



Ricerca di Sistema elettrico

Prototipo di condizionatore d'aria compatto Solar DEC, sistema freescoo residential: test funzionali

M. Beccali, P. Finocchiaro, V. Lo Brano, E. Moreci

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

M. Beccali, V. Lo Brano, E. Moreci (Università degli Studi di Palermo), P. Finocchiaro (SOLARINVENT SRL)

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 A: 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	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 COMPONENTI PRINCIPALI DELL'IMPIANTO.....	9
2.1.1 <i>Collettore solare termico e fotovoltaico</i>	9
2.1.2 <i>Ventilatori</i>	10
2.1.3 <i>Letti adsorbenti in silica gel</i>	12
2.1.4 <i>Torre evaporativa</i>	13
2.1.5 <i>Scambiatori di calore evaporativo a pacco</i>	14
2.1.6 <i>Pompe di circolazione dell'acqua</i>	15
2.1.7 <i>Elettrovalvole</i>	15
2.2 SISTEMA DI MONITORAGGIO ED ACQUISIZIONE DATI	16
2.3 IL SISTEMA INSTALLATO.....	18
2.4 RISULTATI SPERIMENTALI	20
3 CONCLUSIONI.....	24
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	26
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	26

Sommario

Le attività svolte dal Dipartimento DEIM dell'Università di Palermo nell'ambito di questo Accordo di collaborazione, sono state incentrate sulla supervisione delle opere di installazione, sul monitoraggio e sulla valutazione dei risultati dei due sistemi Solar DEC *freescoc office* e *freescoc residential* installati rispettivamente presso il C.R. ENEA Casaccia e presso il Laboratorio solare del Dipartimento stesso.

Il lavoro di ricerca e i risultati ottenuti dalle prove sperimentali relativamente al sistema Solar DEC installato presso il C.R. ENEA Casaccia sono stati già descritti nel report dal titolo "*Prototipo di condizionatore d'aria compatto Solar DEC, sistema freescoc office: test funzionali*".

Di seguito invece è esposto il lavoro effettuato sul sistema Solar DEC *freescoc residential*.

Il sistema in oggetto è stato installato negli spazi esterni adibiti alle sperimentazioni condotte presso Laboratorio solare del Dipartimento. In particolare l'unità è stata collegata ad un ambiente di circa 46 m² sottostante al piano di copertura su cui si affaccia il Laboratorio solare.

L'obiettivo di questa attività è stato lo studio del comportamento del sistema per una applicazione di condizionamento estivo in ambito residenziale. In particolare, in questo caso è stata analizzata la capacità del sistema di fornire energia di raffreddamento anche nelle ore serali, condizione frequente per un uso del sistema presso un'utenza domestica.

I risultati sperimentali ottenuti hanno dimostrato buone prestazioni del sistema e l'efficacia della tecnologia DEC a letti fissi raffreddati o CPB (Cooled Packed Bed) adottata nell'unità. Il sistema ha dimostrato infatti di possedere un'elevata e prolungata capacità di adsorbimento, grazie alla quale è possibile fornire energia frigorifera anche quando la disponibilità di radiazione solare è bassa o nulla.

1 Introduzione

La domanda di energia per il condizionamento degli ambienti è aumentata considerevolmente negli ultimi decenni ed il trend è ancora fortemente in crescita in diverse aree del mondo. La quasi totale totalità dei sistemi di condizionamento dell'aria è alimentata da energia elettrica o in misura molto ridotta da gas. Seppure i rendimenti siano negli ultimi anni cresciuti considerevolmente, si pone in ogni caso un problema di diversificazione delle fonti primarie, per evitare di gravare eccessivamente sul sistema elettrico. L'utilizzo su larga scala dei comuni sistemi di climatizzazione cosiddetti "a compressione di vapore" comporta infatti seri problemi in termini di sovraccarico della rete elettrica nel periodo estivo, elevati consumi energetici e impatto ambientale.

Oggi i sistemi DEC sono presenti sul mercato solo per applicazioni di condizionamento dell'aria di media capacità. Ciò è dovuto al fatto che il ciclo termodinamico su cui si basano le unità di trattamento d'aria DEC comuni non è adatto ad applicazioni di piccola capacità, presentando svantaggi in termini di costi, spazio e limitazioni legate all'installazione di un sistema centralizzato.

Nei comuni sistemi DEC, sono normalmente utilizzati i deumidificatori rotativi. Tuttavia, il processo di adsorbimento realizzato mediante questi rotori presenta lo svantaggio di provocare un aumento di temperatura del materiale adsorbente in fase di adsorbimento. Questo fenomeno è connesso alla cessione di energia termica all'aria di processo sostanzialmente dovuto a due cause: l'adsorbimento delle molecole d'acqua nel materiale adsorbente e il trasporto di energia termica immagazzinata nella matrice di materiale adsorbente e nel suo supporto dalla sezione di rigenerazione a quella di processo. Inoltre, la tecnologia a rotore non presenta l'opportunità di sfruttare alcuna capacità di adsorbimento nel materiale essiccante dato che generalmente si impiegano masse relativamente basse di adsorbente. Pertanto, l'unica opzione per accumulo di energia consiste nell'accumulo di fluido termovettore impiegato per la rigenerazione (normalmente acqua). I pochi sistemi DEC che usano aria calda come fluido termovettore per la rigenerazione (di cui si hanno tracce in letteratura) non utilizzano quindi sistemi di stoccaggio dell'energia; e sono quindi adatti, se alimentati da energia solare, solo ad applicazioni che presentino un carico di climatizzazione estiva in fase con la disponibilità di radiazione solare.

Nella Figura 1 sono mostrate qualitativamente su un diagramma di Mollier le trasformazioni termodinamiche associate alla fase di deumidificazione di una corrente d'aria nei seguenti tre casi:

- deumidificazione per adsorbimento realizzata per mezzo di un rotore adsorbente di tipo tradizionale (A-B)
- deumidificazione per adsorbimento con contemporaneo smaltimento del calore di adsorbimento (A-C)
- deumidificazione per condensazione realizzata per mezzo di una batteria di raffreddamento (A-D)

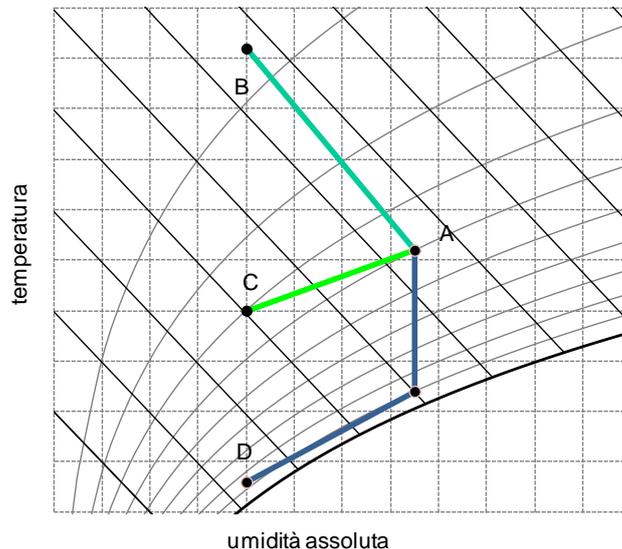


Figura 1: Andamento delle trasformazioni di deumidificazione per i tre diversi casi esaminati

Da un punto di vista della produzione dell'effetto frigorifero, è da notare che questo è nullo per la trasformazione A-B non essendoci una variazione di entalpia significativa tra ingresso e uscita. Al contrario, si ottiene un leggero incremento dell'entalpia dell'aria, dovuto essenzialmente ai fenomeni di trasporto del calore dal settore investito dalla corrente d'aria di rigenerazione a quello di mandata.

Nel caso della trasformazione A-C si ha invece un effetto frigorifero associato alla variazione di entalpia tra i punti A e C corrispondente al calore di adsorbimento che deve smaltito all'esterno del componente.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

FREESCOO (acronimo di **FREE Solar COOLing**) è un innovativo e compatto sistema di climatizzazione alimentato ad energia solare, con funzioni di deumidificazione, raffreddamento ed integrazione al riscaldamento, per applicazione nel settore della climatizzazione degli edifici in ambito residenziale e commerciale.

Il sistema ha la caratteristica di essere particolarmente compatto ovvero tutti i componenti utilizzati nel ciclo termodinamico sono alloggiati all'interno del volume compreso tra il piano orizzontale e quello inclinato del collettore solare.

Il sistema è progettato per attuare un trattamento dell'aria a partire dal solo calore fornito dal sole. Il refrigerante utilizzato all'interno della macchina è l'acqua.

