata a titolo costante.

Nello specifico si ha che l'aria calda prodotta dal collettore solare termico è utilizzata per essiccare i letti adsorbenti; il passaggio di aria calda nei letti provoca la rigenerazione di questi ultimi rendendoli quindi utilizzabili in modo ciclico. I letti adsorbenti sono costituiti da batterie alettate tra le cui alette è posto il materiale essiccante. L'aria secca così prodotta viene miscelata con l'aria di ritorno dall'edificio. L'aria di miscela è successivamente raffreddata tramite un sistema di scambiatori di calore evaporativi a pacco. L'aria così raffreddata viene immessa in ambiente. Uno dei vantaggi più importanti di tale sistema solar DEC è l'utilizzo dell'acqua come unico fluido di lavoro.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

L'innovativo climatizzatore FRESCO office è stato progettato per essere compatto e svolgere funzioni di ventilazione, deumidificazione e raffreddamento (successivamente verrà studiato anche in funzione di riscaldamento invernale) utilizzando solamente il calore fornito dal sole.

Il sistema è essenzialmente composto da un involucro in alluminio che comprende collettori solari di tipo termico e fotovoltaico, e diversi componenti che permettono il funzionamento della macchina:

- due letti adsorbenti;
- una torre di raffreddamento integrata;
- due scambiatori di calore evaporativi a pacco;
- un ventilatore solare;
- un ventilatore principale;
- altri dispositivi ausiliari per il processo di trattamento dell'aria.

Le principali caratteristiche tecniche dell'impianto FRESCO office sono:

- dimensioni impianto in pianta: 2,4 x 2 m<sup>2</sup>;
- superficie totale dei collettori solari: 4,8 m<sup>2</sup>;
- inclinazione pannelli: 25°;
- portata d'aria immessa in ambiente: 1000 m<sup>3</sup>/h;

- potenza frigorifera massima: 5.5 kW ( $T_{est} = 35^{\circ}\text{C}$ ,  $x_{est} = 14 \text{ g/kg}$ );
- potenza elettrica assorbita: 0,25 kW.

Il prototipo si basa su una particolare sequenza di trattamenti dell'aria tali da permettere il controllo della temperatura e dell'umidità dell'ambiente servito.

Il funzionamento del sistema è basato sulle seguenti fasi (Figura 6):

- una portata d'aria calda e umida, tipica di una giornata estiva, proveniente dall'ambiente esterno (1) attraversa un letto adsorbente riempito di silica gel che ne assorbe l'umidità rendendola molto secca (2). Grazie alla presenza di tubi alettati attraversati da una quantità d'acqua refrigerata proveniente dalla torre evaporativa, il flusso d'aria entrante subisce anche un primo leggero raffreddamento;
- l'aria deumidificata (2) viene miscelata con l'aria di ritorno dall'edificio (3). La temperatura e l'umidità della miscela d'aria ottenuta dipendono dalle caratteristiche dei due flussi;
- il ventilatore principale (3) spinge l'aria miscelata verso i due scambiatori evaporativi a pacco. L'aria miscelata (4), che ha una portata pari a circa il 140% della portata d'aria fornita all'edificio, viene divisa in due flussi: il flusso principale con una portata pari al 100% della portata d'aria fornita all'edificio entra negli scambiatori evaporativi subendo un raffreddamento per venire successivamente immesso nell'ambiente climatizzato; il flusso secondario con una portata pari al 40% della portata d'aria fornita all'edificio verrà utilizzato per raffreddare il flusso principale per effetto indiretto. Per produrre tale effetto di raffreddamento, il flusso d'aria secondario confluisce verso l'alto, dove investe l'acqua precedentemente nebulizzata tramite degli ugelli per ottenere l'effetto di evaporazione. Il flusso primario non entra in contatto diretto con l'aria del flusso secondario, ma cede il suo calore tramite contatto indiretto, senza quindi incrementare il suo contenuto di umidità. L'acqua viene successivamente raccolta in una bacinella posta sotto i due scambiatori, in modo che tramite una pompa di circolazione venga rimandata verso gli ugelli per essere nuovamente nebulizzata ed essere investita dall'aria. L'acqua viene fornita dalla rete per un consumo massimo pari a circa 15 l/h. La bacinella è collegata alla bacinella di raccolta dell'acqua nella torre evaporativa rendendo sufficiente un solo collegamento con la rete idraulica;
- l'aria raffreddata (4) viene così immessa nell'ambiente (5);
- parte della miscela che ha subito l'effetto di evaporazione negli scambiatori evaporativi (4) viene ceduta alla torre di raffreddamento integrata nel sistema (6). L'acqua così raffreddata sarà pronta per essere ricircolata verso gli ugelli. L'acqua invece proveniente dai tubi alettati presenti nei letti adsorbenti cede calore alla miscela nella torre evaporativa che poi viene espulsa (7);
- i collettori solari captano la radiazione solare (8) utilizzata per la produzione di aria calda che a sua volta viene usata per far evaporare l'umidità immagazzinata nei letti adsorbenti (rigenerazione). Come si vede dalla schermata acquisita da LABVIEW, la freccia rossa indica quale letto è in rigenerazione ed è investito dal flusso di aria calda proveniente dai collettori solari (9) che verrà espulso dopo aver contribuito ad essiccare il letto in silica gel (10). Per assicurare un funzionamento continuo del sistema sono presenti due letti essiccanti cosicché mentre uno lavora per deumidificare l'aria, l'altro è rigenerato utilizzando il calore proveniente dal campo solare. Dopo un certo tempo di funzionamento il sistema di controllo automatico invertirà il funzionamento dei due letti in modo tale da utilizzare il letto appena rigenerato per deumidificare l'aria, sottoponendo l'altro alla sua riattivazione. Il controllo automatico funziona tramite un rilevatore di umidità che ne verifica l'effettivo stato dell'aria in uscita dal letto essiccante paragonato al flusso d'aria in entrata. Quando viene rilevato un calo del funzionamento del letto, l'acqua, proveniente dalla torre evaporativa, inizia a circolare nei tubi presenti all'interno del secondo letto in modo da raggiungere lo stato di esercizio, ed in seguito invertire la direzione del flusso d'aria in entrata. In questo modo s'interromperà il flusso d'acqua nel primo letto essiccante che continuerà comunque a lavorare fino a che l'altro non sarà pronto. Una volta invertito il flusso, il primo letto sarà essiccato tramite il flusso di aria calda proveniente dal solare termico;

- il pannello fotovoltaico cattura l'energia solare trasformandola in energia elettrica (11). Quest'energia è immagazzinata in due batterie che forniranno l'energia necessaria per il funzionamento delle pompe di circolazione, dei due ventilatori e degli ausiliari (12).

I punti di forza di tale nuovo sistema possono essere così sintetizzati:

- condizionamento degli spazi abitativi e/o lavorativi (raffreddamento, deumidificazione, ricambio dell'aria);
- sistema passivo che si traduce in efficienza energetica grazie al fotovoltaico che permette al sistema di essere quasi o totalmente autonomo dal sistema di rete elettrica;
- sostanziali risparmi sui costi energetici, anche grazie alla possibilità di accesso ad incentivi nazionali e comunitari in grado di ridurre l'investimento iniziale ed i tempi di rientro;
- rispetto dell'ambiente e utilizzo di fonti energetiche rinnovabili;
- assenza di gas nocivi per l'atmosfera, il refrigerante utilizzato è l'acqua.

Le applicazioni del sistema FREESCOO sono diverse: trattamento dell'aria, climatizzazione nel settore residenziale e quello del cosiddetto "commerciale leggero" (uffici, negozi, etc.). Grazie alla sua modularità, si possono raggiungere potenze di deumidificazione e raffreddamento elevate. Inoltre, grazie all'uso di pannelli fotovoltaici, si può ipotizzare un utilizzo anche in ambienti caratterizzata dall'assenza totale o parziale di energia elettrica, come bungalow o case mobili.

Può essere configurato in modo da poter essere installato sia su tetto piano che su tetto a falda.

Sull'idea alla base del sistema è depositata una domanda di brevetto per invenzione industriale presso l'Ufficio Brevetti della Camera di Commercio di Catania N. CT2012 A000013 alla quale è seguita l'estensione a livello internazionale sotto forma di PCT (PCT/IB2013/058322).

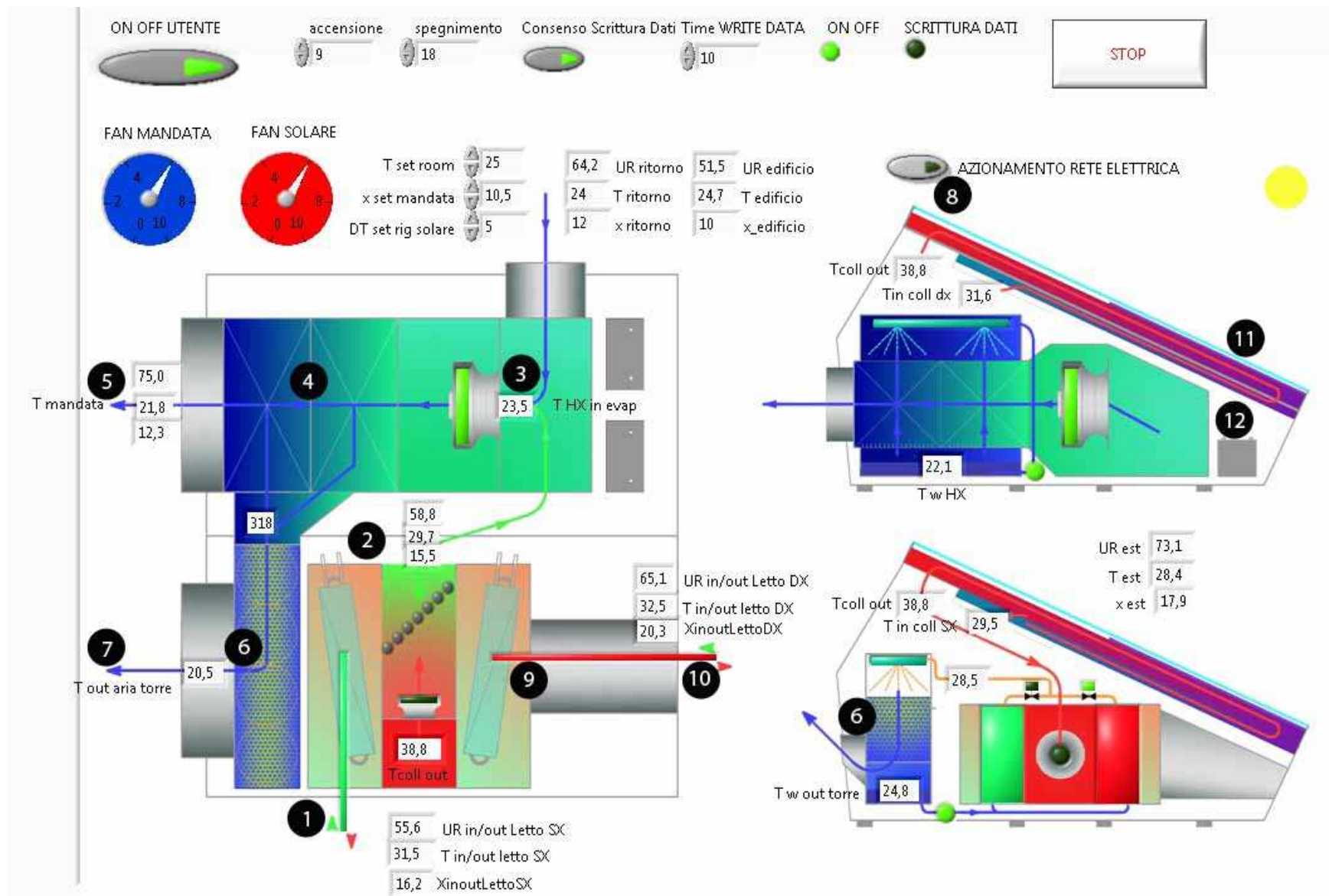


Figura 6. Schema di funzionamento solar DEC

### 3 Componenti principali dell'impianto

Di seguito sono elencati e descritti i vari componenti dell'impianto FREESCOO:

- collettori solari termici e fotovoltaici;
- letti adsorbenti in silica gel;
- torre evaporativa;
- scambiatori di calore evaporativi a pacco;
- strumenti per il monitoraggio e l'acquisizione dei dati sperimentali.

#### 3.1 Apparato solare

La parte solare è composta da due collettori solari ad aria di 2,4 m<sup>2</sup> ciascuno, aventi il compito di captare la radiazione solare per la produzione di aria calda utilizzata per essiccare i letti adsorbenti, che saranno così pronti per deumidificare l'aria in entrata (Figure 7-8).

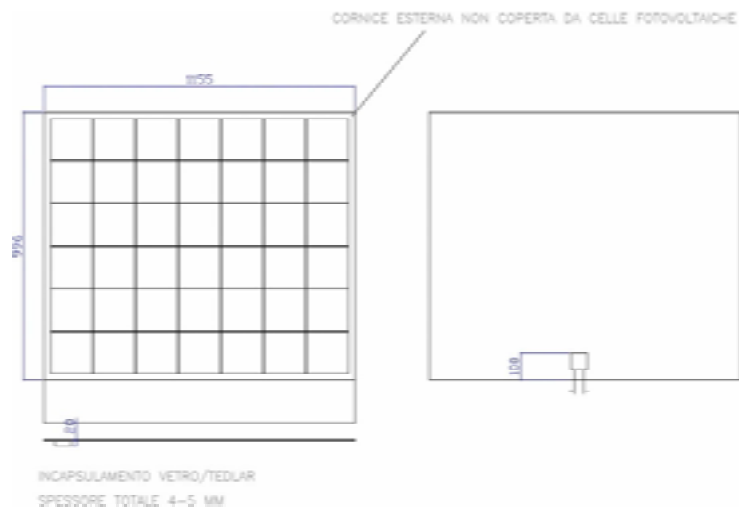
I collettori termici sono ad aria ed hanno caratteristiche costruttive simili a quelle dei normali pannelli vetrati ad acqua. Le differenti proprietà fisiche dei due fluidi comportano diversità nelle applicazioni e nelle tipologie di impianto.

L'aria viene fatta circolare al disotto di un assorbitore di tipo selettivo coperto da una lastra di vetro extrachiaro temperato. Poiché il coefficiente di scambio convettivo aria-piastra, a parità di numero di Reynolds, è circa 50 volte più piccolo di quello dell'acqua occorre assicurare all'aria ampie superfici di scambio. Per questo motivo l'assorbitore è provvisto di uno speciale sistema di alettatura che ne aumenta la superficie di scambio di circa 7 volte. .

Utilizzando l'aria come fluido termovettore il calore generato dal surriscaldamento delle celle fotovoltaiche viene asportato raffreddando il laminato fotovoltaico, mentre l'aria calda viene trasportata ed impiegata per l'essiccazione dei letti in silica gel. Le rese in termini di temperature raggiunte in uscita dal pannello solare sono minori all'aumentare del grado di copertura della lastra vetrata con celle fotovoltaiche.



