

## La deumidificazione dell'aria nella climatizzazione

La diffusione dei sistemi di climatizzazione ha determinato il significativo aumento dei consumi elettrici estivi, con conseguenze problematiche per la gestione delle reti elettriche nazionali. I sistemi attualmente utilizzati per la deumidificazione non sono energeticamente efficienti in quanto richiedono una prima fase di raffreddamento e una di post-riscaldamento (come accade, per esempio, nelle Unità di trattamento Aria (UTA) convenzionali).

I sistemi **DEC - Desiccant and Evaporative Cooling systems** - sfruttano invece la **possibilità di sfruttare energia termica a bassa temperatura**

(il cosiddetto calore di rigenerazione, ricavato da fonte solare, cogenerazione o flussi termici di scarto di processi industriali e fornito da una specifica batteria all'aria di ripresa), per ottenere l'effetto utile di deumidificazione e raffreddamento.

Un **limite intrinseco dei sistemi DEC a ruota è il progressivo riscaldamento del materiale adsorbente durante la fase di deumidificazione**, dovuto al calore rilasciato dal processo di adsorbimento, che comporta effetti negativi sul processo complessivo.

Il presente studio si pone l'obiettivo di analizzare le potenzialità di un innovativo scambiatore di calore a elevata efficienza energetica sulla base di un modello teorico specificamente sviluppato e di ottimizzarne le prestazioni avvalendosi di simulazioni numeriche.

## Il sistema ECOS

E' stato sviluppato il modello teorico di un **innovativo scambiatore di calore aria-aria denominato ECOS**, da utilizzarsi per applicazioni destinate a utenti industriali/commerciali, con portate nominali di aria  $\geq 5000$  m<sup>3</sup>/h, avente funzione di deumidificazione per adsorbimento e contemporaneo raffreddamento evaporativo indiretto dell'aria di mandata.

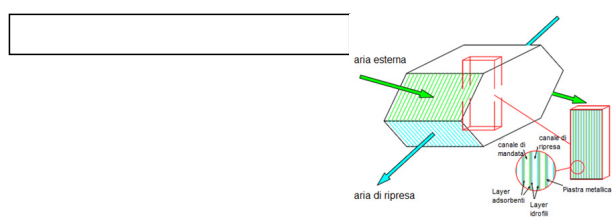
**Lo scambiatore ECOS (fig. 1)**, simile a un recuperatore statico di calore a piastre in controcorrente, **è costituito da canali di mandata** (dove fluisce l'aria esterna da deumidificare) rivestiti con materiale adsorbente e **da canali di ripresa**

(dove fluisce l'aria di ripresa) rivestiti di materiale idrofilo, che viene mantenuto bagnato.

Il calore rilasciato dal processo di adsorbimento del vapore nei canali di mandata è ceduto attraverso le piastre metalliche dello scambiatore al materiale idrofilo e all'aria di ripresa, in modo da contenere la temperatura del materiale adsorbente durante la deumidificazione e da incrementare il processo di evaporazione dell'acqua contenuta nel materiale idrofilo.

Come in tutti i sistemi basati su materiali adsorbenti, **alla fase di deumidificazione deve essere alternata la fase di rigenerazione**

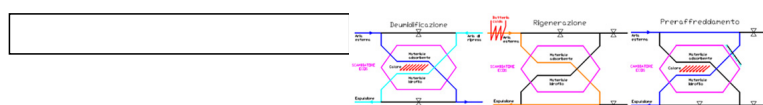
, in cui il vapore è asportato dal materiale adsorbente, riportandolo alle condizioni iniziali. Nelle UTA DEC convenzionali tale alternanza è garantita dal movimento della ruota, tramite cui il materiale essiccante è posto in contatto alternativamente con l'aria esterna e l'aria di ripresa.



**Fig.1** - Schema dello scambiatore ECOS  
(Scambiatori a layer adsorbenti a raffreddamento evaporativo indiretto)

Nel caso dello scambiatore in studio, di tipo statico, deve essere prevista **l'alternanza delle fasi di funzionamento**

, tramite il controllo dei flussi di aria, come chiarito nella **descrizione schematica di fig.2**



<b>Fig.2</b>	- Descrizione schematica delle fasi di funzionamento dello scambiatore (Scambiatori a layer adsorbenti a raffreddamento evaporativo indiretto)
--------------	--

Inoltre, per garantire un funzionamento continuo del sistema, è necessario che almeno **due scambiatori operino alternativamente e in parallelo**

: la

**fase di deumidificazione**

del primo scambiatore è contemporanea alle

**fasi di rigenerazione e preraffreddamento**

del secondo.

**Lo scambiatore ECOS può essere utilizzato in estate** per sostituire la funzione di alcuni componenti dei sistemi DEC convenzionali (la ruota essiccante, il recuperatore rotativo, l'umidificatore di ripresa e la batteria fredda) e

**in inverno per il recupero del calore**

dall'aria di ripresa, in quanto, essendo scambiatori in controcorrente con grandi superfici di scambio (sia pure rivestite di materiale non metallico) possono comunque garantire un coefficiente di scambio termico complessivo sufficiente allo scopo.