Il sistema è essenzialmente composto da un involucro in lamiera che comprende un collettore solare di tipo termico e fotovoltaico e gli altri componenti che ne permettono il funzionamento ovvero:

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

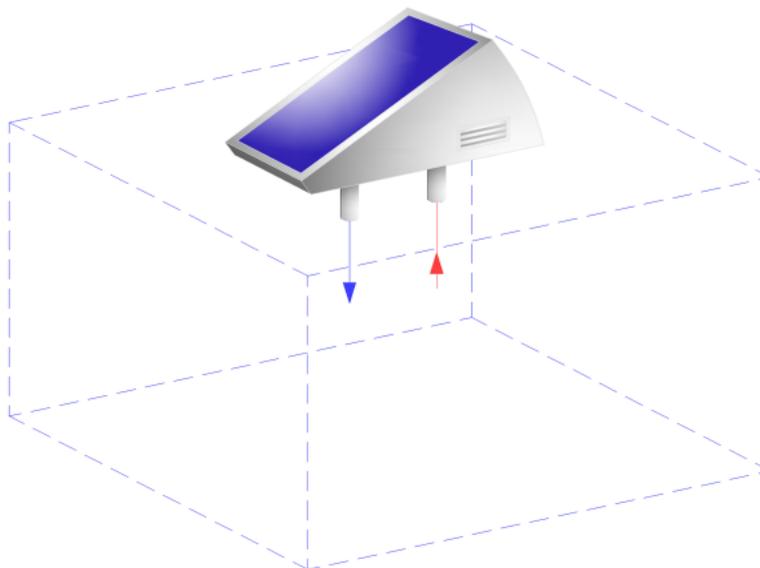


Figura 2: Schema di integrazione di una unità freesco su copertura piana

Le principali caratteristiche tecniche dell'impianto FREESCOO residential sono:

- dimensioni impianto in pianta: $1,2 \times 2 \text{ m}^2$;
- superficie lorda del collettore solare: $2,4 \text{ m}^2$;
- inclinazione del collettore: 25° ;
- portata d'aria immessa in ambiente: $500 \text{ m}^3/\text{h}$;
- potenza frigorifera massima: $2,7 \text{ kW}$ ($T_{\text{est}} = 35^\circ\text{C}$, $x_{\text{est}} = 14 \text{ g/kg}$);
- potenza elettrica assorbita dagli utilizzatori interni: $0,12 \text{ kW}$.

Il sistema è basato principalmente sull'utilizzo di due letti fissi di gel di silice, operanti alternativamente, e due scambiatori di calore evaporativi collegati in serie. Ciascun letto adsorbente è costituito da una batteria alettata, selezionata tra quelle comunemente utilizzate in applicazioni di condizionamento dell'aria, in cui gli spazi tra le alette sono riempiti con granuli di gel di silice. Il materiale adsorbente in tal può essere raffreddato durante la fase di deumidificazione mediante il circuito ad acqua della batteria stessa che è collegato con un componente che ha la funzione di dissipatore di calore. Inoltre il componente può essere utilizzato per l'accumulo di energia, data l'elevata capacità di adsorbimento della massa adsorbente che può essere rigenerata quando la radiazione solare è disponibile ed utilizzata successivamente anche per richiesta di climatizzazione differite. Un sistema di serrande permette la commutazione tra i due letti adsorbenti per garantire un processo di deumidificazione continua.

Questa soluzione innovativa è denominata tecnologia DEC a letti fissi raffreddati o CPB (Cooled Packed Bed).

L'assorbimento elettrico massimo del sistema, relativo alla movimentazione dell'aria e dell'acqua in circolo, è pari a circa 150 W . Il controllo della velocità di rotazione dei ventilatori permette la regolazione della potenza frigorifera della macchina. L'energia elettrica necessaria viene autoprodotta all'interno del sistema da un pannello fotovoltaico integrato all'interno del collettore solare ad aria da 168 W di potenza di picco. Al fine di garantire il funzionamento del sistema anche dopo il tramonto del sole, è presente un sistema di accumulo da 65 Ah a 24 Volt . Tutti gli utilizzatori elettrici funzionano in corrente continua a 24 Volt . Ciò equivale a dire che in questa modalità il sistema necessita per funzionare solo di acqua e sole. Nel caso di in cui invece l'energia elettrica prodotta da fotovoltaico e accumulata nelle batterie non sia sufficiente ad alimentare gli utilizzatori, il sistema di controllo aziona automaticamente un alimentatore collegato alla rete elettrica.

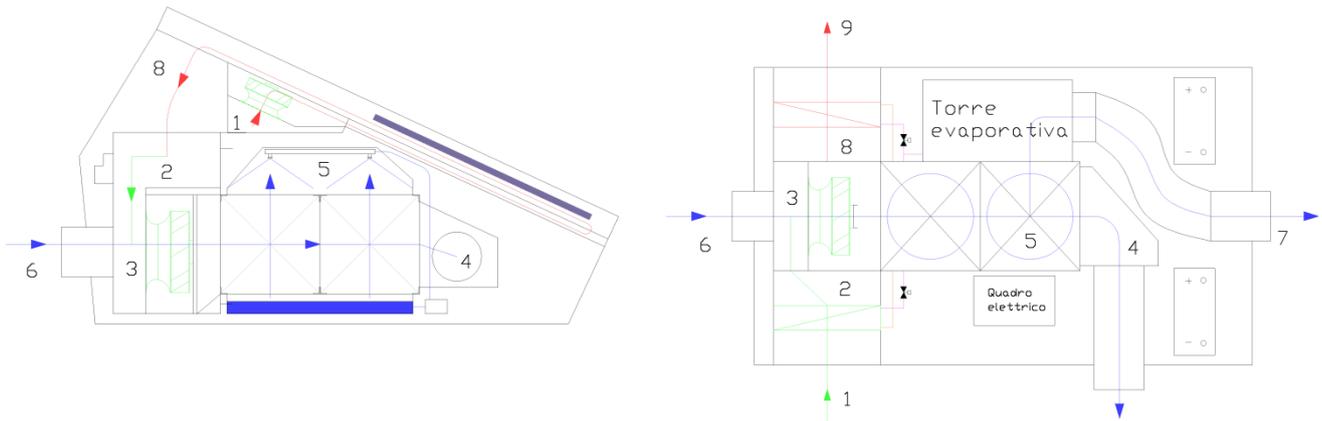


Figura 3: Schema di funzionamento dell'unità installata freesco residential

In Figura 3 si mostra uno schema del sistema mentre in Figura 4 sono descritte le caratteristiche del ciclo termodinamico e del processo di trattamento dell'aria.

Una portata di aria esterna (1) attraversa uno dei letti adsorbenti dove viene inizialmente deumidificata e parzialmente raffreddata. Grazie alla simultanea trasmissione del calore e di massa, la deumidificazione è effettuata a temperatura pressoché costante o anche decrescente (2). Successivamente, l'aria deumidificata viene miscelata con aria di ritorno dall'edificio (in condizioni 6), raggiungendo le condizioni di cui al punto (3). L'aria miscelata, che ha una portata pari a 150% della portata dell'aria fornita all'edificio, entra negli scambiatori evaporativi raggiungendo le condizioni di cui al punto (4).

Per produrre l'effetto di raffreddamento, all'uscita del secondo scambiatore evaporativo, una parte della portata d'aria pari al 50% è deviata verso il ramo secondario del pacco di scambiatori stessi. L'energia termica dovuta al processo di adsorbimento nel letto viene ceduta attraverso un circuito idraulico collegato alla torre di raffreddamento integrata nel sistema. L'aria che fluisce attraverso la torre di raffreddamento proviene dai canali secondari del pacco degli scambiatori evaporativi.