Figura 7. Vista frontale dell'impianto FREESCOO



**Figura 8. Collettore solare fotovoltaico installato**

L'aria in ingresso ai collettori solari è prelevata dal volume interno della macchina in modo da ottenere un primo incremento di temperatura dovuto al calore trasmesso dai pannelli di rivestimento in lamiera. Successivamente l'aria passa al disotto dei moduli fotovoltaici posti nella parte bassa dei collettori e dotati di un sistema di alette. Infine l'aria attraversa la parte di assorbitore selettivo che assicura un ulteriore riscaldamento. La movimentazione dell'aria nei collettori solari viene effettuata dal ventilatore denominato "solare".



**Figura 9. Vista dei canali di collegamento dei collettori solari al ventilatore solare**

Il calore recuperato dai collettori solari termici viene indirizzato dal ventilatore solare al letto adsorbente dove avviene il desorbimento del vapore acqueo accumulato, come verrà spiegato meglio nel prossimo paragrafo. Invece, l'energia elettrica prodotta dai moduli solari fotovoltaici è immagazzinata in due batterie da 100 Ah(Figura 10).



Battery Model	DC 12-100			
Designed Cycle Life	> 350 cycles @ -0.5CA to 9.6V			
Capacity(25°C)	20HR(5.04A,1.75V)	10HR(10A,1.75V)	5HR(16.5A,1.75V)	1HR(60A,1.75V)
	101AH	100AH	82.5AH	62AH
Dimensions	Length	Width	Height	Total Height
	330mm(12.99inch)	172mm(6.77inch)	215mm(8.46inch)	221mm(8.7inch)
Approx. Weight	33kg (68.36 lbs)			
Internal Resistance	Full charged at 25°C: 0.005 Ohm			
Self Discharge	3% of capacity declined per month at (25°C)			
Capacity Affected by Temp.(20HR)	40°C	25°C	0°C	-15°C
	102%	100%	85%	65%
Charge Voltage(25°C)	Cycle use		Float use	
	14.4-15V(-30mV/°C), max. Current: 25A		13.6-13.8V(-20mV/°C)	

Figura 10. Batteria installata sull'impianto FREESCOO modello da 100 AH

Il ventilatore solare è di tipo centrifugo radiale con singolo ingresso e pale curve all'indietro (Figura 11).

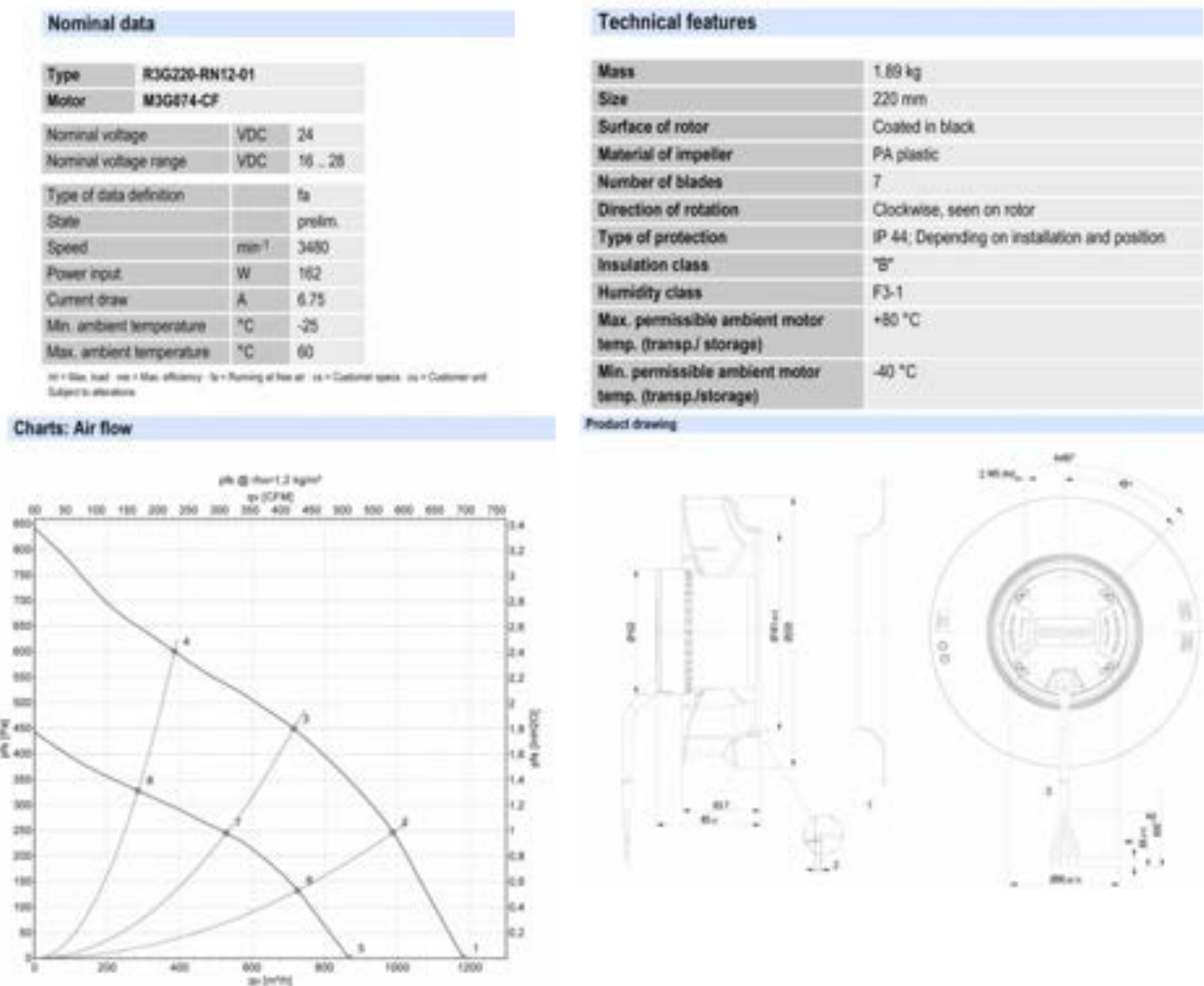


Figura 11. Ventilatore solare installato

### 3.2 Letti adsorbenti in silica gel

Il sistema si basa su un nuovo processo DEC (Desiccant and Evaporative Cooling) che utilizza due letti adsorbenti fissi.

L'innovativo letto di adsorbimento proposto è basato su una comune batteria alettata normalmente in uso nel settore del condizionamento, in cui gli spazi tra le alette sono riempiti con granuli di gel di silice. La caratteristica principale di questo elemento è di consentire simultaneamente la deumidificazione ed il raffreddamento dell'aria. Inoltre, poiché il componente accoglie una notevole quantità di materiale adsorbente, l'energia solare può essere efficientemente accumulata nel materiale adsorbente in termini di capacità di adsorbimento. Questo potenziale può essere utilizzato quando il calore di rigenerazione non è disponibile, riducendo fortemente la necessità di accumulo termico nel circuito solare.

Nell'impianto sono presenti due letti adsorbenti, ognuno contenente circa 25 kg di silica gel in grani (Figura 12) con un volume lordo di  $0,51 \times 0,95 \times 0,13 \text{ m}^3$ .



#### Typical properties

Parameter	unit	beads
size	mm	0.5-1.5 0.5-2.0 1-2 1-3 2-4, 3-6
Residual humidity (180°C 2h)	%	<2
Undersize particles	%	<5
Oversize particles	%	<5 <2 (1-2, 1-3, 2-4)

#### Adsorption capacity for all forms:

Rel. humidity (%RH)	20	40	50	80
Adsorption (g H <sub>2</sub> O/g, 25°C)	>10	>21	>26	>33

Figura 12. Silica gel in granuli

Il silica gel, detto anche gel di Silice, è un prodotto disidratante di sintesi, ottenuto chimicamente da  $\text{SiO}_2$  amorfo (biossido di silicio). Il gel di silice non presenta tossicità ed ha un'elevata capacità di assorbimento dell'umidità. Si presenta in cristalli amorfi (granuli) o sferette di colore bianco traslucido. E' molto simile al normale sale grosso da cucina. Date queste sue caratteristiche fisiche, si presta bene ad essere utilizzato come accumulo per la deumidificazione.

Il letto adsorbente è in grado di accumulare energia solare (sotto forma di capacità adsorbente) per garantire una continuità del servizio anche in assenza di radiazione per un periodo variabile dell'ordine di 3-5 ore. In questo intervallo il materiale essiccante viene attraversato dalla portata d'aria da trattare e si satura di umidità. A questo punto deve essere "riattivato" per mezzo della fornitura di calore, così come una spugna usata per asciugare dell'acqua deve essere strizzata dopo un certo tempo di utilizzo. Così il calore solare, sotto forma di aria calda prodotta nei pannelli solari termici, è utilizzato per mantenere asciutto nel tempo il materiale essiccante.

L'aria che attraversa i due letti adsorbenti non solo subisce un'importante deumidificazione, ma subisce anche un leggero raffreddamento grazie al passaggio su tubi contenenti acqua refrigerata proveniente dalla torre evaporativa (Figura 13).

L'acqua invece in uscita dai tubi, è inviata agli ugelli della torre evaporativa, dove cede calore ad un flusso d'aria uscente dalla macchina così da poter riiniziare il ciclo.



Standard H		DATI TERMOIDINAMICI		I/T4/032/0101	
<b>LATO ALETTE</b>		Richies.	Calcol.	<b>LATO TUBI</b>	
Fluido: aria				Fluido: ACQUA	
Quantità	m <sup>3</sup> /h	450	450	Quantità	l/s
Aria secca	kg/s		0,15	Temperatura ingresso	°C
Peso specifico	kg/m <sup>3</sup>		1,2250	Temperatura uscita	°C
Temp. ingresso	°C	36	36,0	Massa specifica	kg/dm <sup>3</sup>
Umidità relativa	%	60	60	Calore specif.	kJ/kg°C
Temperatura uscita	°C		32,7	Conducib.termica	W/m°C
Bulbo umido	°C		28,3	Viscosità	mPa s
Umidità relativa	%		72	Velocità	m/s
Fattore calore sensib.			1,00	Perdita di carico	kPa
Velocità front.	m/s		0,3		
Perdita di carico	Pa		0		
Capacità	kW		0,52		
<b>DATI BATTERIA</b>					
Lunghezza totale	mm	950	950	Diametro tubi	mm
Altezza totale	mm	550	550	Spessore tubi	mm
Numero ranghi		3	3,00	Spessore alette	mm
Massa a secco, circa	kg		17	Superficie	m <sup>2</sup>
Contenuto di fluido	dm <sup>3</sup>		5,1		
MODELLO: P60-16 AR 3R-BT-785A-6,0Pa Cu/Al					

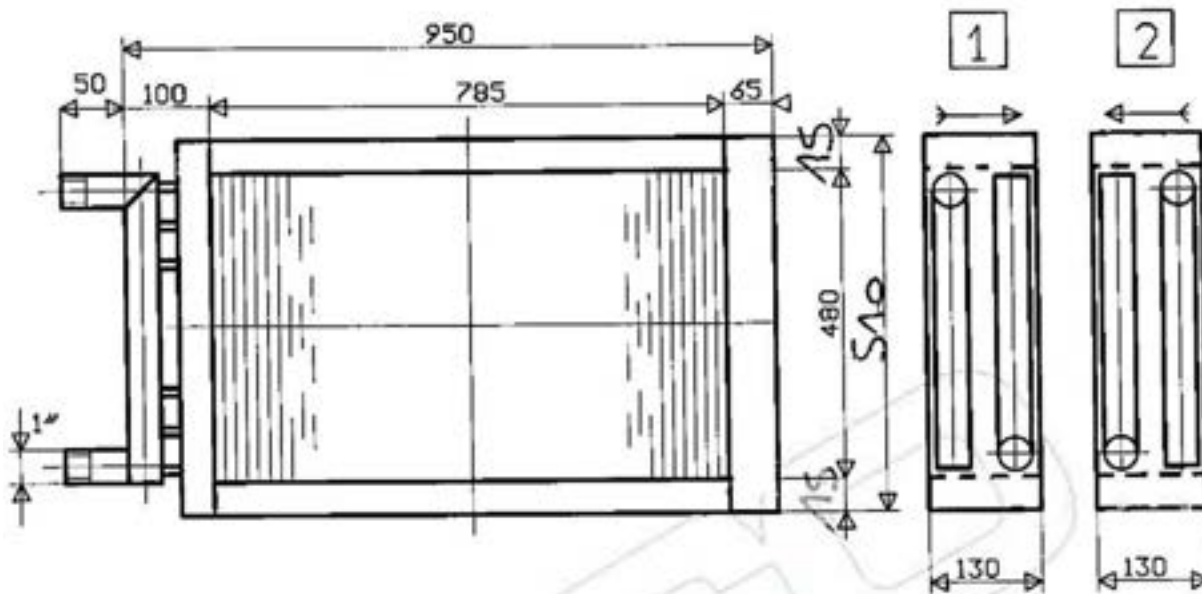


Figura 13. Batteria alettata

### 3.3 Torre evaporativa

La torre evaporativa, sfrutta un semplice principio naturale secondo il quale l'evaporazione forzata di una minima quantità d'acqua provoca un abbassamento della temperatura della massa d'acqua principale. L'acqua così raffreddata circola all'interno dei letti ad adsorbimento tramite una pompa di circolazione, in modo da mantenere fresco il materiale essiccante ed eseguire inoltre un primo raffreddamento del flusso d'aria in entrata. Il raffreddamento del materiale essiccante permette un aumento delle prestazioni in termini di capacità di deumidificazione.

La vasca della torre evaporativa è comunicante con la bacinella posta in corrispondenza degli scambiatori evaporativi (Figura 14).

Un'altra parte dell'acqua verrà invece ricircolata e mandata agli ugelli che spruzzano un flusso d'aria proveniente dagli scambiatori di calore evaporativi.

Diversamente dalle classiche torri evaporative, il flusso d'aria utilizzato in questo caso non proviene dall'esterno ma è parte dell'aria che verrà immessa in ambiente. Questo fa sì che l'aria sia priva di sabbia, polvere, insetti e fibre vegetali. Questi contaminanti atmosferici, nelle classiche torri evaporative, si mescolano infatti all'acqua di raffreddamento del processo e, a lungo andare, tali particelle sospese si depositano sulle superfici di scambio termico. Dopo un certo periodo queste superfici s'incrostano e diventano isolanti provocando il surriscaldamento delle apparecchiature e la necessità di interventi di

riparazione o sostituzione. Rimuovendo la presenza di queste particelle sospese meccanicamente, si riducono notevolmente la necessità di manutenzione per il trattamento chimico dell'acqua e lo spurgo dal sistema che si limita all'eliminazione dell'eventuale presenza di calcare.



Figura 14. Torre evaporativa in funzione

### 3.4 Ventilatore principale

Il ventilatore principale è di tipo centrifugo radiale con singolo ingresso e pale curve all'indietro (Figura 15).

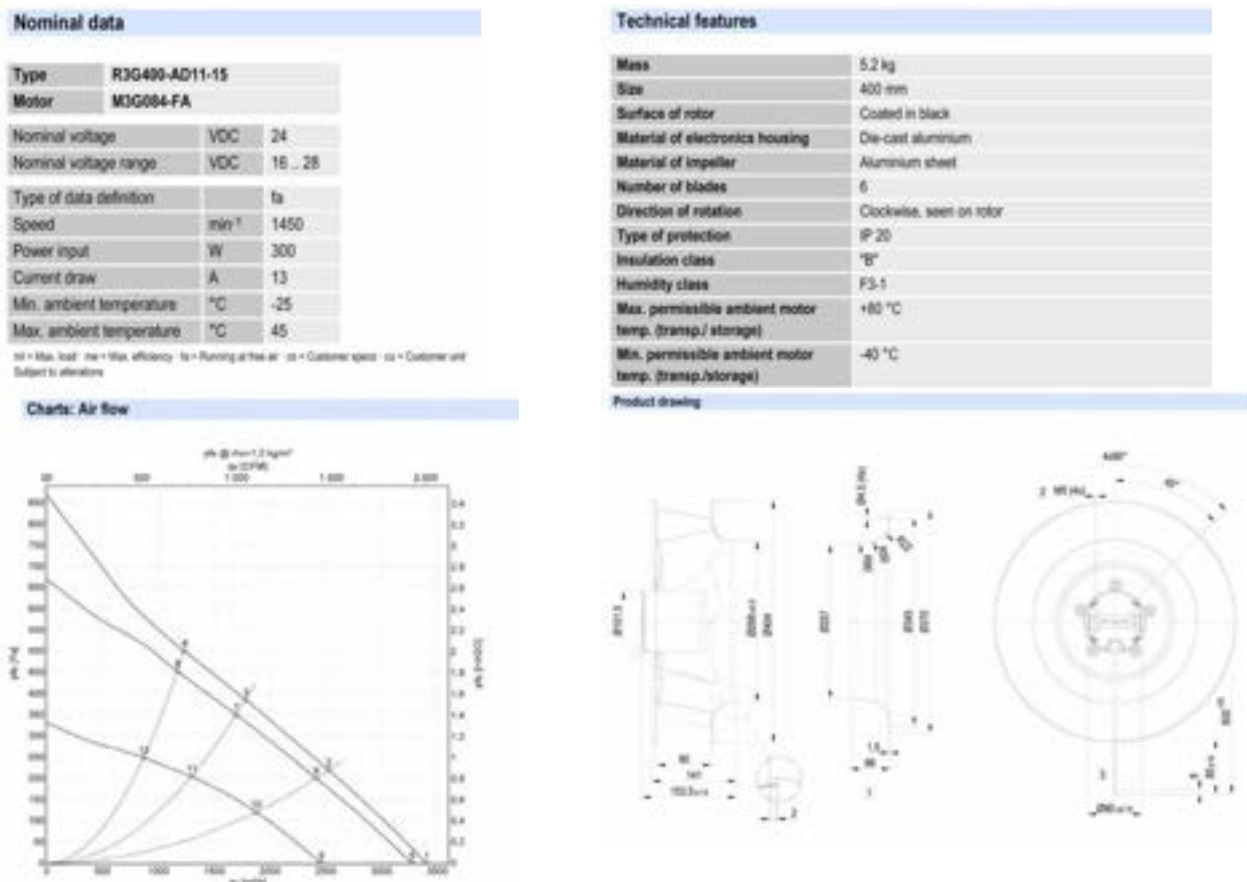


Figura 15. Ventilatore principale

### 3.5 Scambiatori di calore evaporativo a pacco

Accanto ai letti adsorbenti, gli scambiatori di calore evaporativi a pacco utilizzati per il raffreddamento dell'aria, rappresentano l'altro aspetto innovativo dell'impianto FREESCOO.

Il funzionamento del ciclo si basa sull'effetto di raffreddamento evaporativo prodotto da un getto d'acqua nebulizzata nella parte alta dello scambiatore (Figura 16), che viene attraversato da una parte dell'aria di miscela che verrà utilizzata come aria secondaria.

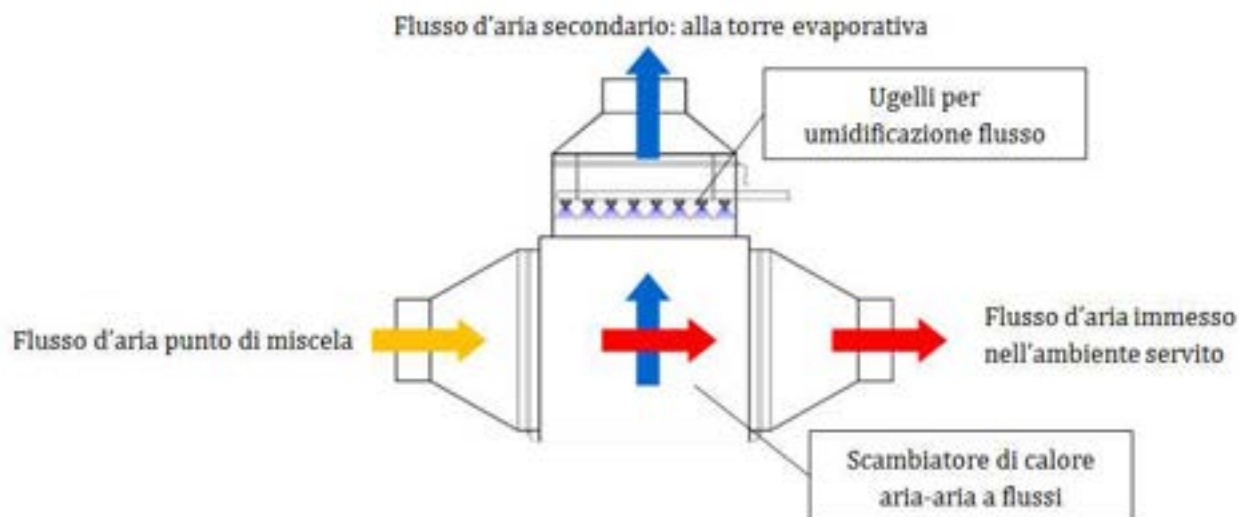


Figura 16a. Raffreddamento evaporativo indiretto



Figura 16b. Parte alta degli scambiatori di calore con ugelli nebulizzanti azionati

L'aria secondaria attraversa uno scambiatore del tipo a flussi incrociati (Figura 17) raffreddando l'aria primaria più secca che viene immessa in ambiente. In questo modo l'aria di mandata non viene umidificata, ma solo raffreddata in quanto non entra fisicamente in contatto con il flusso di aria secondario. Lo scambiatore è composto da lastre di alluminio trattate con un rivestimento anticorrosivo in resina epossidica e sigillate in modo da avere due flussi d'aria che non entrano in contatto diretto tra di loro. Essendo la portata dell'aria di miscela pari al 140% dell'aria primaria immessa in ambiente, il 40% di questa portata verrà utilizzata come flusso secondario ed il restante 100% verrà inviata all'ambiente servito.

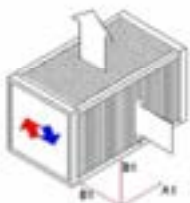
<b>Caratteristiche</b>		Temperatura di esercizio -30°C +90°C	
Protezione epossidica del pacco scambiatore		Pressione differenziale massima 1500 Pa	
Fianchi in acciaio zincato		Fianchi con piega installazione a canale	
Sigillatura supplementare del pacco scambiatore			
Protezione epossidica del telaio			
<b>Prestazioni</b>		<b>Estate</b>	
Recupero	kW	0.62	
Rendimento Umido	%	74.2	
Rapporto di Temp. (EN 308 std) Umido	%	24.7	
Rendimento Secco	%	74.2	
Rapporto di Temp. (EN 308 std) Secco	%	24.7	
Classe di recupero (EN 13053)		H4	
<b>Rinnovo</b>			
Portata Std (1.2 kg/m <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup> /h	1500	
Portata aria in peso	kg/h	1800	
Temperatura entrata	°C	30.0	
Umidità relativa entrata	%	60.0	
Temperatura uscita	°C	28.8	
Umidità relativa uscita	%	64.5	
Perdita di carico	Pa	40	
Velocità frontale	m/s	1.61	
<b>Espulsione</b>			
Portata Std (1.2 kg/m <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup> /h	500	
Portata aria in peso	kg/h	600	
Temperatura entrata	°C	25.0	
Umidità relativa entrata	%	50.0	
Temperatura uscita	°C	28.7	
Umidità relativa uscita	%	40.1	
Perdita di carico	Pa	6	
Velocità frontale	m/s	0.54	
<b>Dimensioni e pesi</b>			
Altezza (B1)	mm:	400	
Lunghezza (A1)	mm:	800	
Profondità (B1)	mm:	400	
Diagonale	mm:	566	
Lunghezza Aleettata	mm:	760	
Peso	kg:	14	
			
		Pressione Atmosferica mbar 1013	
<b>Modo di calcolo</b>			
		- Singolo	
		Calcolo di un recuperatore singolo.	
<b>Applicazione Speciale:</b>			
		- Piscine	

Figura 17a. Scambiatore di calore evaporativo a pacco



Figura 17b. Scambiatore di calore evaporativo a pacco

### 3.6 Pompa di circolazione dell'acqua

La circolazione dell'acqua viene effettuata mediante un'elettropompa centrifuga, marca Techma GPM Srl mod. PD – E 055 (Figure 18-19).



Figura 18 . Pompa di circolazione dell'acqua

MODEL	VOLTAGE V DC	INPUT POWER W	FITTINGS		TOTAL HEAD m	FLOW l/min	PUMP MATERIALS			PCB POWER CONTROL BOARD	LIQUID TEMP °C
			SUCTION	DISCHARGE			CASING	BACK CASING	IMPELLER		
PD - E 055 IT2	24	38	HB 15 mm		10	15	PPE GF	PPE GF	PP GF	INT	40
PD - E 055 IT3			TH 1/2"		9,5						

- HB Hose barbed pump
- TH casing
- INT Threaded pump casing
- SEP Integrated PCB
- PPE GF Separated PCB
- PPS GF Noryl glass filled
- PP GF Ryton glass filled

Figura 19. Caratteristiche pompa di circolazione dell'acqua

### 3.7 Elettrovalvola

Nell'impianto sono installate due elettrovalvole che attivano il passaggio dell'acqua proveniente dalla torre evaporativa verso la batteria alettata che deumidifica l'aria prelevata dall'esterno: la seconda batteria sarà in fase di rigenerazione (Figura 20 e Figura 21).

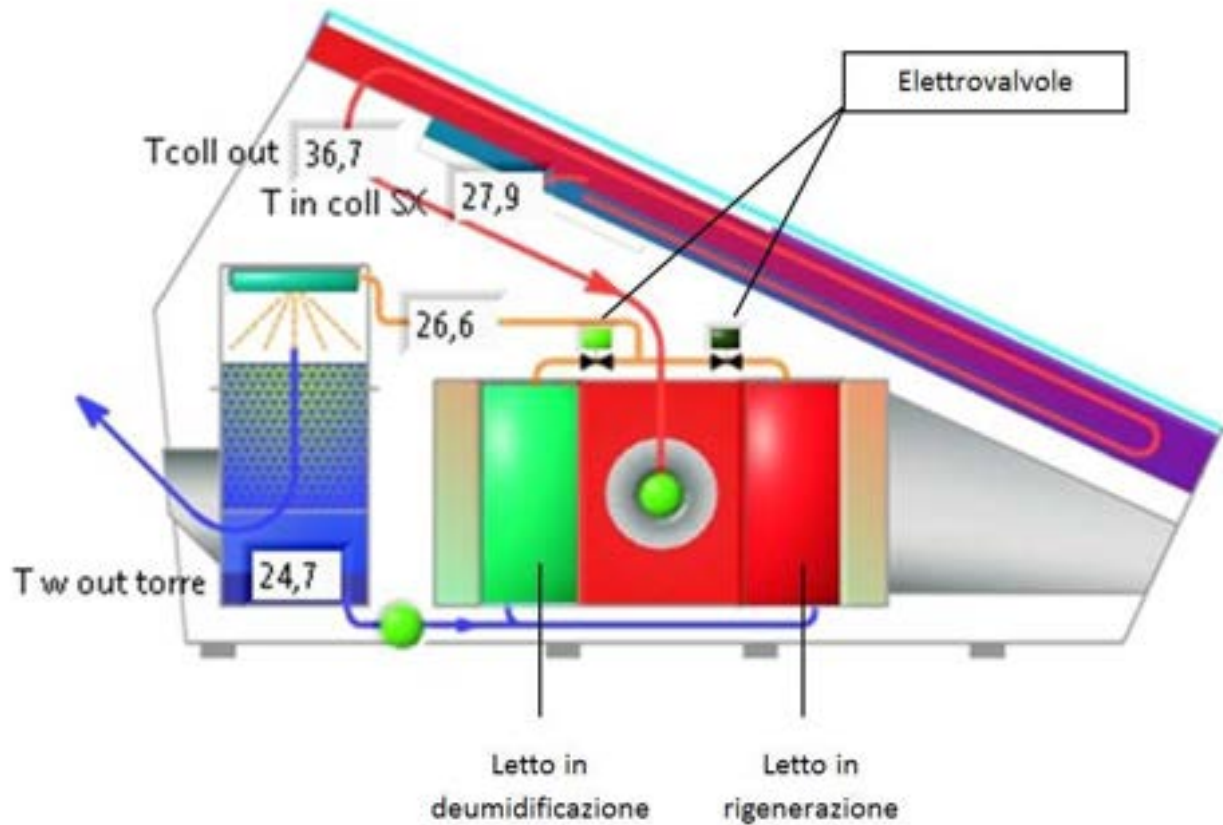


Figura 20. Batterie alettate in deumidificazione ed in rigenerazione



CLASSIFICAZIONE	
Tipologia	Semplice
Geometria	180°
CARATTERISTICHE DI LAVORO	
Pressione di esercizio	0,2 + 10 bar
Temperatura ambiente	0 + 60°C
Temperatura fluido	25°C; 60°C; 90°C
Ciclo di lavoro	ED 100%; ED 60%(90°C)
Direzione del fluido	Unidirezionale
Diametro di passaggio	DN 8 mm
Comando	Bistabile; NA; NC
CARATTERISTICHE FISICHE	
Corpo valvola	PA 6,6 30% fibra vetro
Membrane e guarnizioni	EPDM; NBR (buna); Silicone (MVQ)
Nucleo	Acciaio INOX
Molla	Acciaio INOX
Assemblaggio	Con viti ispezionabile

Figura 21. Caratteristiche tecniche elettrovalvole uscita acqua batterie alettate

### 3.8 Sistema di monitoraggio ed acquisizione dati

Il monitoraggio del funzionamento del sistema FRESCO è stato effettuato attraverso un programma implementato in ambiente Labview (Figura 22). Il funzionamento della macchina viene monitorato attraverso le grandezze acquisite dai diversi sensori installati in campo. Le grandezze monitorate sono:

- temperatura, umidità relativa dell'aria nel locale di prova;
- temperatura, umidità relativa dell'aria esterna;
- temperatura, umidità relativa dell'aria in ingresso ed uscita dei diversi componenti;
- radiazione solare incidente sul piano dei collettori;
- potenza elettrica assorbita da ciascun componente;
- velocità del ventilatore principale;
- velocità del ventilatore solare;
- stato relè di commutazione rete elettrica/fotovoltaico
- stato completamento della rigenerazione;
- stato letto in rigenerazione.