	Descrizione	x	T	h
	-	g/kg	°C	kJ/kg
Aria di processo	1 Aria esterna	16.0	35.0	76.2
	2 Letto adsorbente	9.0	33.0	56.2
	3 Miscelazione	10.0	29.0	54.7
	4 HX1 + HX2	10.0	20.0	45.5
Edificio	6 Aria di ritorno	10.5	27.0	53.9
	4 Prim. HX1+HX2	10.0	20.0	45.5
Aria secondaria negli scambiatori di calore evaporativi	5 Second. HX1+HX2	18.5	25	72.2
	5 Ingresso torre	18.5	25.0	72.2
Torre di raffreddamento	7 Uscita torre	25	29.0	93
	1 Aria esterna	16.0	35.0	76.2
Aria refrigerata	8 Collettore solare	16.0	55.0	96.9
	9 Desorbimento	22	39	95.8

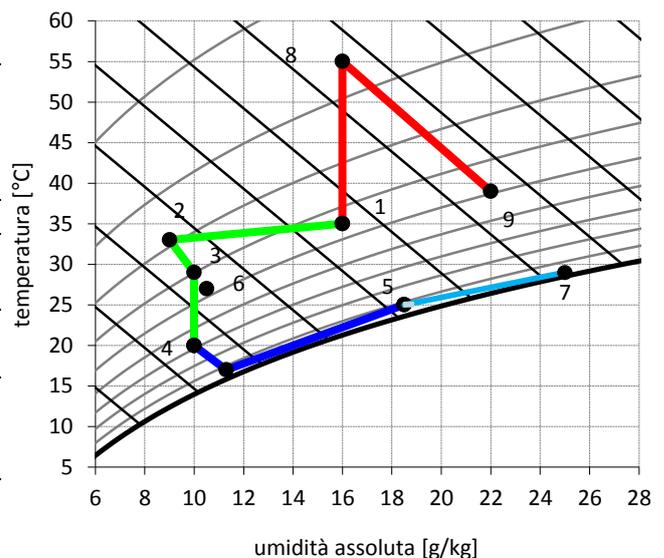


Figura 4: Descrizione del ciclo e diagramma psicrometrico

Di seguito è illustrata la strategia di controllo del sistema. Se non vi è alcuna necessità di climatizzazione estiva, l'energia solare è utilizzata per rigenerare il materiale adsorbente dei letti deumidificanti. In particolare, un letto viene rigenerato finché la differenza di temperatura tra l'aria in uscita dal collettore

solare e l'aria che lascia il letto adsorbente è superiore ad una soglia fissa. Se la differenza è inferiore e il ventilatore del circuito solare è funzionante alla minima velocità, il sistema di controllo esegue una commutazione per attivare la rigenerazione dell'altro letto.

Se il sistema deve operare in modalità di climatizzazione estiva, il ventilatore principale viene utilizzato per fornire aria nelle condizioni di immissione all'edificio. La temperatura e l'umidità dell'ambiente possono essere controllate indipendentemente. La temperatura in ambiente può essere regolata controllando la velocità del ventilatore principale e lo stato della pompa di ricircolo degli scambiatori di calore evaporativi. L'umidità può essere regolata controllando la velocità del ventilatore principale e lo stato della pompa della torre di raffreddamento. Una variazione della temperatura del materiale adsorbente si traduce infatti in una variazione della capacità di deumidificazione e di conseguenza questo fenomeno può essere utilizzato per regolare l'umidità dello spazio condizionato. Durante il funzionamento in modalità climatizzazione estiva, la strategia di controllo che regola il funzionamento dei due letti adsorbenti si basa sulle condizioni di temperatura e umidità dell'aria ripresa dall'ambiente. Se il valore soglia di umidità viene superato, il sistema di controllo attiva la procedura di commutazione da un letto all'altro.

Nel periodo invernale il sistema può essere utilizzato per il riscaldamento dell'ambiente per mezzo ogni qualvolta c'è disponibilità di calore fornito dal collettore solare.

Le applicazioni del sistema sono diverse: trattamento dell'aria nel settore residenziale e in quello del cosiddetto "commerciale leggero" (uffici, negozi, etc.). Grazie alla sua modularità, si possono raggiungere potenze di deumidificazione e raffreddamento elevate. Inoltre, grazie alla autoproduzione di energia elettrica a bordo dell'unità, si può ipotizzare un utilizzo anche in ambienti caratterizzati dall'assenza totale o dalla bassa disponibilità di energia elettrica, come utenze remote, bungalow o case mobili. Il sistema 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 (CT2012 A000013) alla quale è seguita l'estensione a livello internazionale forma di PCT (IB2013/058322).

2.1 Componenti principali dell'impianto

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

- collettore solare termico e fotovoltaico;
- letti adsorbenti in silica gel;
- torre evaporativa;
- scambiatori di calore evaporativi a pacco;
- strumenti per il monitoraggio e l'acquisizione dei dati sperimentali.

2.1.1 Collettore solare termico e fotovoltaico

L'input energetico utilizzato dall'unità freescoo residential è fornito dal collettore ibrido termico e fotovoltaico.

L'aria viene fatta circolare al disotto di un assorbitore di tipo selettivo coperto da una lastra di vetro extrachiaro temperato. L'assorbitore è provvisto di uno speciale sistema di alettatura descritto in Figura 6 che ne aumenta la superficie di scambio di circa 7 volte.

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".

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 65 Ah e usata per alimentare gli utilizzatori elettrici.



Figura 5: Collettore solare ibrido termico fotovoltaico

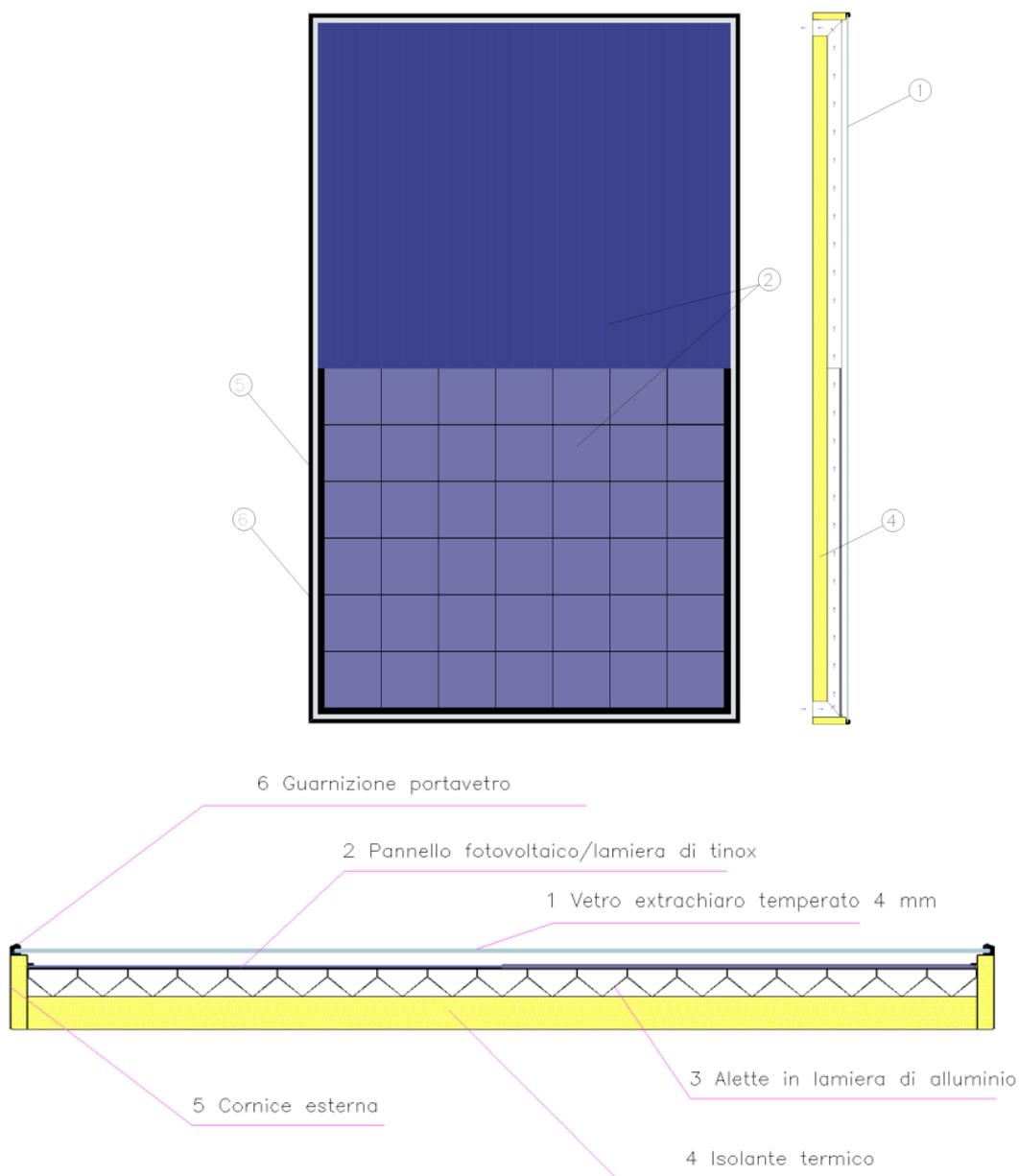


Figura 6: Schema del collettore solare ibrido termico ad aria/fotovoltaico

2.1.2 Ventilatori

Nella macchina sono presenti due ventilatori: il primo denominato ventilatore “principale” è utilizzato per la movimentazione dei quattro flussi d’aria principali (ripresa, letto adsorbente, mandata e torre evaporativa). Il secondo denominato ventilatore “solare” movimenta invece l’aria attraverso il collettore solare e nel letto adsorbente in rigenerazione.