L'orario di funzionamento dell'impianto è stato settato dalle ore 9 alle ore 18. La scrittura dei dati viene effettuata ogni dieci secondi.

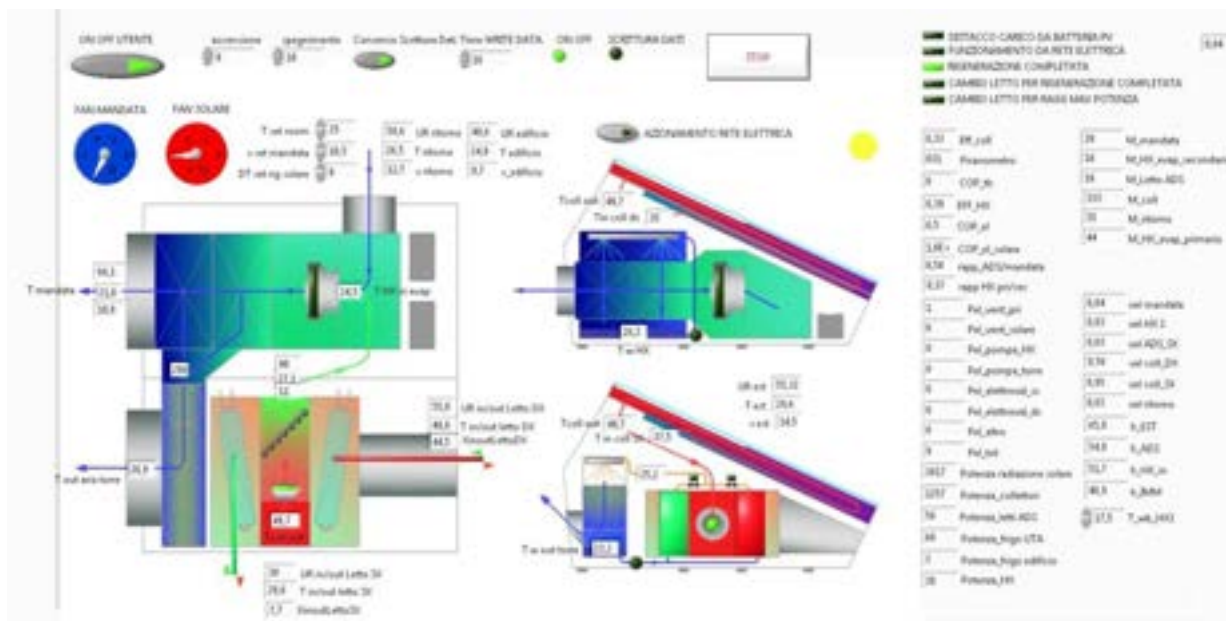


Figura 22. Programma di acquisizione e monitoraggio in Labview

#### 3.8.1 Sensori di umidità

Le sonde utilizzate per il monitoraggio dell'umidità sono del tipo HIH – serie 4000 Honeywell con precisione  $\pm 3,5\%$  posti a monte e a valle dei componenti principali (Figura 23).

**Table 1. Performance Specifications (At 5 Vdc supply and 25 °C [77 °F] unless otherwise noted.)**

Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Unit	Specific Note
Interchangeability (first order curve)	-	-	-	-	-
0% RH to 59% RH	-5	-	5	% RH	-
60% RH to 100% RH	-8	-	8	% RH	-
Accuracy (best fit straight line)	-3.5	-	+3.5	% RH	1
Hysteresis	-	3	-	% RH	-
Repeatability	-	±0.5	-	% RH	-
Settling time	-	-	70	ms	-
Response time (1/e in slow moving air)	-	5	-	s	-
Stability (at 50% RH)	-	1.2	-	% RH	-
Voltage supply	4	-	5.8	Vdc	2
Current supply	-	200	500	µA	-
Voltage output (1 <sup>st</sup> order curve fit)	$V_{out} = [V_{supply}] (0.0052(\text{sensor RH}) + 0.16)$ , typical at 25 °C				
Temperature compensation	True RH = (Sensor RH) / (1.0546 - 0.00216T), T in °C				
Output voltage temperature, coefficient at 50% RH, 5 V	-	-4	-	mV/°C	-
Operating temperature	-40[-40]	See Figure 1.	85[185]	°C[°F]	-
Operating humidity	0	See Figure 1.	100	% RH	3
Storage temperature	-50[-58]	-	125[257]	°C[°F]	-
Storage humidity	-	See Figure 2.	-	% RH	3

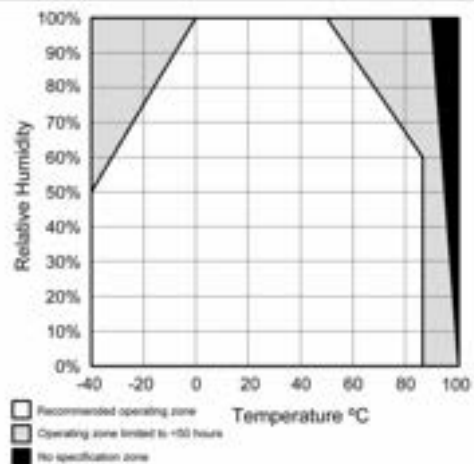
**Specific Notes:**

- Can only be achieved with the supplied slope and offset.  
For HH-4000-003 and HH-4000-004 catalog listings only.
- Device is calibrated at 5 Vdc and 25 °C.
- Non-condensing environment.

**General Notes:**

- Sensor is ratiometric to supply voltage.
- Extended exposure to ≥90% RH causes a reversible shift of 3% RH.
- Sensor is light sensitive. For best performance, shield sensor from bright light.

**Operating Environment (Non-condensing environment.)**



**Figura 23 .Sensori di umidità (nero) e di temperatura (grigio)**

### 3.8.2 Sensori di temperatura

Le sonde utilizzate per il monitoraggio della temperatura sono di tipo LM35CAZ-National Semiconductor, precisione di  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , posti a monte e a valle dei componenti principali (Figura 24).

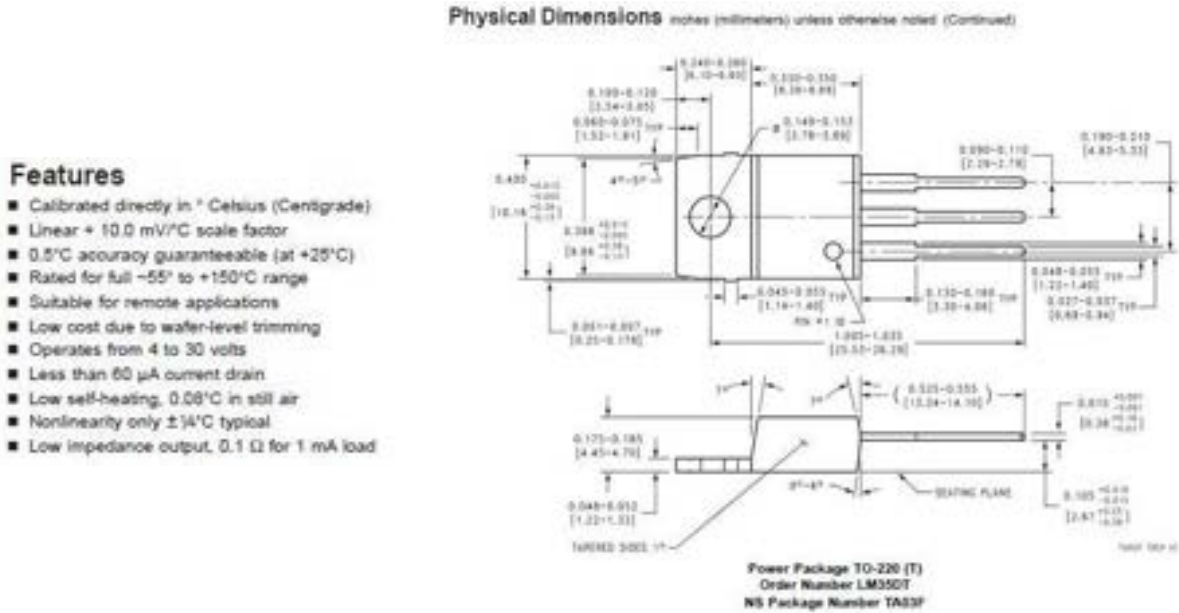


Figura 24. Caratteristiche sensori di temperatura

### 3.8.3 Misure di portata lato aria

Le portate d'aria sono state misurate utilizzando un anemometro ad elica. Le misure di velocità dell'aria sono state eseguite secondo la norma EN 16211 utilizzando il metodo di misura a griglia su più punti.

Per il calcolo della portata oraria, vale la relazione:

$$Q = S * V_m * 3600$$

dove:

Q = quantità d'aria introdotta nella cappa, in  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

S = Sezione d'ingresso dell'aria nella cappa, in  $\text{m}^2$ ;

$V_m$  = velocità media d'ingresso dell'aria nella cappa in m/sec.

Il risultato ottenuto, è stato ulteriormente moltiplicato per un parametro k che dipende dalla tipologia di griglia utilizzata. Nel nostro caso per le griglie di mandata a doppio ordine di alette regolabili abbiamo un valore di  $k_{\text{mandata}}=0,8$  circa e per le griglie di ripresa a singolo ordine di alette regolabili  $k_{\text{ripresa}}=0,9$  circa.

### 3.8.4 Piranometro

La radiazione solare è stata misurata con un piranometro (LP PYRA 02) installato sul piano dei collettori con la medesima inclinazione (25 $^\circ$ ). Lo strumento misura l'irraggiamento su una superficie piana ( $\text{Watt}/\text{m}^2$ ).

L'irraggiamento misurato è la somma della radiazione solare diretta prodotto dal sole, della radiazione diffusa e della radiazione riflessa. L' LP PYRA 02 rientra nei piranometri di Prima Classe secondo la norma ISO 9060, e secondo la pubblicazione "Guide to meteorological Instruments and Methods of Observation", quinta edizione (1983) dell'WMO (Figure 25-26).

Il software Labview è interfacciato con lo strumento rendendo disponibile all'utente il valore di irraggiamento solare misurato ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Il piranometro LP PYRA02 si basa su un sensore a termopila. La superficie sensibile della termopila è coperta con vernice nera opaca che permette al piranometro di non essere selettivo alle varie lunghezze

d'onda. Il campo spettrale del piranometro è determinato dalla trasmissione delle due cupole in vetro tipo K5.

L'energia radiante è assorbita dalla superficie annerita della termopila, creando così una differenza di temperatura tra il centro della termopila (giunto caldo) ed il corpo del piranometro (giunto freddo). La differenza di temperatura tra giunto caldo e giunto freddo è convertita in una Differenza di Potenziale grazie all'effetto Seebeck. L'LP PYRA 02 è provvisto di due cupole concentriche con diametro esterno di 50 mm e 30 mm rispettivamente questo al fine di garantire un adeguato isolamento termico della termopila dal vento, e per ridurre la sensibilità all'irradiazione termico. Le cupole proteggono la termopila dalla polvere che depositandosi sulla parte annerita ne potrebbe modificare la sensibilità spettrale.

Le caratteristiche tecniche dello strumento sono:

- sensibilità tipica: 0..1,5,10V (0-2000 W/m<sup>2</sup>);
- impedenza: 33 Ω ÷ 45 Ω;
- campo di misura: 0-2000 W/m<sup>2</sup>;
- campo di vista: 2π sr;
- campo spettrale: 305 nm ÷ 2800 nm (50%) (trasmissione delle cupole) 335 nm ÷ 2200 nm (95%);
- temperatura di lavoro: 40 °C ÷ 80 °C;

Le caratteristiche tecniche secondo ISO 9060 sono:

- tempo di risposta: <28 sec (95%);
- off-set dello Zero:
  - risposta ad una radiazione termica di 200W/m<sup>2</sup>: <15 W/m<sup>2</sup>;
  - risposta ad una cambiamento della temperatura ambiente di 5K/h: <|±4| W/m<sup>2</sup>;
- instabilità a lungo termine: <|±1.5| % (1 anno);
- non linearità: <|±1| %;
- risposta secondo legge del coseno: < |±18| W/m<sup>2</sup>;
- selettività spettrale: < |±5| %;
- risposta in funzione della temperatura: <4 %;
- risposta in funzione del Tilt: <|±2| %.

Il certificato di taratura del piranometro è riportato in figura 25.



Figura 25. Piranometro installato

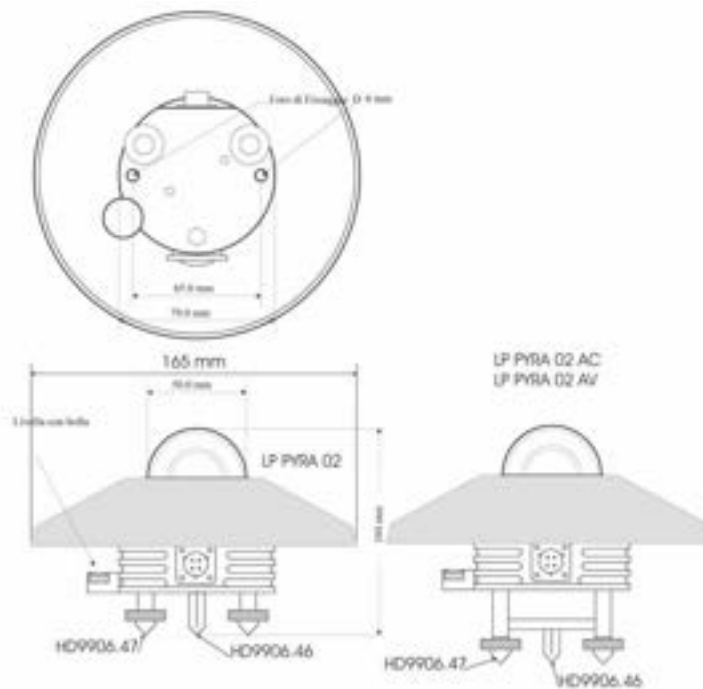


Figura 26a. Piranometro installato

Sensibilità: <i>Sensitivity:</i>	12,93	<b>mV/(kW/m<sup>2</sup>)</b>	Sensor Output LP PYRA 02
Impedenza: <i>Impedance:</i>	36,5	<b>Ω</b>	
Irradiamento: <i>Irradiance:</i>		uscita: <i>output:</i>	Transmitter Output LP PYRA 02 AV
W/m <sup>2</sup>		V	
535		2,67	

N.B. Incertezza misurando: **2.6% (K=2)**  
 N.B. *Measurand uncertainty:*

Condizioni ambientali - Environmental condition:  
 Temperatura - *Temperature* 23°C±2°C  
 Umidità relativa - *Relative humidity* 50.0%R.H.±10%R.H.

Figura 26b. Certificato taratura del piranometro installato

## 4 Caso studio

Il caso studio è rappresentato da un sistema FREESCOO office installato a servizio di un locale di prova ubicato all'interno del Centro Ricerche ENEA di Casaccia (Roma), nell'area Capanna nei pressi dell'edificio F-92 (Figura 27).

L'impianto ed il locale sono controllati da un sistema di supervisione e gestione **LabVIEW** che acquisisce e memorizza tutti i parametri di funzionamento necessari al monitoraggio ed alla determinazione delle prestazioni dell'impianto stesso.