Entrambi i ventilatori sono centrifughi radiali con singolo ingresso e pale curve all’indietro (Figura 7). Si tratta di modelli forniti dalla Ditta Ebmpapst particolarmente efficienti. Sono alimentati in corrente continua a 24 Volt e sono regolabili in velocità tramite un segnale 0-10 volt.

Queste sono le caratteristiche di prestazione in condizioni di progetto:

Ventilatore principale:

- Modello: ventilatore radiale elettronico EC RadiCal R3G310RN9901
- Portata: 800 m³/h
- Prevalenza: 150 Pa
- Potenza assorbita: 65 W

Ventilatore solare:

Modello: ventilatore radiale elettronico EC RadiCal R3G190RN3801

- Portata: 350 m³/h
- Prevalenza: 200 Pa
- Potenza assorbita: 50 W

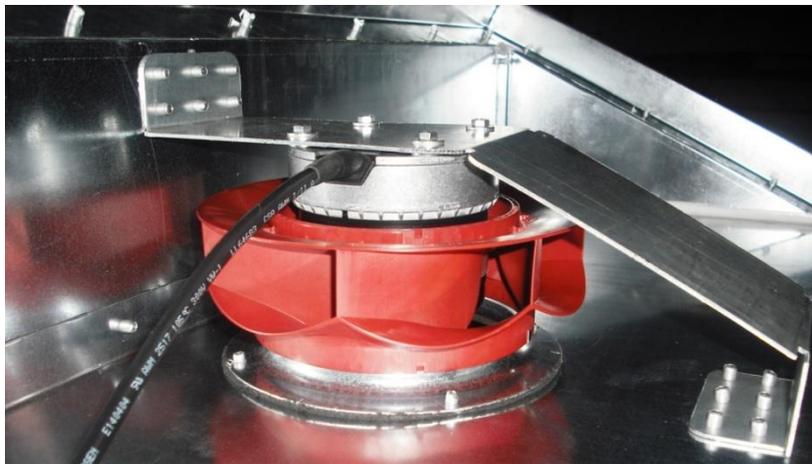


Figura 7: foto del ventilatore installato nel collettore solare

2.1.3 Letti adsorbenti in silice gel

Come accennato il sistema si basa su un nuovo processo DEC che utilizza due letti adsorbenti fissi e raffreddati.

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.

Il silice gel, detto anche gel di Silice, è un prodotto disidratante di sintesi, ottenuto chimicamente da SiO₂ 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. Date queste sue caratteristiche fisiche, si presta bene ad essere utilizzato come accumulo per la deumidificazione.

La caratteristica principale del letto adsorbente proposto 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 12.5 kg di silice gel in grani (Figura 8 e Figura 9) con un volume lordo di 0,69x0,43x0,12 m³.

Di seguito sono riportate le caratteristiche del materiale utilizzato.

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 (%rF)	20	40	50	80
Adsorption (g H ₂ O/g, 25°C)	>10	>21	>26	>33

Figura 8: Caratteristiche del Silice gel in granuli



Figura 9: Foto del Silice gel posto tra le alette della batteria

Come già detto 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 di tempo 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.

L'acqua in uscita dai tubi della batteria, è infatti inviata agli ugelli della torre evaporativa, dove cede calore ad un flusso d'aria uscente dalla macchina.

Il trasferimento di massa avviene così tra l'aria e il materiale adsorbente, sotto forma di scambio di umidità, mentre non c'è nessun trasferimento di massa tra l'aria e il fluido refrigerante. Il fenomeno descritto è rappresentato schematicamente in Figura 10.

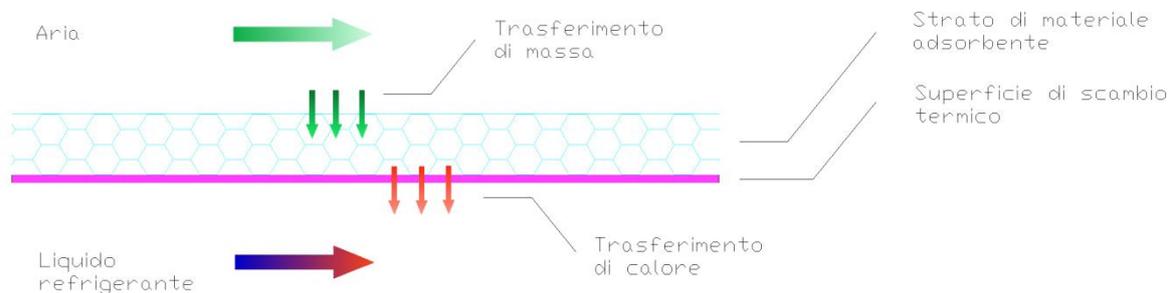


Figura 10: Schema trasferimento di calore e massa all'interno di uno scambiatore di calore con materiale adsorbente

2.1.4 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.

Diversamente dalle classiche torri evaporative, il flusso d'aria utilizzato in questo caso non proviene dall'esterno ma è parte dell'aria che viene 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.

In tal modo si riduce notevolmente la necessità di manutenzione per il trattamento chimico dell'acqua. Lo spurgo periodico della vasca di raccolta è così legato al solo controllo della concentrazione dei sali disciolti.

2.1.5 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 del sistema FREESCOO.

Si tratta di scambiatori a piastre in alluminio del tipo a flusso incrociato le cui caratteristiche sono riportate in Figura 11.

Il funzionamento del ciclo si basa sull'effetto di raffreddamento evaporativo prodotto dall'evaporazione di acqua sulle superfici dei canali secondari dello scambiatore.

L'aria secondaria attraversa lo scambiatore 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. Essendo la portata dell'aria di miscela pari al 150% dell'aria primaria immessa in ambiente, circa il 50% di questa portata verrà utilizzata come flusso secondario ed il restante 100% verrà inviata all'ambiente servito.

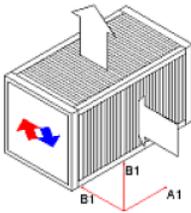
Prestazioni		Estate		Dimensioni e pesi	
Recupero	kW		0.58	Altezza (B1)	mm: 400
Rendimento Umido	%		72.0	Lunghezza (A1)	mm: 440
Rapporto di Temp. (EN 308 std) Umido	%		27.0	Profondità (B1)	mm: 400
Rendimento Secco	%		72.0	Diagonale	mm: 566
Rapporto di Temp. (EN 308 std) Secco	%		27.0	Lunghezza Alettata	mm: 438
				Peso	kg: 9
Classe di recupero (EN 13053)		H4			
Rinnovo					
Portata Std (1.2 kg/m³)	m³/h		800		
Portata aria in peso	kg/h		960		
Temperatura entrata	°C		28.0		
Umidità relativa entrata	%		60.0		
Temperatura uscita	°C		25.8		
Umidità relativa uscita	%		68.3		
Perdita di carico	Pa		35		
Velocità frontale	m/s		1.49		
Espulsione					
Portata Std (1.2 kg/m³)	m³/h		300		
Portata aria in peso	kg/h		360		
Temperatura entrata	°C		20.0		
Umidità relativa entrata	%		50.0		
Temperatura uscita	°C		25.8		
Umidità relativa uscita	%		35.1		
Perdita di carico	Pa		7		
Velocità frontale	m/s		0.56		
				Pressione Atmosferica	mbar 1013
				Modo di calcolo	
				- Singolo	
				Calcolo di un recuperatore singolo.	
				Applicazione Speciale:	
				- Piscine	

Figura 11: Caratteristiche dello scambiatore di calore evaporativo a pacco



Figura 12: Scambiatore di calore evaporativo a pacco

2.1.6 Pompe di circolazione dell'acqua

Nel sistema sono presenti due piccole pompe di circolazione, una collegata al circuito della torre evaporativa e l'altra a quello degli scambiatori evaporativi a pacco. Di seguito i dati principali delle due unità installate:

- Potenza: 24V 830mA
- Massima prevalenza: 0,6bar
- Massima portata: 540 l/h

2.1.7 Elettrovalvole

Nell'impianto sono installate due elettrovalvole che attivano il passaggio dell'acqua proveniente dalla torre evaporativa verso uno dei due letti adsorbenti (Figura 12).