Il periodo di monitoraggio è iniziato il 15 giugno 2014 per concludersi il 20 settembre 2014.



Figura 27. Vista prospettica del locale di prova dell'impianto FREESCOO

### 4.1 Descrizione dell'edificio

Si fornisce ora una descrizione del container che rappresenta il locale di prova, servito dall'impianto Freesco, delle precedenti componenti impiantistiche e del funzionamento del nuovo impianto.

Il container presenta una superficie di circa  $50 \text{ m}^2$  (volume= $125 \text{ m}^3$ ), in cui si trova una sala rispettivamente di  $46,5 \text{ m}^2$  e un bagno di  $3 \text{ m}^2$ . E' stato dotato di cinque fan coil da  $2,5 \text{ [kW]}$  ciascuno e di due bocchette per il trattamento dell'aria collegate attualmente al solar DEC e precedentemente ad un impianto con unità di trattamento aria. Le figure 28 e 29 mostrano la disposizione dei terminali d'impianto all'interno del container e della macchina installata in prossimità del locale di prova.

L'edificio è servito dall'impianto AI.CO.WA, cioè un impianto a pompa di calore che utilizza la  $\text{CO}_2$  (R744) come fluido refrigerante per la produzione di acqua ad calda e di acqua refrigerata, per alimentare i fan coil installati nel locale di prova. L'impianto AI.CO.WA. ha quindi il solo scopo di mantenere il locale di prova alla temperatura di  $26^\circ\text{C}$  non effettuando il ricambio dell'aria.

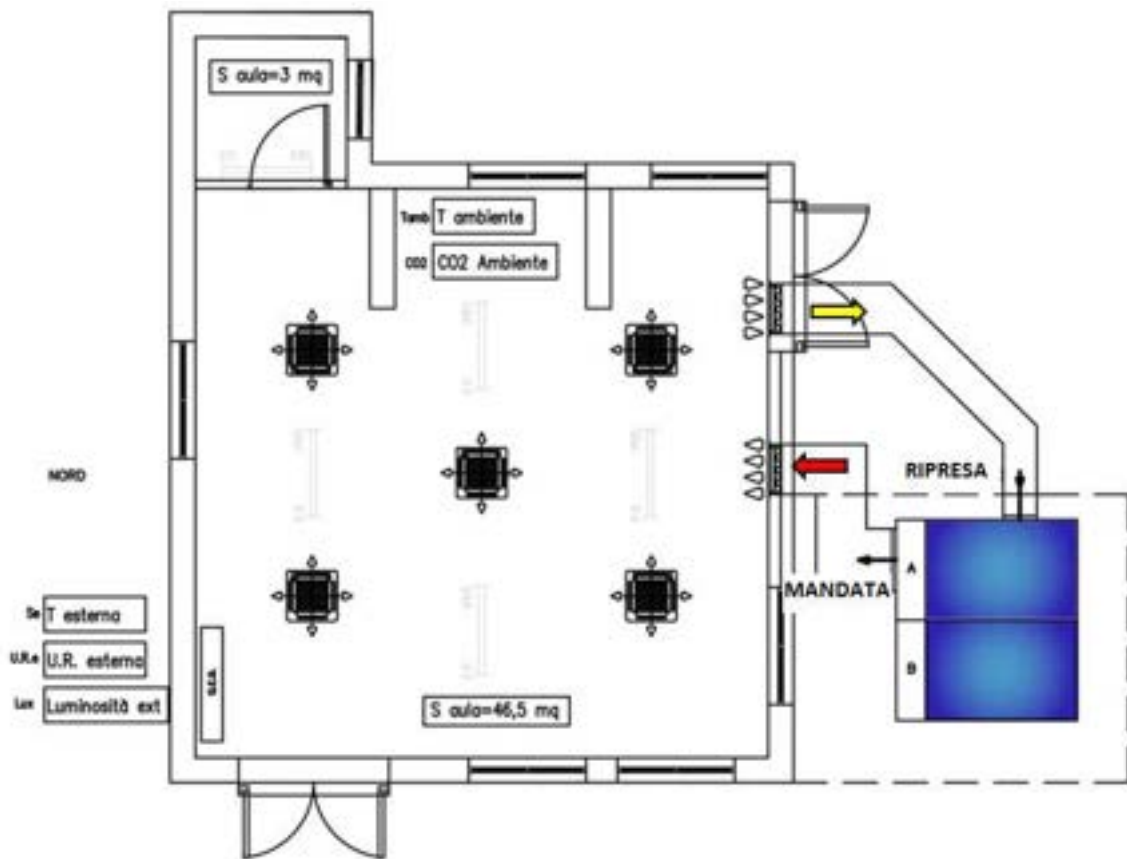


Figura 28. Planimetria generale del locale climatizzato in scala 1:100



Figura 29. Vista interna del container

I fan coil utilizzati sono delle unità terminali, operanti sia con acqua calda sia con acqua refrigerata a seconda della stagione. L'installazione nel contro soffitto permette di nascondere i tubi dell'acqua e i fili elettrici, lasciando muri e pavimenti completamente liberi. Il contro soffitto non è presente per motivi

didattici. Nell'ambiente i fan coil garantiscono un mantenimento delle temperature di progetto richieste per il comfort ambientale (26°C nella stagione estiva).

Un limite riscontrabile negli impianti a soli fan coil risiede nell'impossibilità di offrire un soddisfacente rinnovo dell'aria interna ed una regolazione dell'umidità dell'aria. Per tali motivi tale tecnologia si associa bene con un impianto solar DEC.

All'esterno dell'edificio è stato creato un massetto in cemento di 4,00X3,5 m<sup>2</sup> per l'installazione ed il posizionamento della macchina.

#### 4.2 Risultati sperimentali

Il sistema Freesco office è stato impostato in modo da mantenere una portata di mandata fissata per tutto il periodo di funzionamento pari a circa 1000 m<sup>3</sup>/h. L'obiettivo dei test sperimentali è la verifica delle prestazioni nel caso di funzionamento come unità per il trattamento dell'aria di rinnovo. Lo scopo principale del sistema è dunque la deumidificazione della portata d'aria che proviene dall'esterno. In realtà il sistema è in grado di attuare anche un parziale raffreddamento dell'aria di mandata contribuendo così all'abbattimento del carico sensibile.

Nelle figure 30 e 31 vengono riportati le caratteristiche dei punti costituenti il ciclo di funzionamento della macchina ed il rispettivo diagramma psicometrico.

	Descrizione	x	T	h
	-	g/kg	°C	kJ/kg
Aria di processo	1 Aria esterna	17.3	31.5	75.9
	2 Letto	13.0	31.2	64.6
	3 Miscelazione	10.6	27.2	54.5
	4 SC1 + SC22	10.6	22.4	49.5
Edificio	6 Aria di ritorno	9.8	25.8	50.9
Aria secondaria negli scambiatori di calore evaporativi	4 Prim.	10.6	22.4	49.5
	5 Second.	16.0	22.0	62.7
Torre di raffreddamento	5 Ingresso torre	16.0	22.0	62.7
	7 Uscita torre	19.0	24.5	73.0
Aria refrigerata	1 Aria esterna	17.3	31.5	75.9
	8 Collettore	17.3	50.5	95.6
	9 Desorbimento	22.2	38.0	95.2

Figura 30. Punti del ciclo

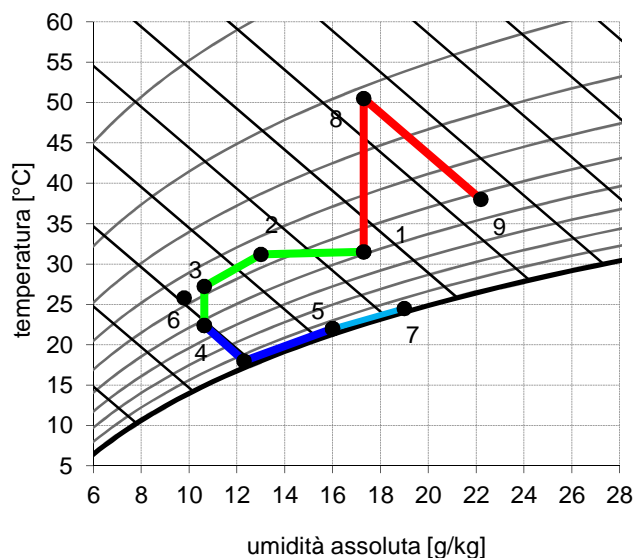


Figura 31. Diagramma psicometrico del ciclo considerato

In figura 32 è possibile rintracciare i punti del ciclo di funzionamento in corrispondenza dei diversi componenti.

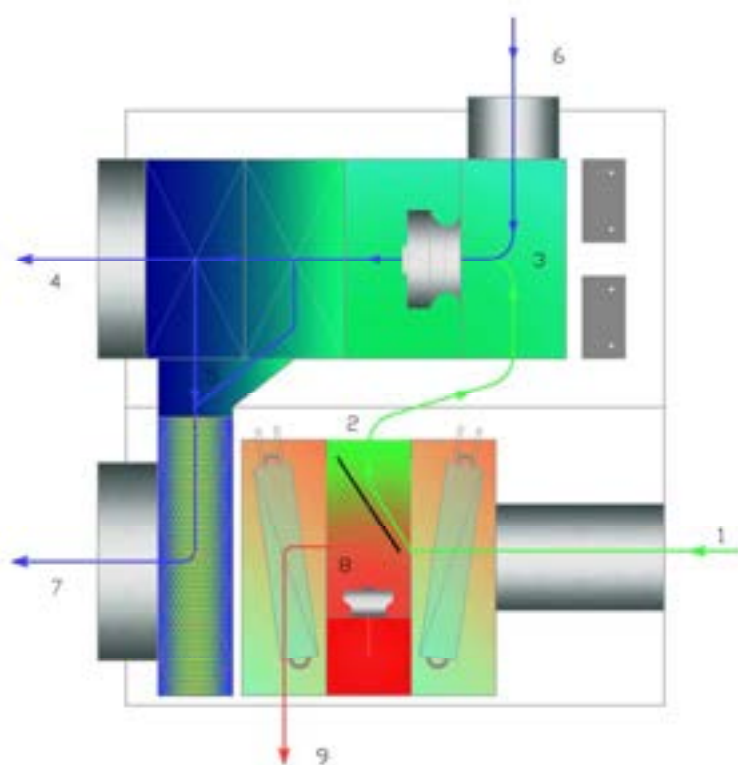


Figura 32. Punti del ciclo di funzionamento riportati sullo schema della macchina

Il grafico riportato in figura 33 mostra i risultati in termini di deumidificazione prodotta dall'unità durante le ore di funzionamento (accensione ore 9:00, spegnimento ore 18:00) per una giornata TIPO esaminata (31/08/2014).

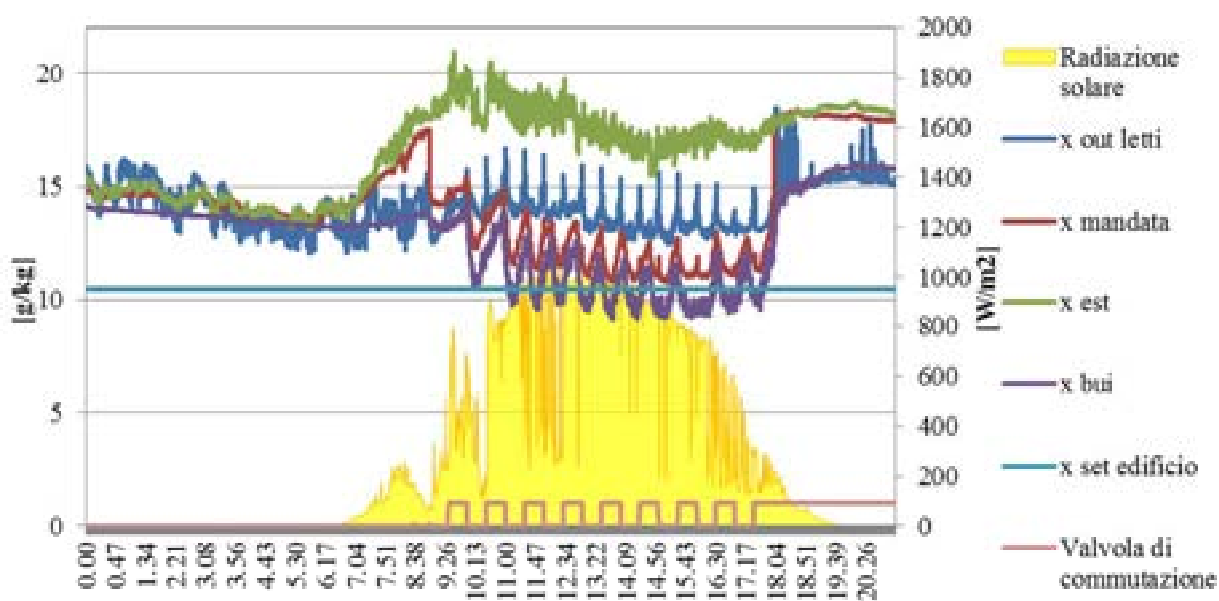
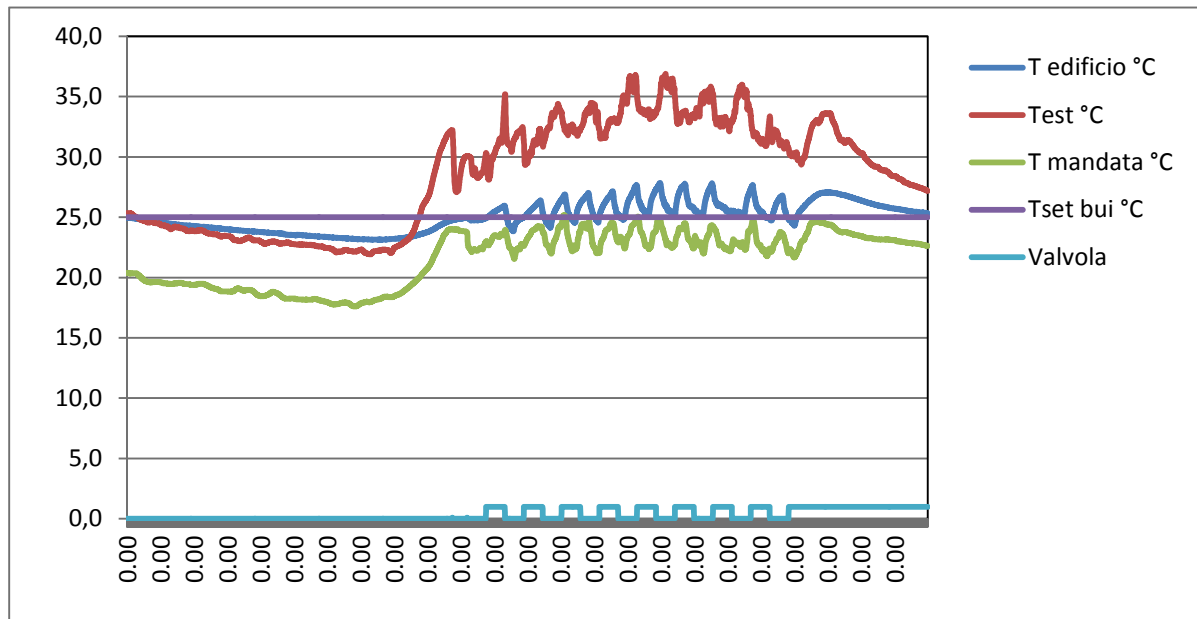


Figura 33. Valori di umidità assoluta dell'aria esterna (verde), dell'aria interna al locale (viola), dell'aria di mandata (rosso scuro) e dell'aria in uscita dai letti adsorbenti (azzurro), radiazione solare e posizione della valvola di commutazione dei letti adsorbenti giorno 31.08.2014

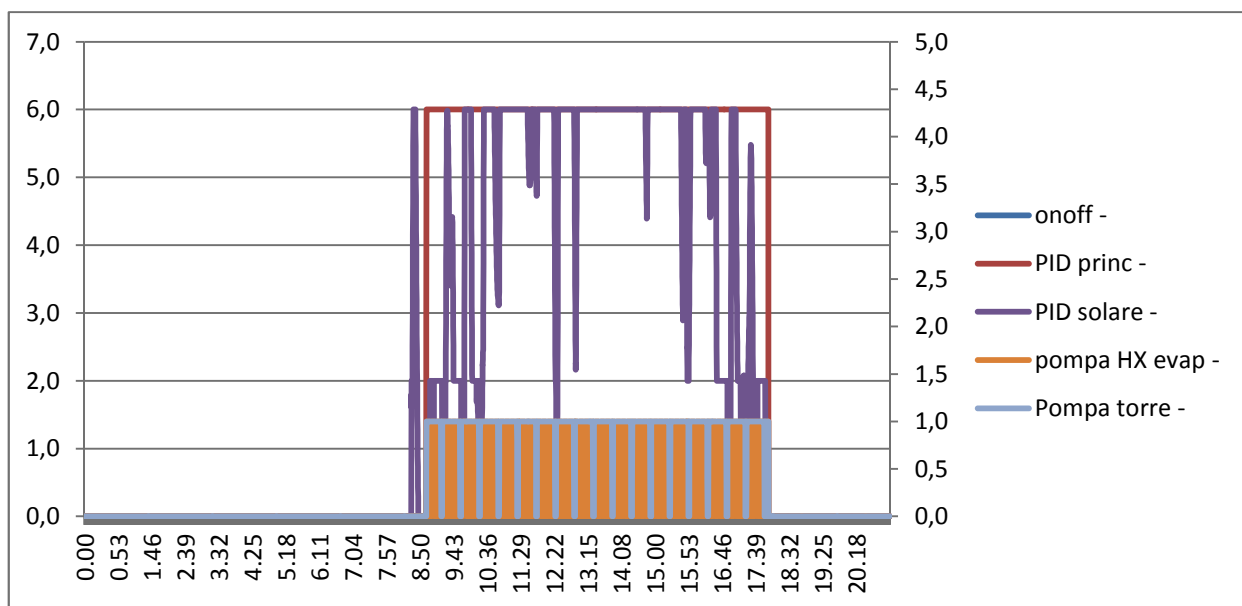
Dal grafico si evince che la deumidificazione dell'aria esterna nell'attraversamento dei letti adsorbenti è dell'ordine di 4-5 g/kg. A causa dell'elevata umidità assoluta dell'aria esterna nella giornata considerata, il sistema non è però in grado di soddisfare interamente le esigenze di deumidificazione. Il carico latente restante in ambiente viene così abbattuto dal sistema a fancoil presente nel locale e collegato alla macchina di produzione del freddo a CO<sub>2</sub>.

La temperatura di mandata oscilla tra 22.5 e 25°C in relazione all'accensione o spegnimento del sistema a fan coil interno all'edificio (Figura 34). Ciò dimostra che il contributo al raffreddamento sensibile dell'edificio è modesto aggirandosi mediamente a circa 800W.



**Figura 34. Andamento delle temperature dell'edificio, dell'aria esterna e di quella di mandata - giorno 31.08.2014**

In figura 35 è riportato l'andamento dei regolatori PID per i ventilatori e on-off delle pompe.



**Figura 35. Andamento dei regolatori PID per i ventilatori e on-off delle pompe**

Si noti come la temperatura dell'aria in uscita dai letti adsorbenti sia circa uguale a quella dell'aria in ingresso (Figura 36). Ciò è dovuto al raffreddamento dei letti adsorbenti per mezzo della torre di raffreddamento.

Questo aspetto è molto importante considerando che nei sistemi DEC tradizionali le temperature in uscita dai rotori deumidificanti possono superare facilmente i 50°C.

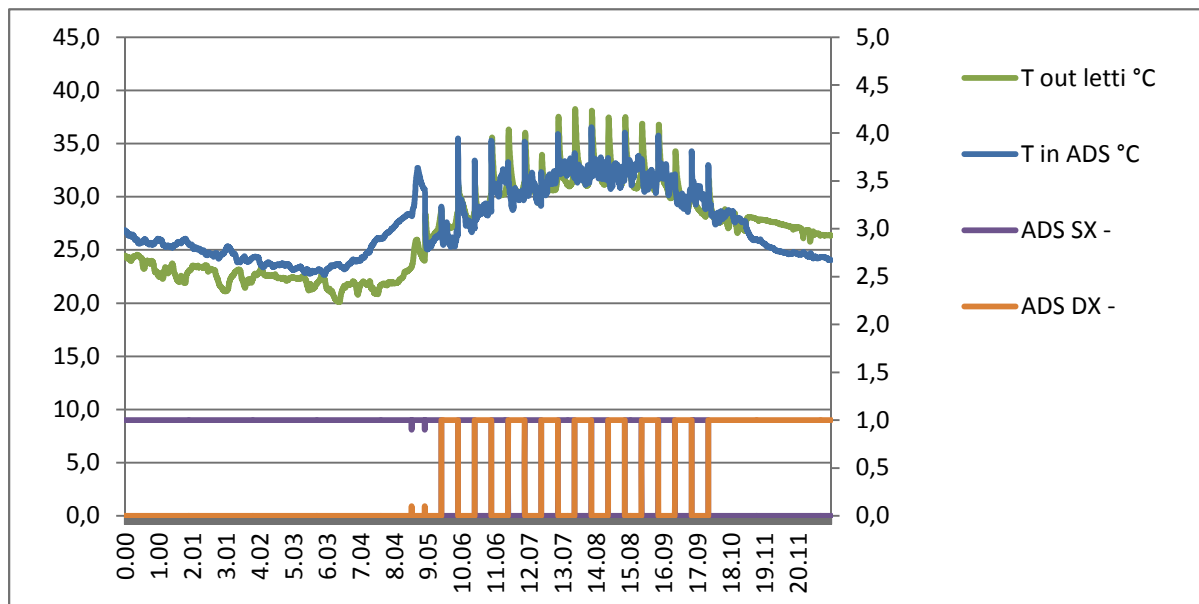


Figura 36. Andamento della temperatura di ingresso e uscita dai letti adsorbenti

La potenza elettrica del sistema è sempre inferiore a 250 W così come previsto dai dati forniti dalla Ditta costruttrice (Figura 37). I picchi inferiori sono relativi allo spegnimento del ventilatore solare che avviene poco prima che venga invertito il funzionamento dei letti. In corrispondenza di ogni scambio dei letti viene spenta inoltre la pompa della torre evaporativa per far sì che l'acqua presente nel letto che si trova alla fine della fase di adsorbimento possa fluire verso la vaschetta di raccolta della torre evitando così che si riscaldi con il calore proveniente dal collettore solare. Questo procedimento permette di preraffreddare il materiale adsorbente prima che questo venga utilizzato in modalità di deumidificazione.

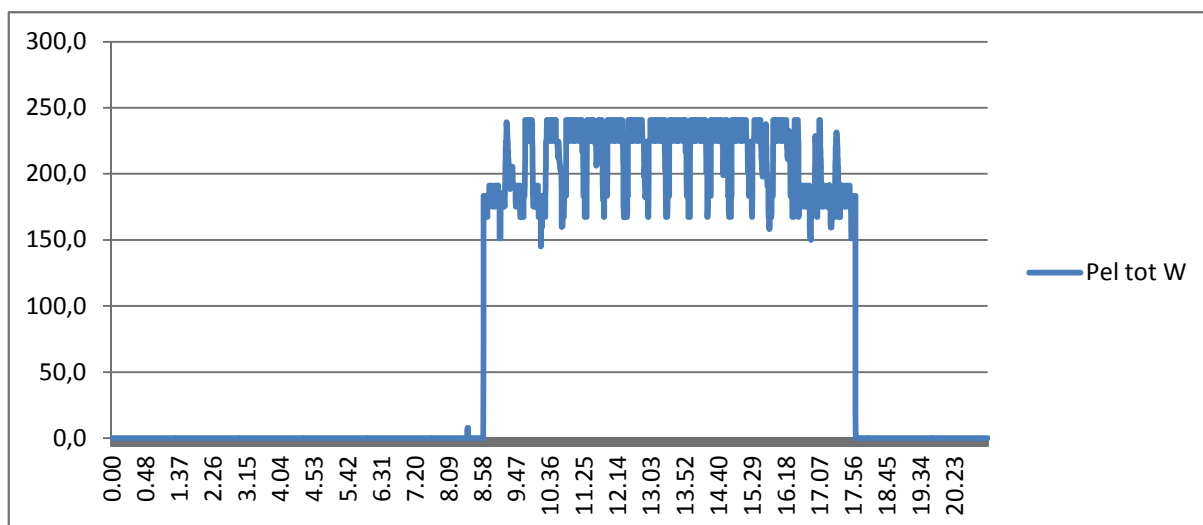


Figura 37. Potenza elettrica totale assorbita

In termini di EER (*Energy Efficiency Ratio*) il sistema presenta dei buoni valori. L'EER medio per la giornata considerata è infatti leggermente superiore a 9. Inoltre si ricorda che l'energia elettrica è fornita

interamente dall'impianto fotovoltaico presente nell'unità (Figura 38). Per quanto riguarda invece la potenza frigorifera fornita, questa si attesta su valori inferiori rispetto a quelli attesi nelle condizioni di funzionamento esaminate. Ciò è dovuto al fatto che, come si è detto, il sistema di raffreddamento attuato negli scambiatori evaporativi ha mostrato delle inefficienze dovute alla cattiva distribuzione dell'acqua e dell'aria all'interno dei canali secondari degli scambiatori.

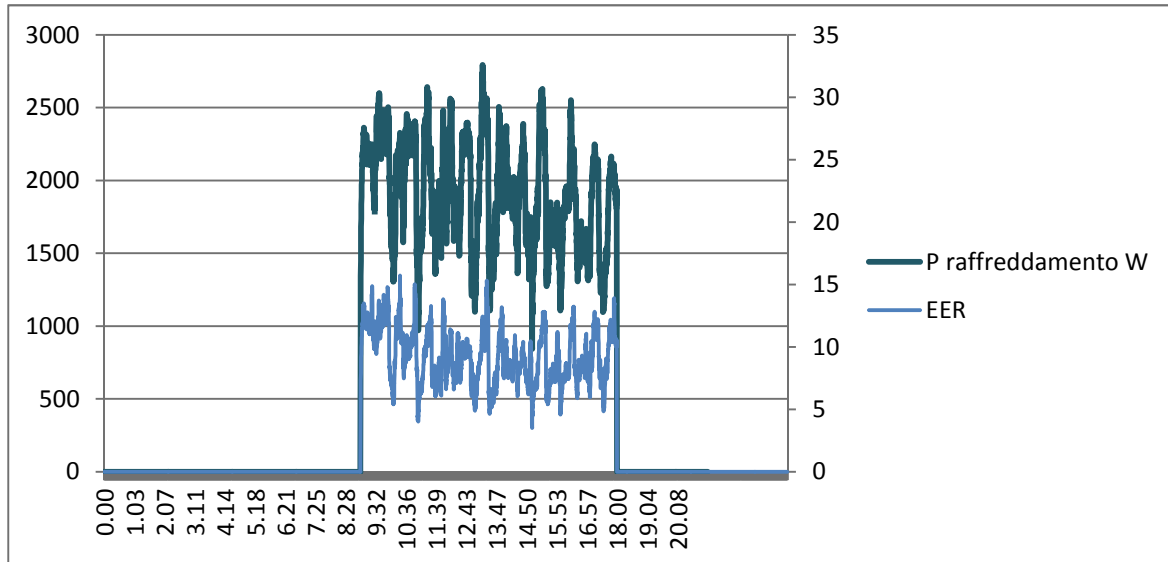


Figura 38. Potenza di raffreddamento e EER

Per quanto riguarda la distribuzione dei consumi elettrici il peso maggiore è dato dal ventilatore principale che in questo caso opera alla massima velocità per l'intero periodo di funzionamento (Figura 39). Il peso del circolatore dello scambiatore evaporativo è invece molto basso e pari a solo il 5% del totale. La logica di regolazione prevede infatti dei cicli di accensione e spegnimento che si ripetono ogni 5 minuti.

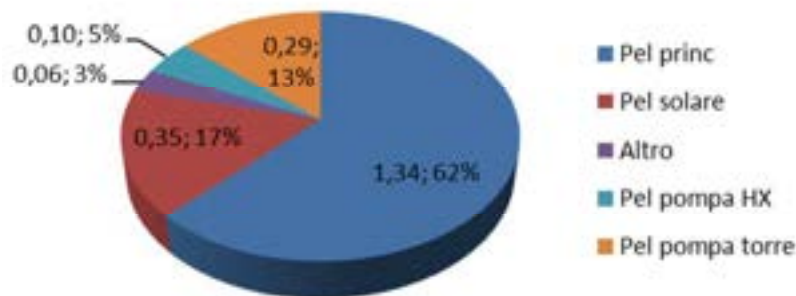


Figura 39. Distribuzione dei consumi di energia tra gli utilizzatori presenti nel sistema

Di seguito (Figura 40) si riporta il pannello di controllo di Labview in cui sono mostrate le condizioni di funzionamento del solar DEC in una giornata tipo di funzionamento.