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 13: Caratteristiche tecniche delle elettrovalvole usate per il controllo della portata nelle batterie alettate

2.2 Sistema di monitoraggio ed acquisizione dati

Il monitoraggio del funzionamento del sistema è stato effettuato attraverso un programma implementato in ambiente Labview (Figura 14). Il funzionamento della macchina viene monitorato attraverso le diverse grandezze acquisite dai 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;
- velocità del ventilatore principale;
- velocità del ventilatore solare;
- stato di accensione e spegnimento di ogni singolo componente
- stato relè di commutazione rete elettrica/fotovoltaico
- stato completamento della rigenerazione;
- stato letto in rigenerazione.

Il sistema di monitoraggio dell'unità comprende sei sensori di temperatura e umidità del tipo Elektronik GmbH modello EE060 con precisione $\pm 2,5\%$ sul valore di umidità e $\pm 0,5^\circ\text{C}$ sulla temperatura, quattro anemometri a filo caldo con precisione del $\pm 0.2\text{m/s} + 3\%$ del valore misurato, un piranometro modello Deltaohm LP PYRA 03 (2a classe, ISO 9060) installato sul piano del collettore e un misuratore di corrente e tensione continua con $\pm 0,5\%$ di accuratezza.

Il sistema di monitoraggio e controllo è stato realizzato per mezzo del software Labview in accoppiamento con un'unità Compact DAQ 9184 della National Instruments funzionante a 16 bit. La scelta di un sistema di controllo basato su Labview è stata dettata dal fatto che in questo modo si è reso possibile modificare la logica di regolazione del sistema, permettendo una ottimizzazione continua del funzionamento durante la fase di monitoraggio. La scrittura dei dati viene effettuata ogni dieci secondi.

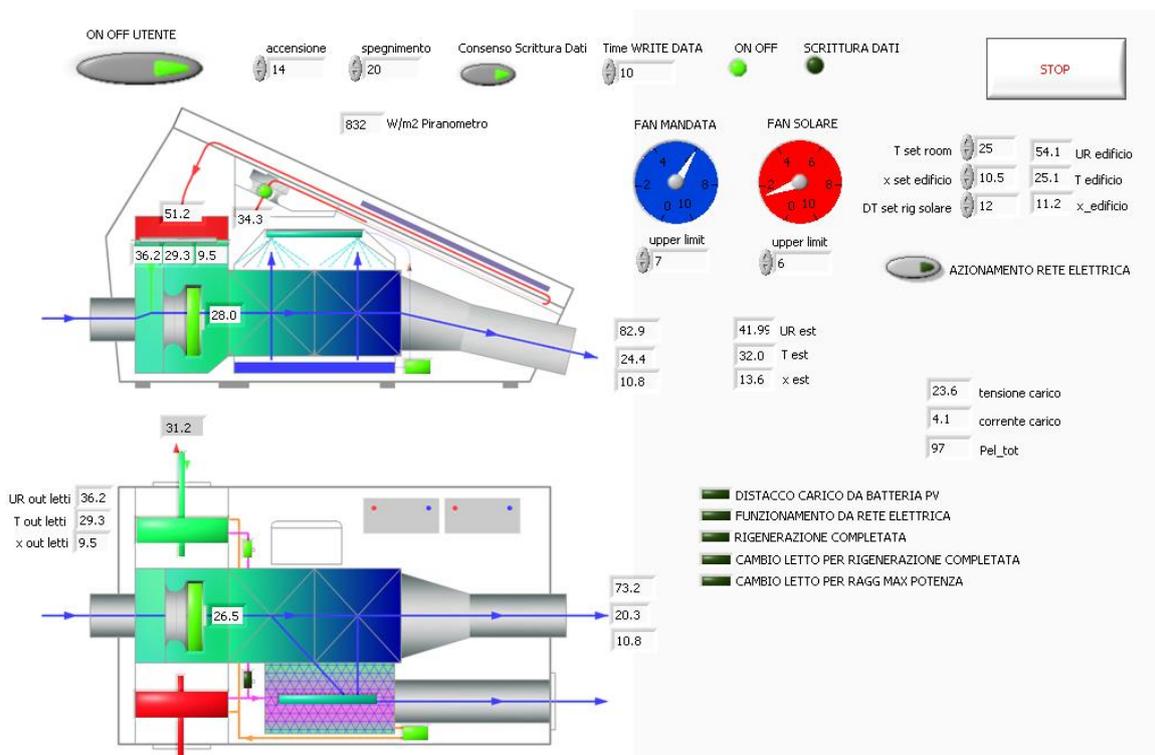


Figura 14: Pannello di controllo del programma di acquisizione e monitoraggio sviluppato in Labview

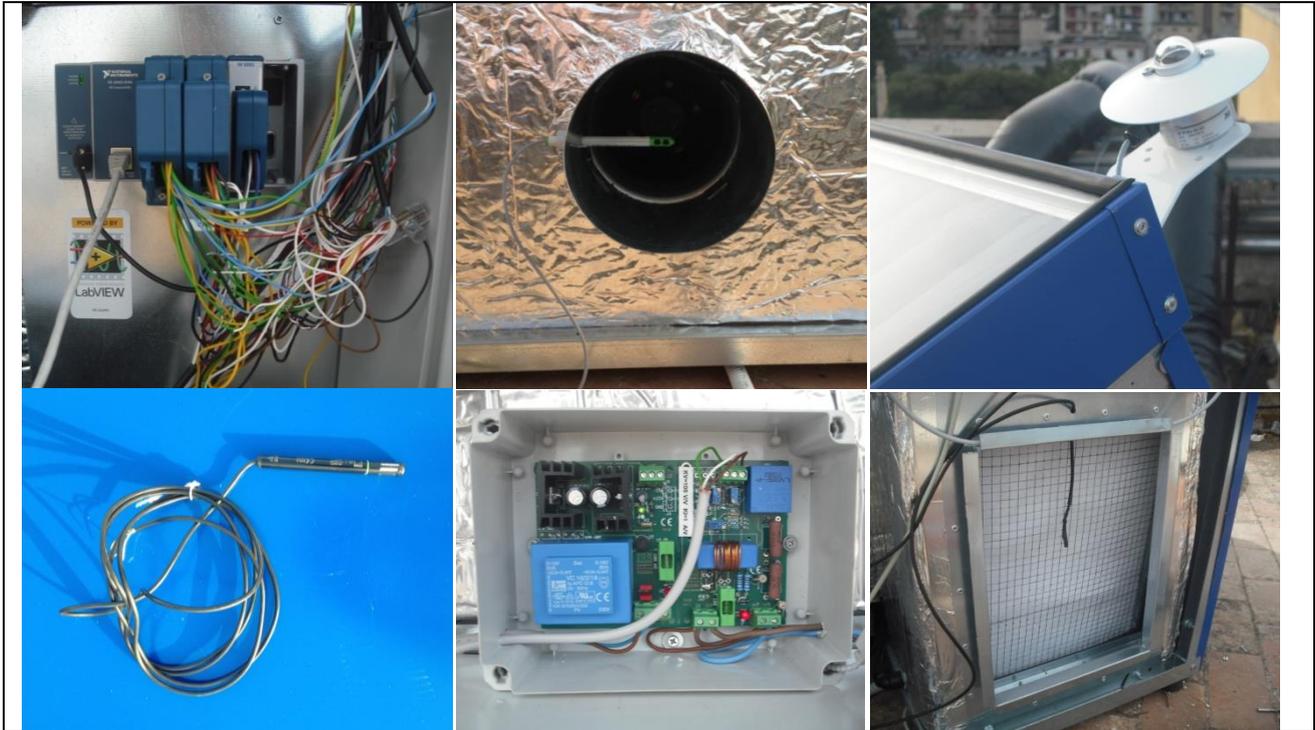


Figura 15: Foto di alcune parti dell'unità di acquisizione e controllo NI cDAQ 9184 e di alcune parti della strumentazione di misura utilizzata

2.3 Il sistema installato

L'unità freescoo residential installata è stata collegata ad un locale posto al secondo piano del Dipartimento DEIM sotto il piano di copertura su cui si affaccia Il Laboratorio Solare.

Il locale avente una superficie di circa 46 m² e un volume di circa 200 m³ è occupato mediamente da sei persone. Il sistema è stato collegato con due tubazioni flessibili da 200 mm provviste di isolamento termico. L'impianto ed il locale sono controllati dal sistema di supervisione in LabVIEW che controlla il funzionamento di ogni singolo componente, acquisisce e memorizza tutti i parametri necessari al monitoraggio ed alla determinazione delle prestazioni.



Figura 16: Foto del sollevamento sul lastrico solare del Dipartimento DEIM dell'Università di Palermo

Il locale è provvisto di due sistemi tipo split marca AERMEC di .. potenza frigorifera normalmente entrambi accesi durante le ore di condizionamento nella stagione estiva.