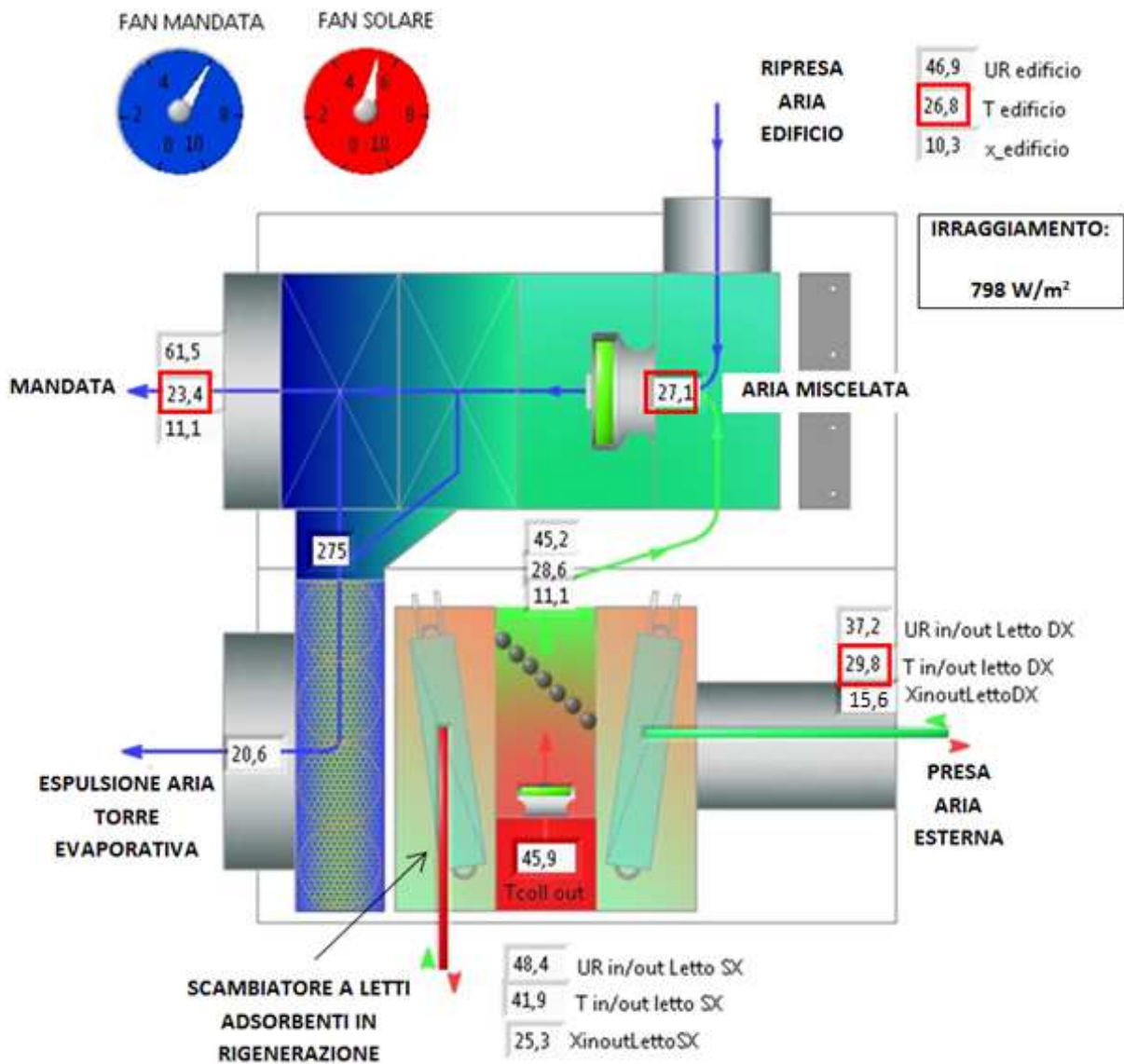


Figura 40b. Funzionamento qualitativo del sistema solar DEC: 02/09/2014 ore 14:11

Al fine di dare un quadro delle prestazioni del sistema su un periodo più lungo, si riportano di seguito alcuni grafici relativi alle principali grandezze prestazionali per due settimane di funzionamento corrispondenti a 152 ore di funzionamento.

Il totale dell'energia frigorifera prodotta relativa al trattamento dell'aria nel periodo considerato è 217 kWh. A fronte di ciò il sistema ha impiegato 27 kWh di energia elettrica di cui soltanto il 27% è stata prelevata dalla rete mentre il restante 73% è stata auto prodotta dai pannelli PV a bordo della macchina. Se si calcola dunque il coefficiente di prestazione rispetto all'energia elettrica totale prelevata dalla rete e quella frigorifera prodotta nel periodo considerato si ottiene un EER di circa 31.

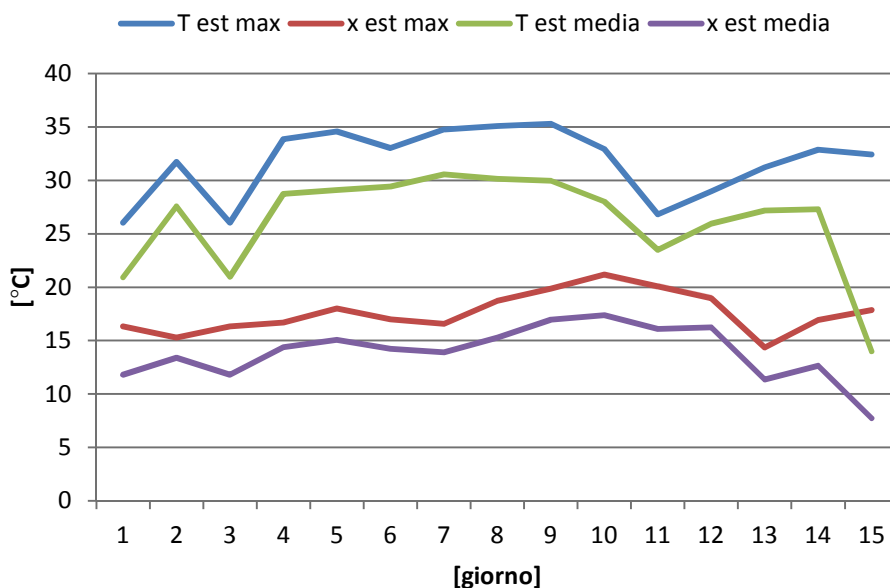


Figura 41. Condizioni climatiche di temperatura e umidità assoluta: dal 01/09/2014 al 15/09/2014

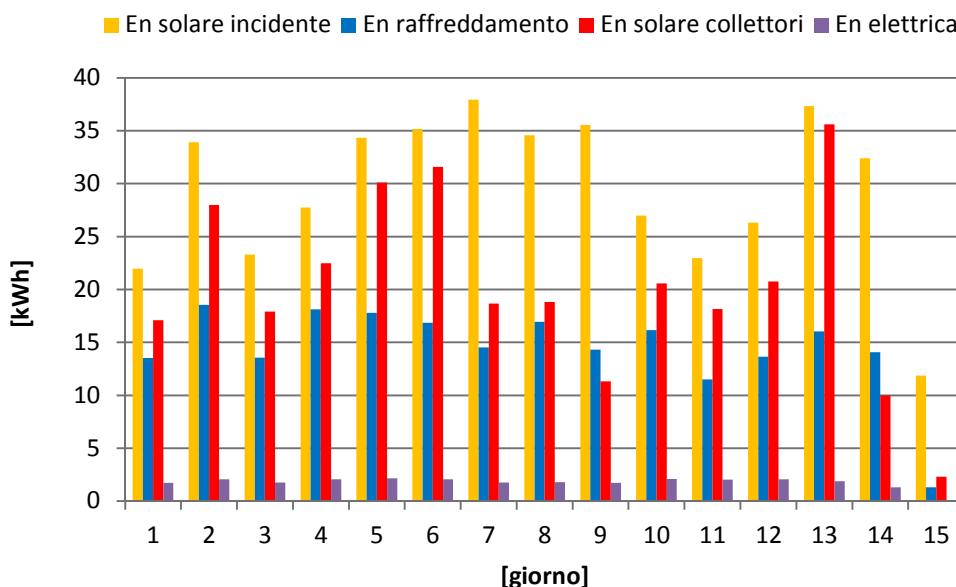


Figura 42. Prestazioni del sistema: dal 01/09/2014 al 15/09/2014

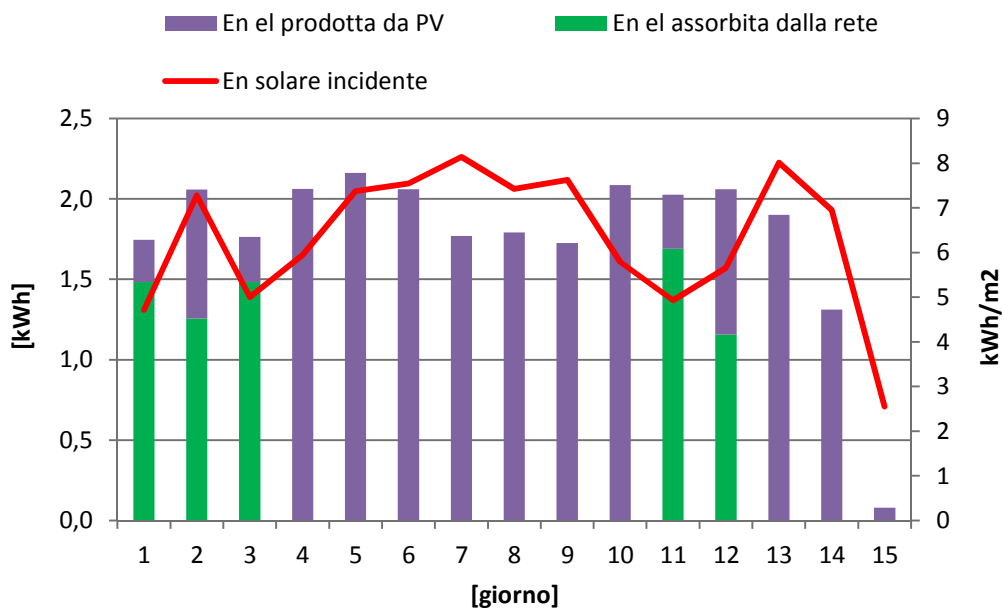


Figura 43. Energia prelevata dalla rete e autoprodotta: dal 01/09/2014 al 15/09/2014

Nella figura seguente si riporta invece il coefficiente EER della macchina non distinguendo tra energia prelevata dalla rete e quella autoprodotta. In tal modo è possibile mostrare l'efficienza elettrica intrinseca della macchina. Inoltre si mostra il coefficiente COP termico comunemente utilizzato.

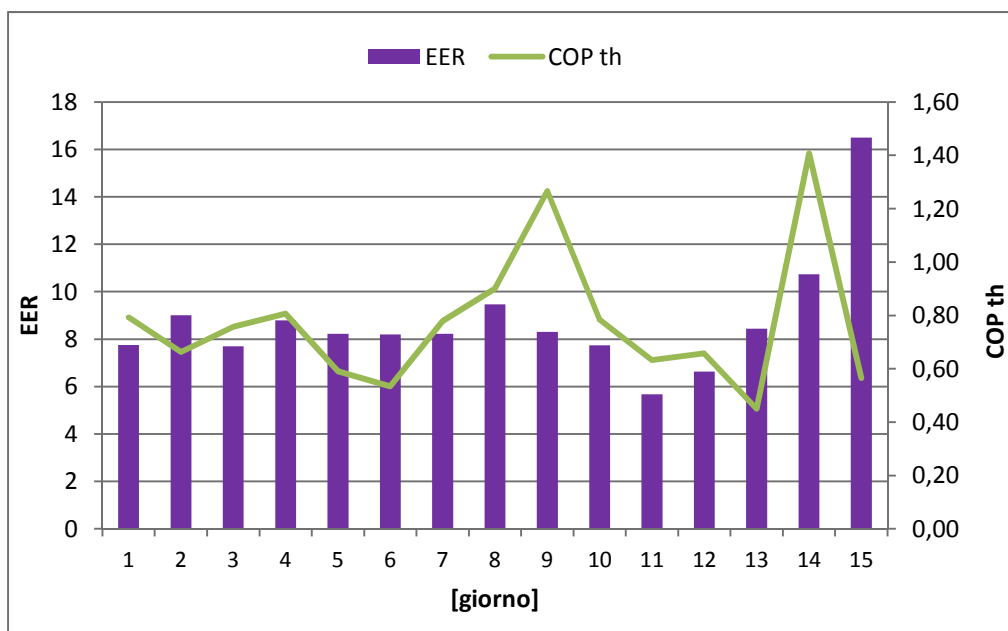


Figura 44. Coefficiente di prestazione EER e COP termico: dal 01/09/2014 al 15/09/2014

Si noti come mediamente i valori maggiori di EER sono relativi alle giornate con maggiore disponibilità di irraggiamento solare. Fa eccezione l'ultimo dei giorni considerati in cui, a seguito di un blocco del sistema di acquisizione e controllo, il sistema ha operato per poco tempo a velocità ridotta dei ventilatori. Il coefficiente EER medio per il periodo considerato risulta pari a 8.8 mentre il COP termico è 0.77. In generale si può affermare che tali valori sono da considerarsi molto positivi per un impianto di solar cooling che rispecchi lo stato dell'arte della tecnologia.

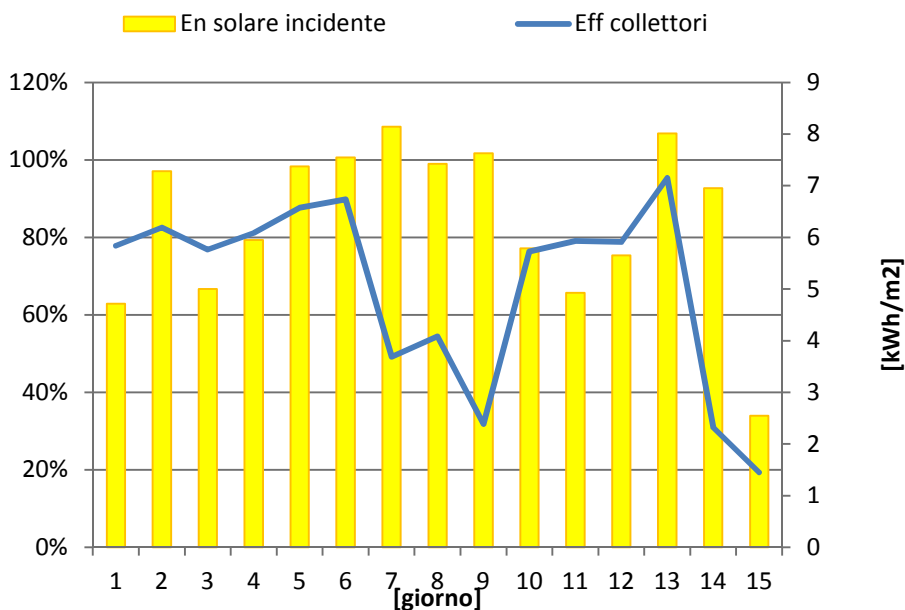


Figura 45. Efficienza termica dei collettori solari: dal 01/09/2014 al 15/09/2014

Come mostrato in figura 45 l’efficienza dei collettori solari ingenerale è alquanto elevata. Ciò è dovuto al fatto che il sistema utilizza aria esterna in ingresso al collettore per cui quest’ultimo può lavorare sempre al massimo dell’efficienza. Inoltre, come già discusso, nel collettore solare è stata utilizzata una particolare alettatura del pannello PV e dell’assorbitore che permette un efficiente scambio di calore con l’aria da riscaldare.