Figura 17: Foto del locale con le tubazioni di collegamento all'unità freesco residential

Durante le prove uno dei due sistemi è stato mantenuto spento mentre il funzionamento dell'altro è stato impostato in modo da far sì che in ambiente la temperatura non superasse i 27°C.

Si precisa comunque che le prove effettuate sul sistema freesco sono state svolte in alcuni casi con l'unità split accesa e in altri spenta.

In ogni caso, l'obiettivo dell'analisi è stato lo studio delle prestazioni del sistema relative al trattamento dell'aria piuttosto che al contributo di raffreddamento dato all'edificio.

In tal modo si è potuto anche caratterizzare il comportamento del sistema prescindendo dalla tipologia di locale considerato.



Figura 18: Foto del prototipo freesco residential installato presso il laboratorio solare del Dipartimento DEIM dell'Università di Palermo

2.4 Risultati sperimentali

Nell'ambito di questo lavoro sono state svolte diverse prove sull'unità in esame al fine di caratterizzarne il funzionamento.

Nella fase immediatamente successiva all'installazione del sistema, sono stati svolti diversi test funzionali finalizzati alla verifica e alla messa a punto del sistema di controllo e alla verifica del funzionamento dei singoli componenti. In particolare si è scelto di approfondire il funzionamento del sistema dei letti adsorbenti in quanto questo rappresenta il vero nucleo su cui si basa il sistema.

Inoltre, lo studio del comportamento dei letti adsorbenti è risultato di fondamentale importanza per una comprensione adeguata dei meccanismi di trasferimento di calore e di massa all'interno dell'unità esaminata.

Di seguito si mostra l'andamento delle prestazioni di uno dei due letti adsorbenti testato con una portata dell'aria di 300 m³/h. Si Prima di procedere alla prova si è proceduto a rigenerare completamente il letto con aria di rigenerazione a circa 50°C.

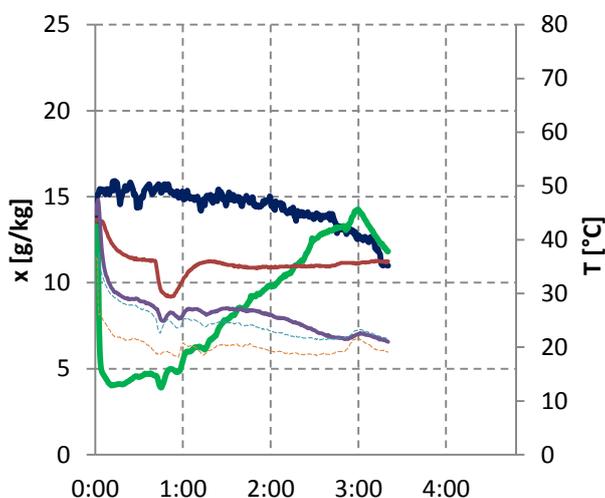


Figura 19: Andamento curve di temperatura aria e acqua batteria ed umidità assoluta dell'aria durante la fase di adsorbimento con portata dell'aria di processo di 300 m³/h.

Nel grafico è riportata la temperatura di ingresso-uscita (rosso-viola) e l'umidità assoluta dell'aria in fase di adsorbimento (blu-verde). Inoltre nei grafici sono riportate in tratteggiato le temperature dell'acqua in ingresso e uscita dalla torre di raffreddamento (arancione-celeste). L'umidità assoluta in ingresso si attesta durante la prova intorno ai 15 g/kg.

Si può notare che dopo poco l'inizio della prova si ha un picco di deumidificazione, che corrisponde al minimo della curva verde. Tale punto è raggiunto in pochi minuti, e ciò è dovuto al contributo positivo dato dal raffreddamento del materiale adsorbente che permette di asportare in brevissimo tempo il calore residuo relativo alla fase di rigenerazione precedente e quello che si sviluppa successivamente durante la fase di adsorbimento. Osservando l'andamento delle temperature si nota inoltre che la temperatura dell'aria in uscita è più bassa di quella in ingresso. La differenza tra le due curve inoltre va ad aumentare in quanto col tempo il materiale si va saturando e i fenomeni di adsorbimento diminuiscono, facendo diminuire anche la quota di calore prodotto.

Con questa portata il letto garantisce una deumidificazione tale che l'umidità assoluta dell'aria in uscita si mantiene al di sotto dei 10g/kg per circa 2 ore.

Le prove sull'efficacia dei letti adsorbenti svolte in condizioni reali hanno permesso di caratterizzare il funzionamento del sistema letti adsorbenti e valvola di scambio. Inoltre, in accordo con la Ditta costruttrice, è stata messa a punto una strategia di scambio dei letti adsorbenti che minimizza gli svantaggi dovuti alla inerzia termica dei letti. In particolare, prima di attuare la commutazione tra i letti, viene effettuato un pre-raffreddamento del letto che è stato utilizzato in modalità di rigenerazione, preparandolo per la successiva operazione di adsorbimento.

Relativamente alle prove effettuate sull'intero sistema vengono di seguito presentati alcuni dati di prestazione istantanea della macchina.

In Figura 20 riporta uno screenshot del pannello di controllo in Labview in cui si possono leggere alcune delle grandezze registrate durante il funzionamento della macchina.

In particolare, si noti che la macchina è in grado di inviare aria ad una temperatura di 19,7°C in corrispondenza di condizioni dell'aria esterna di 32,6°C e 12,3 g/kg e dell'aria nel locale di 26,8°C con 8,8 g/kg.

Si fa presente che in questa giornata è stato mantenuta accesa l'unità split presente nel locale al quale si è dato il valore desiderato di 27°C.

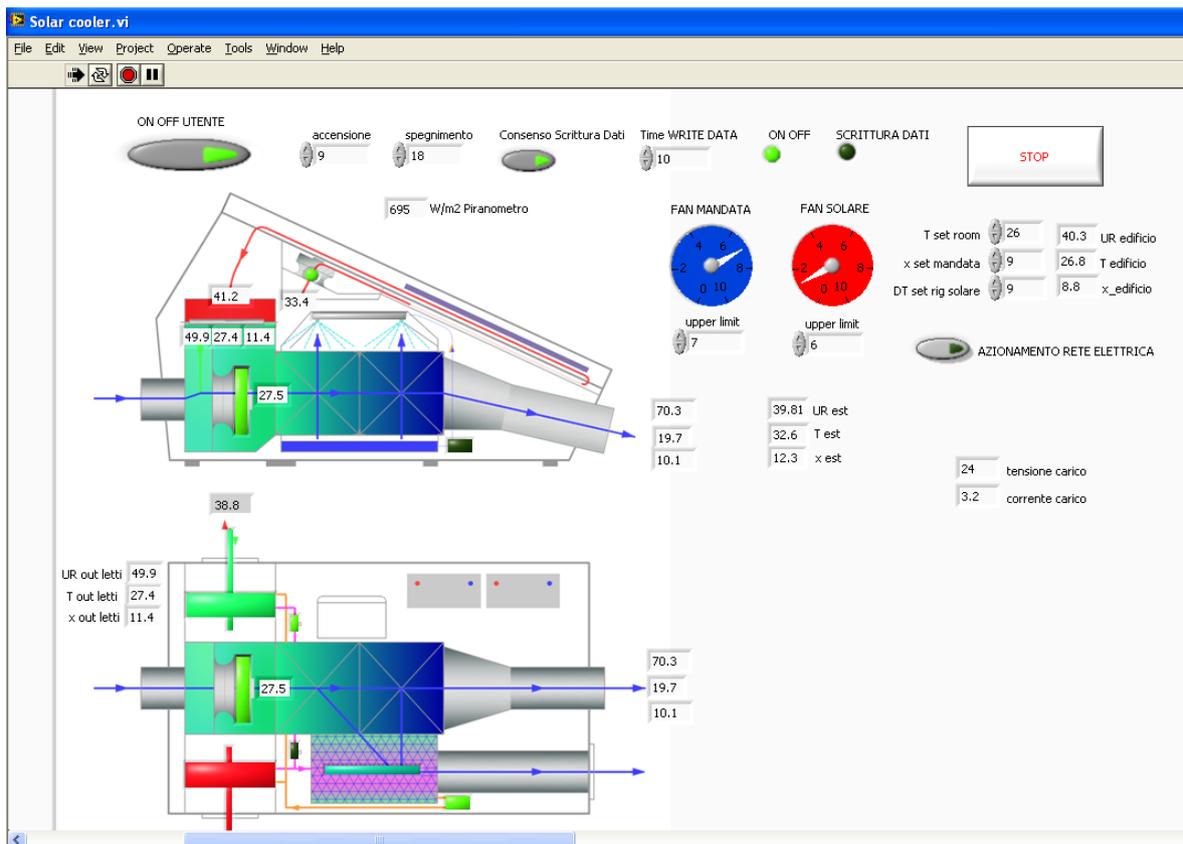


Figura 20: Valori di misura visualizzati sul pannello di controllo in Labview durante il funzionamento del sistema

A causa di ritardi nell'installazione del sistema, non è stato possibile giungere a risultati medi mensili sulle prestazioni del sistema mentre sono state svolte diverse analisi di alcune giornate di funzionamento. Di seguito si riportano alcuni risultati ottenuti durante una delle giornate di test esaminate.