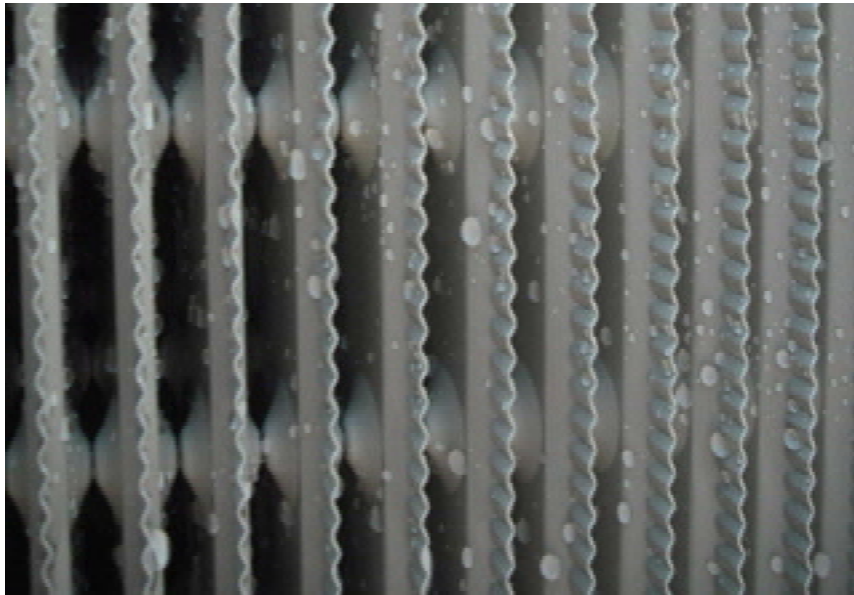
### 4.3 Ulteriori osservazioni sul funzionamento della macchina

Dallo svolgimento dei primi test funzionali e dall’analisi dei primi dati di monitoraggio relativi all’unità installata in ENEA, è stato evidenziato che la macchina realizza efficacemente il proprio ciclo di funzionamento, anche se sono state riscontrate alcune inefficienze di seguito discusse dovute ad un funzionamento non ottimale di alcuni dei componenti utilizzati.

In particolare, sono stati riscontrati i seguenti aspetti:

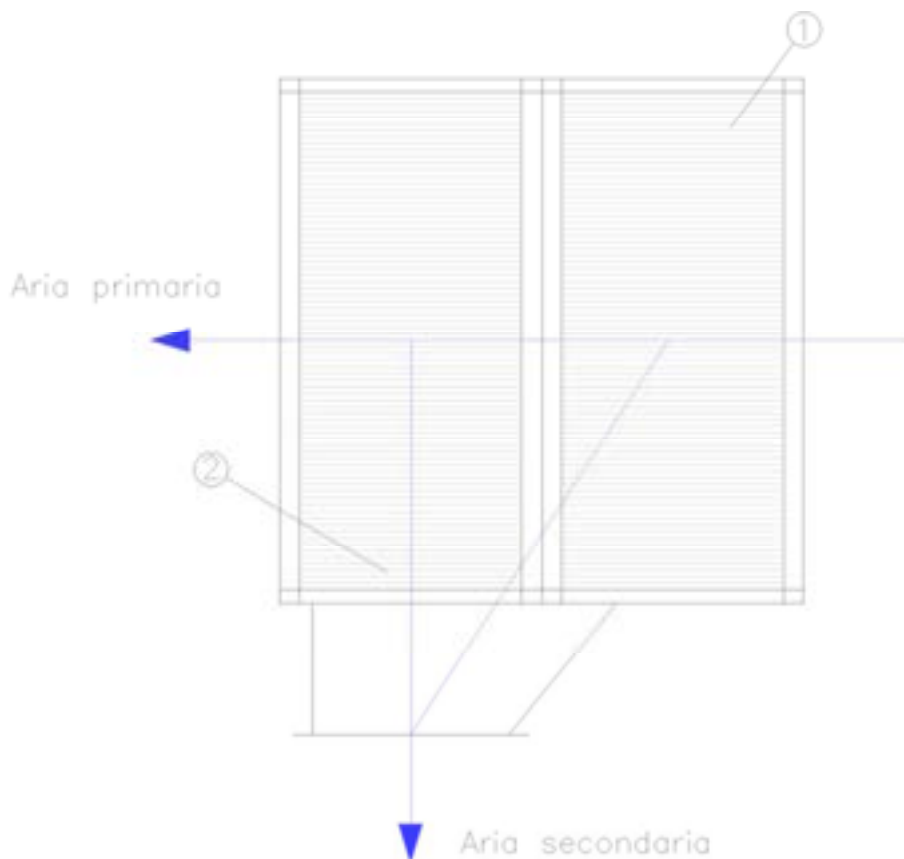
1. il consumo di energia elettrica dei ventilatori è risultato praticamente corrispondente a quello preventivato. Ciò significa che l’obiettivo di mantenere basse le perdite di carico dell’aria nell’attraversamento dei vari componenti aeraulici e dei canali interni alla macchina è stato pienamente raggiunto. Questo aspetto risulta particolarmente importante al fine del contenimento del consumo di energia degli utilizzatori elettrici presenti nella macchina;
2. il sistema di produzione ed accumulo di elettricità ha permesso di verificare nella maggior parte dei giorni monitorati un funzionamento stand alone dell’unità. Infatti, per il periodo di misure presentato, il 73 % dell’energia elettrica utilizzata è stata autoprodotta dai pannelli fotovoltaici e accumulata nelle batterie;
3. il raffreddamento dei letti ad opera della torre di raffreddamento interna si è dimostrata una soluzione efficace. In particolare, ciò dimostra che è possibile smaltire il calore prodotto durante la fase di adsorbimento nei letti di silica gel utilizzando il flusso d’aria in uscita dagli scambiatori evaporativi evitando così di dover utilizzare aria esterna così come avviene in una torre di tipo tradizionale. Ciò elimina i noti problemi di sporcamento dell’acqua presente all’interno della torre dovuti a polvere, foglie, insetti etc;
4. le prestazioni dello scambiatore di calore evaporativo misurate sono inferiori rispetto a quelle attese. Ciò è causa della minore potenza frigorifera sviluppata dalla macchina. Le principali cause di riduzione della prestazione rispetto ai risultati attesi possono essere essenzialmente imputate a:

- Bassa bagnabilità della superficie del secondario dello scambiatore. Si è riscontrato infatti che lo strato di rivestimento anticorrosivo utilizzato in resina epossidica riduce notevolmente la bagnabilità della superficie rispetto ad una finitura in alluminio naturale. Dalla letteratura si evince che l'angolo di contatto dell'acqua su superfici di materiale polimerico è maggiore di  $90^\circ$  dando luogo ad un comportamento idrofobo. Al contrario, l'angolo di contatto dell'acqua su una superficie di alluminio è minore di  $90^\circ$  dando luogo ad un comportamento idrofilo. Si può affermare dunque che il rivestimento in resina epossidica delle superfici dello scambiatore pur risultando utile ai fini di una maggiore durabilità del componente stesso nei confronti degli effetti di corrosione, non risulta però una scelta vantaggiosa dal punto di vista delle prestazioni di bagnabilità e dunque di raffreddamento dell'aria per evaporazione (Figura 46);



**Figura 46. Scambiatore di calore evaporativo a pacco**

- Distribuzione non omogenea della velocità dell'aria nei canali secondari bagnati dello scambiatore. Da una misura della velocità dell'aria in diversi punti della bocca di uscita dei canali secondari dello scambiatore si è riscontrata una notevole differenza tra i punti vicini allo sbocco dell'aria e quelli più lontani. In particolare, facendo una prova a portata massima si è riscontrata una velocità dell'aria di circa 0.45 m/s nel punto 1 in figura 47 e di circa 0.9 m/s nel punto 2. Ciò evidenzia un problema di distribuzione dell'aria non ottimale nei canali secondari dello scambiatore che comporta una diminuzione dell'efficienza di scambio termico raggiungibile. Il rapporto tra le portate d'aria nei canali secondari e primari è, infatti, un parametro molto importante che influenza notevolmente l'evaporazione dell'acqua e in definitiva il raffreddamento del flusso d'aria primario.
- Distribuzione non omogenea dell'acqua spruzzata dagli ugelli. A causa di parziali occlusioni dovuti ad effetti di corrosione di alcuni pezzi della raccorderia idraulica utilizzata, alcuni degli ugelli utilizzati nel sistema di spruzzamento non garantiscono una distribuzione ottimale dell'acqua sulla superficie dello scambiatore. Inoltre l'angolo di apertura dello spruzzo d'acqua è minore di quello previsto per cui alcune zone dello scambiatore non vengono bene bagnate;



**Figura 47. Schema riassuntivo di funzionamento dello scambiatore evaporativo a pacco**

5. Il processo di deumidificazione nei letti adsorbenti si è dimostrato efficace, anche se si è riscontrato un controllo parziale dell'umidità dell'aria inviata in ambiente. In particolare, in presenza di umidità assolute dell'aria esterna molto elevate ( $x_{est} > 15$  g/kg) il sistema non è riuscito a garantire il raggiungimento dell'umidità desiderata nel flusso d'aria inviato in ambiente (10 g/kg), garantendo comunque globalmente una deumidificazione dell'aria più che accettabile. Ciò è dovuto probabilmente ad una non perfetta tenuta all'aria della valvola di scambio dei letti adsorbenti. Un più elevato grado di deumidificazione può essere inoltre raggiunto variando le caratteristiche dello scambiatore adsorbente soprattutto in termini di quantità di silica gel utilizzato.

## 5 Conclusioni

A livello internazionale il solar cooling è riconosciuto come una tra le tecnologie per la climatizzazione degli edifici più promettenti. D'altra parte, diversi studi hanno dimostrato la necessità di ulteriori sviluppi a livello tecnologico, di standardizzazione dei prodotti e di riduzione dei costi di installazione. In merito a questo, si sottolinea che la tecnologia del sistema freescool è stata sviluppata nell'ottica del superamento delle barriere riscontrate tradizionalmente nell'ambito dei sistemi di solari cooling, ponendo soprattutto attenzione ai seguenti aspetti:

- Incremento dell'efficienza energetica, grazie all'impiego della innovativa tecnologia DEC a letti fissi raffreddati;
- Minore complessità impiantistica a vantaggio di una riduzione dei costi di produzione e installazione del sistema;
- Possibilità di funzionamento anche in modalità off grid;

I test funzionali eseguiti hanno permesso di verificare il funzionamento e l'idoneità del sistema per applicazioni nel settore terziario. I risultati ottenuti hanno mostrato che è possibile soddisfare le esigenze di ventilazione e trattamento dell'aria a costo energetico quasi nullo.

In particolare si è riscontrato che la tecnologia a letti fissi raffreddati permette di garantire capacità di deumidificazione (e di conseguenza successivo raffreddamento negli scambiatori evaporativi) per diverse ore dopo il calare del sole. Inoltre con questa tecnologia è possibile controllare il processo di deumidificazione agendo sulla temperatura del letto.

Il consumo di energia elettrica dei ventilatori è risultato molto limitato e praticamente corrispondente a quello preventivato.

E' stato infine dimostrato che le unità possono operare in modalità stand-alone per diversi giorni grazie al sistema fotovoltaico/batteria utilizzato.

Il coefficiente EER medio calcolato sulla base dell'energia elettrica prelevata dalla rete è maggiore di 30 dimostrando l'alto potenziale di risparmio rispetto ai sistemi di trattamento dell'aria di tipo tradizionale.

Durante le prove svolte sono state introdotte alcune migliorie nella logica di commutazione dei letti adsorbenti che hanno permesso di ridurre gli effetti negativi legati all'inerzia termica dei letti.

D'altra parte, nell'esame del comportamento del sistema, sono state riscontrate alcune inefficienze dovute ad un funzionamento non ottimale di alcuni dei componenti utilizzati.

In particolare, le prestazioni misurate relative alla parte di raffreddamento evaporativo sono inferiori rispetto a quelle attese. Le principali cause di riduzione della prestazione possono essere essenzialmente imputate alla bassa bagnabilità dello stato di rivestimento anticorrosivo in resina epossidica delle superfici dei canali secondari degli scambiatori evaporativi, alla distribuzione non omogenea delle velocità dell'aria nei canali secondari degli scambiatori evaporativi e dell'acqua spruzzata dagli ugelli.

Possibili soluzioni ai problemi accennati potrebbero prevedere l'utilizzo di un rivestimento idrofilo sulla superficie dei canali secondari, una riprogettazione del sistema di spruzzamento dell'acqua e una diversa geometria del canale di scarico dell'aria secondaria in uscita dagli scambiatori evaporativi.

Un ulteriore possibile ambito di miglioramento è relativo all'introduzione di un sistema di regolazione della portata d'aria che attraversa i letti adsorbenti. Nell'unità esaminata il rapporto tra l'aria che attraversa i letti adsorbenti e quella di ricircolo proveniente dall'ambiente è attualmente fisso. La possibilità di regolare la quantità d'aria che attraversa i letti adsorbenti garantirebbe un migliore controllo dell'umidità dell'aria inviata in ambiente.

## 6 Riferimenti bibliografici

1. P. Finocchiaro, M. Beccali, "Innovative compact solar air conditioner based on fixed and cooled adsorption beds and wet exchangers, Energy Procedia, 00 (2014) 000-000
2. Beccali M., Finocchiaro P., Galletto J., Nocke B. – "L'utilizzo dell'energia solare nel riscaldamento e nel raffrescamento degli edifici - Stato dell'arte, criteri di dimensionamento e potenzialità a scala regionale" – Volume della Collana "Energicamente" – ORSA (2006) SBN Pal0204636

## 7 Abbreviazioni ed acronimi

$T_{coll\ out}$	Temperatura in uscita dal collettore, °C
$T_{edificio}$	Temperatura dell'edificio, °C
$T_{est}$	Temperatura esterna, °C
$T_{in\ coll\ dx}$	Temperatura dell'aria in entrata nel collettore destro, °C
$T_{in\ coll\ sx}$	Temperatura dell'aria in entrata nel collettore sinistro, °C
$T_{in/out\ letto\ DX}$	Temperatura dell'aria in entrata o in uscita dal letto adsorbente destro, °C
$T_{in/out\ letto\ SX}$	Temperatura dell'aria in entrata o in uscita dal letto adsorbente sinistro, °C
$T_{HX\ in\ evap}$	Temperatura dell'acqua in evaporazione, °C
$T_{w\ out\ torre}$	Temperatura dell'acqua nella torre evaporativa, °C
$T_{out\ aria\ torre}$	Temperatura in uscita dalla torre evaporativa, °C
$T_{ritorno}$	Temperatura di ritorno dall'edificio, °C
$T_{set\ mandata}$	Temperatura da immettere nell'ambiente richiesta, °C
$T_{w\ HX}$	Temperatura dell'acqua nello scambiatore di calore, °C
$UR_{edificio}$	Umidità relativa dell'edificio, %
$UR_{est}$	Umidità relativa dell'ambiente esterno, %
$UR_{ritorno}$	Umidità relativa di ritorno dall'edificio, %
$URi_{n/out\ letto\ DX}$	Umidità relativa in entrata o in uscita dal letto adsorbente destro, %
$URi_{n/out\ letto\ SX}$	Umidità relativa in entrata o in uscita dal letto adsorbente sinistro, %
$X_{edificio}$	Titolo dell'aria dell'edificio, %
$X_{est}$	Titolo dell'aria esterno, %
$X_{in/out\ letto\ DX}$	Titolo dell'aria in entrata o in uscita dal letto adsorbente destro, %
$X_{in/out\ letto\ SX}$	Titolo dell'aria in entrata o in uscita dal letto adsorbente sinistro, %
$X_{ritorno}$	Titolo dell'aria di ritorno dall'edificio, %
$X_{set\ room}$	Titolo dell'aria interno richiesto, %