In Figura 21 si mostra il dettaglio delle prestazioni di deumidificazione del sistema per un giorno in cui il sistema è stato attivato alle ore 12:00 e spento alle ore 20:00. Si tenga presente che l'unità split presente nel locale è stato mantenuto spento durante tutta la giornata di prova. La commutazione tra un letto e l'altro è rappresentata dal valore della variabile "valvola". All'accensione il sistema inizia a funzionare utilizzando il letto rigenerato nelle ore precedenti (Valvola=1) quando, seppure non vi era richiesta di climatizzazione, vi era disponibilità di calore dal collettore solare per la rigenerazione.

Come è possibile notare, il sistema di controllo mantiene nella stessa posizione la valvola di scambio dei letti ovvero il sistema continua a funzionare utilizzando sempre lo stesso letto mentre l'altro si trova in modalità di rigenerazione. Ciò dimostra che il letto è in grado di deumidificare l'aria in ingresso per diverse

ore e fino alle 7 circa quando il sistema commuta sull'altro letto. Il sistema mantiene l'ambiente ad una umidità intorno a 10.5 g/kg corrispondente ad una umidità relativa di circa 50% alla temperatura di 26°C.

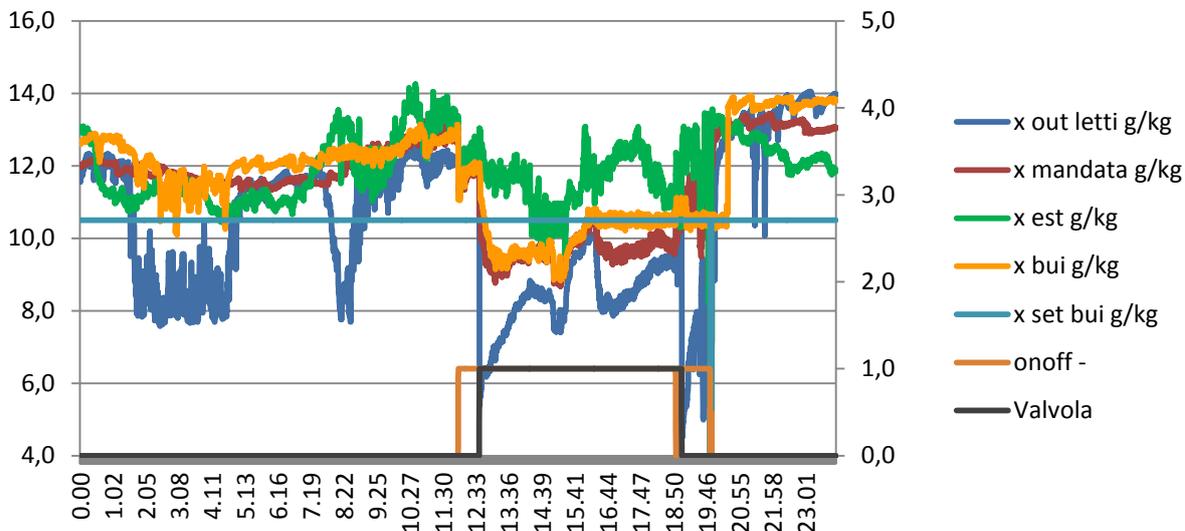


Figura 21: Valori di umidità assoluta dell'aria esterna (verde), dell'aria interna al locale (arancio), dell'aria di mandata (rosso scuro) e dell'aria in uscita dai letti adsorbenti (azzurro)

In Figura 22 si mostra l'andamento delle prestazioni del sistema in termini di mantenimento della temperatura di immissione T_{outHX} e della temperatura all'interno del locale T_{bui} . Una volta superato il transitorio di raffreddamento del locale, la temperatura di mandata scende raggiungendo valori minimi intorno a 21°C, la velocità del ventilatore si abbassa e la pompa dello scambiatore di calore evaporativo inizia un funzionamento con cicli di accensione e spegnimento al fine di controllare la temperatura nell'ambiente condizionato.

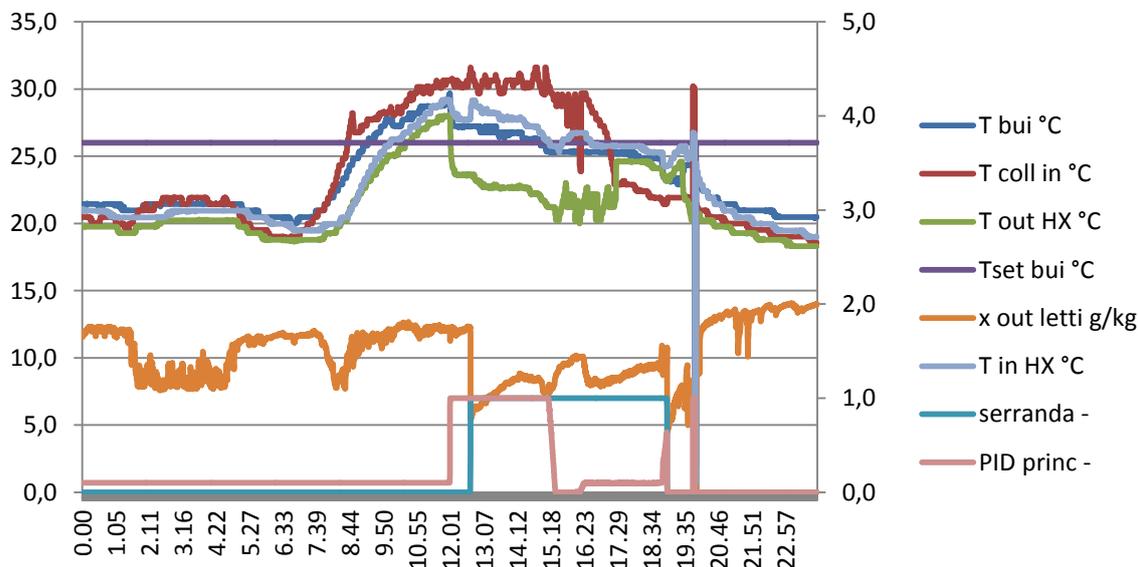


Figura 22: Valori di temperatura nei principali componenti del sistema per il giorno selezionato

In Figura 23 si riportano la potenza frigorifera sviluppata negli scambiatori evaporativi, nei letti adsorbenti e il totale della potenza frigorifera relativa al trattamento dell'aria, insieme all'indice di prestazione EER (*Energy Efficiency Ratio*). Come si vede il valore della potenza raggiunge un massimo nella prima ora di funzionamento per poi scendere successivamente quando l'ambiente si è raffreddato. Per il giorno di

funzionamento esaminato, il 34% della potenza frigorifera è correlata alla differenza di entalpia a monte e a valle dei letti adsorbenti, mentre il 66% è dovuto al raffreddamento attuato negli scambiatori evaporativi. Il valore medio giornaliero di EER è di 8,6 mentre la potenza media assorbita è di 90 W. I consumi di elettricità registrati per la movimentazione dell'aria e dell'acqua sono relativamente bassi così come previsto d'altra parte per questo tipo di unità.

Si fa notare che l'energia elettrica consumata dall'unità non proviene dalla rete elettrica ma dal sistema di autoproduzione di energia da fotovoltaico.

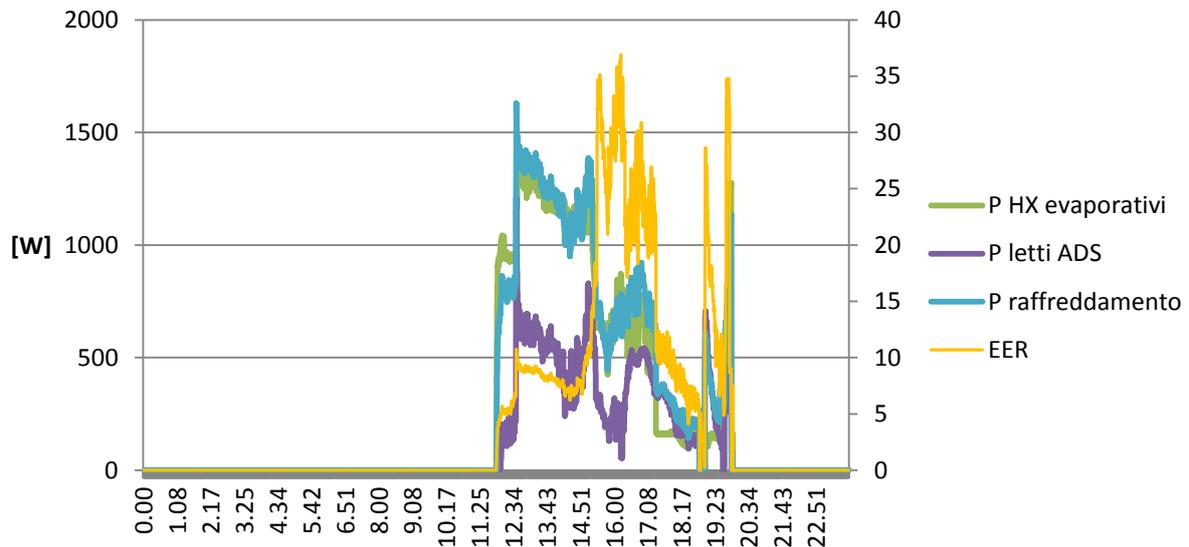


Figura 23: Prestazioni energetiche globali nel giorno di prova selezionato

Nella seguente figura viene mostrata la distribuzione dell'energia elettrica consumata dai diversi dispositivi ausiliari. Come si può notare la parte principale del consumo è dovuta al ventilatore principale che è responsabile del 59% del consumo totale pari a 0.72 kWh.

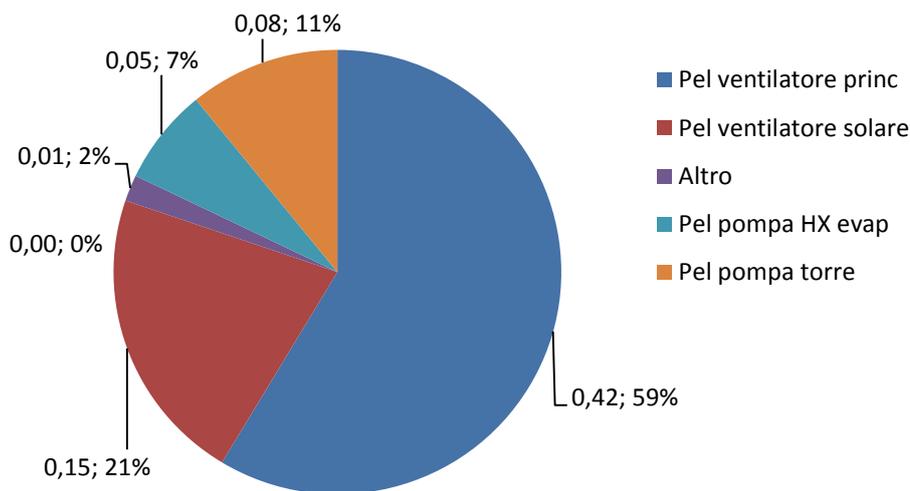


Figura 24 Distribuzione dei consumi elettrici in kWh

3 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 freescoo 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 sull'unità freescoo *residential* hanno permesso di verificare il funzionamento della macchina per una sua applicazione nel settore residenziale.

In particolare, sono stati svolti diversi test sul componente atto alla deumidificazione dell'aria, processo a partire dal quale è possibile la realizzazione del ciclo termodinamico DEC.

Questo componente è un innovativo letto adsorbente refrigerato che consiste in una batteria alettata in cui lo spazio tra le alette è parzialmente riempito con grani di gel di silice. Nel componente hanno luogo fenomeni di trasmissione del calore e scambio di massa, che permettono simultaneamente di deumidificare e raffreddare l'aria trattata (processo). La soluzione proposta prevede la rigenerazione del materiale adsorbente a bassa temperatura (40-60° C) permettendo l'uso di un collettore solare piano ad aria.

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 senza necessità di ulteriore rigenerazione. Infine, con questa tecnologia è possibile controllare il processo di deumidificazione agendo sulla temperatura del letto.

Il consumo di energia elettrica dei ventilatori e degli altri utilizzatori è risultato molto limitato (max 150 W). Ciò significa che l'obiettivo di mantenere basse le perdite di carico dell'aria nell'attraversamento dei vari componenti aerulici e dei canali interni alla macchina è stato pienamente raggiunto. In funzionamento stand-alone l'alimentazione elettrica è garantita nelle ore serali dalla presenza di un sistema di accumulo elettrico a batteria che immagazzina l'energia prodotta nelle ore diurne dal pannello fotovoltaico.

Ciò la rende particolarmente adatta ad applicazioni in cui vi è una bassa disponibilità di energia elettrica fornita dalla rete.

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 silice 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 sporco all'interno della torre dovuti a polvere, foglie, insetti etc;

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.

I punti di forza di tale nuovo sistema Solar DEC possono essere così riassunti:

- condizionamento degli spazi abitativi e/o lavorativi (raffreddamento, deumidificazione, ricambio dell'aria);
- elevata efficienza energetica grazie all'utilizzo di un particolare ciclo di trattamento dell'aria e di utilizzatori a basso consumo energetico;
- il sistema fotovoltaico a bordo dell'unità permette anche un funzionamento autonomo dal sistema di rete elettrica;
- rispetto dell'ambiente e utilizzo di fonti energetiche rinnovabili;
- assenza di gas nocivi per l'atmosfera, il refrigerante utilizzato è l'acqua.

Rispetto all'unità installata presso il C.R ENEA Casaccia, si è riscontrato un migliore funzionamento dell'unità in termini di raffreddamento dell'aria negli scambiatori evaporativi. Le temperature mediamente registrate in mandata sono state dell'ordine di 20-22°C con valori minimi anche di 19°C. Ciò è stato probabilmente dovuto ad una migliore distribuzione dell'acqua nello scambiatore evaporativo e all'uso di un particolare tensioattivo disciolto nell'acqua che ne ha aumentato la bagnabilità delle superfici.

4 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 PaI0204636

5 Abbreviazioni ed acronimi

<i>DEC</i>	Desiccant Evaporative Cooling
<i>CPB</i>	Cooled Packed Bed
<i>EER</i>	Energy Efficiency Ratio
<i>T_{coll out}</i>	Temperatura in uscita dal collettore, °C
<i>T_{edificio}</i>	Temperatura dell’edificio, °C
<i>T_{est}</i>	Temperatura esterna, °C
<i>T_{in coll dx}</i>	Temperatura dell’aria in entrata nel collettore destro, °C
<i>T_{in coll sx}</i>	Temperatura dell’aria in entrata nel collettore sinistro, °C
<i>T_{in/out letto DX}</i>	Temperatura dell’aria in entrata o in uscita dal letto adsorbente destro, °C
<i>T_{in/out letto SX}</i>	Temperatura dell’aria in entrata o in uscita dal letto adsorbente sinistro, °C
<i>T_{HX in evap}</i>	Temperatura dell’acqua in evaporazione, °C
<i>T_{w out torre}</i>	Temperatura dell’acqua nella torre evaporativa, °C
<i>T_{out aria torre}</i>	Temperatura in uscita dalla torre evaporativa, °C
<i>T_{ritorno}</i>	Temperatura di ritorno dall’edificio, °C
<i>T_{set mandata}</i>	Temperatura da immettere nell’ambiente richiesta, °C
<i>T_{w HX}</i>	Temperatura dell’acqua nello scambiatore di calore, °C
<i>UR_{edificio}</i>	Umidità relativa dell’edificio, %
<i>UR_{est}</i>	Umidità relativa dell’ambiente esterno, %
<i>UR_{ritorno}</i>	Umidità relativa di ritorno dall’edificio, %
<i>UR_{i n/out letto DX}</i>	Umidità relativa in entrata o in uscita dal letto adsorbente destro, %
<i>UR_{i n/out letto SX}</i>	Umidità relativa in entrata o in uscita dal letto adsorbente sinistro, %
<i>X_{edificio}</i>	Titolo dell’aria dell’edificio, %
<i>X_{est}</i>	Titolo dell’aria esterno, %
<i>X_{in/out letto DX}</i>	Titolo dell’aria in entrata o in uscita dal letto adsorbente destro, %
<i>X_{in/out letto SX}</i>	Titolo dell’aria in entrata o in uscita dal letto adsorbente sinistro, %
<i>X_{ritorno}</i>	Titolo dell’aria di ritorno dall’edificio, %
<i>X_{set room}</i>	Titolo dell’aria interno richiesto, %