## Modellazione teorica e numerica dello scambiatore

L'analisi dei fenomeni di trasporto di massa e trasmissione di calore, adsorbimento e desorbimento, evaporazione e condensazione, convezione, conduzione e diffusione che avvengono contemporaneamente e in maniera interconnessa durante il funzionamento dello scambiatore, è stata svolta attraverso un approccio modulare, trascurando gli effetti di bordo e ipotizzando che i processi riguardanti una singola coppia di canali adiacenti (mandata e ripresa) siano rappresentativi di ciò che avviene nell'intero scambiatore in controcorrente.

**Sotto il profilo geometrico**, sono state analizzate **due potenziali versioni di scambiatore**, con e senza alettatura sinusoidale all'interno dei canali, per verificare l'eventuale vantaggio prestazionale fornito dall'alettatura, che permette di incrementare le superfici di scambio con l'aria, ma riduce i coefficienti convettivi di scambio termico e di massa.

**Sotto il profilo fluidodinamico**, con i valori di diametro idraulico (tra 1 e 5 mm) e di velocità media nominale dell'aria (1.5-3 m/s) considerati, **sono stati ottenuti numeri di Reynolds**

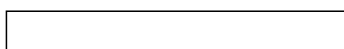
sempre corrispondenti a condizioni di moto laminare. Il moto e i fenomeni di scambio termico e di massa sono stati inoltre considerati come completamente sviluppati, trascurando gli effetti della entrance region (fluidodinamica e termica) ed infine è stato trattato il flusso come incomprimibile.

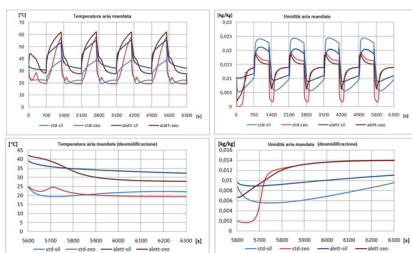
Allo scopo di implementare e testare i modelli sono stati inoltre opportunamente caratterizzati materiali che costituiscono i layer, adsorbenti e idrofili, e la lamiera metallica. In particolare, sono stati caratterizzati 4 materiali adsorbenti appartenenti alle famiglie delle zeoliti e dei gel di silice.

## Risultati e sviluppi futuri

**La simulazione condotta (fig. 3) sulle due tipologie di scambiatore** (piano e alettato) e sulle due famiglie di materiali adsorbenti (zeoliti e silice gel) ha evidenziato che, in termini di temperatura dell'aria di mandata, si hanno valori nettamente superiori (e quindi sfavorevoli, in quanto sarebbe necessario un post-raffreddamento ad opera di una batteria fredda) nel caso di utilizzo di canali alettati.

In termini di **umidità specifica** si nota invece come le due versioni con zeolite forniscano prestazioni peggiori probabilmente a causa di una limitata efficacia della fase di rigenerazione.





**Fig.3** - Andamento temperatura e umidità aria di mandata nello scambiatore (Scambiatori a layer adsorbenti a raffreddamento evaporativo indiretto)

**Sulla base di queste considerazioni, sono state tratte importanti valutazioni preliminari:**

- In termini di materiali, si è appurato che **i gel di silica permettono di ottenere benefici rilevanti dal processo di raffreddamento**

contemporaneo alla deumidificazione, mentre le zeoliti richiedono comunque elevate temperature di rigenerazione.

- l'alettatura di forma sinusoidale non fornisce risultati apprezzabili poiché si riducono i coefficienti di scambio convettivi (sia termico che di massa) nel canale. Riguardo il materiale adsorbente, la limitata conduttività termica non permette di cedere direttamente ed efficacemente il calore di adsorbimento ai canali di ripresa adiacenti, vanificando quindi i **vantaggi della tecnologia ECOS**

La prima campagna di simulazioni ha indicato dunque nella versione di scambiatore rivestita di gel di silice e priva di alettatura quella di riferimento per le successive attività di ottimizzazione e sviluppo. Queste ultime hanno riguardato soprattutto la simulazione di flusso equicorrente e controcorrente tra i canali di ripresa e di mandata e la cosiddetta rigenerazione inversa, ossia la possibilità che il flusso di aria calda che opera la rigenerazione dei layer nei canali di mandata percorra i canali in direzione opposta a quella della fase di deumidificazione.

**I risultati delle simulazioni hanno consentito inoltre di effettuare un primo**

**dimensionamento di massima dello scambiatore**, a meno delle incertezze dovute alle inevitabili semplificazioni introdotte nel modello e a potenziali variazioni legate al tipo di materiale adsorbente e alla tecnologia di coating dello stesso.

**Nella tabella seguente sono riportati i valori delle dimensioni geometriche dei canali e dello scambiatore**, unitamente ad altri parametri di progetto ottimizzati come le velocità dell'aria e la durata delle fasi.

simbolo	grandezza	valore
sp layer idr	spessore singolo layer idrofilo	0,35 mm
sp layer ads	spessore singolo layer adsorbente	0,35 mm
sp lamiera	spessore lamiera	0,5 mm
sp canale	spessore libero del canale	2 mm
H canale	altezza canale/scambiatore	1200 mm
L canale	lunghezza operativa canale	240 mm
	velocità media aria nel canale (mandata + ripresa)	2,5 m/s
	portata nominale (mandata + ripresa)	5000 m <sup>3</sup> /h
	sezione complessiva passaggio aria (mandata + ripresa)	0,556 m <sup>2</sup>
	sezione complessiva passaggio singolo canale (mandata + ripresa)	2400 mm <sup>2</sup>
	numero canali mandata	232
	numero canali ripresa	232
	spessore complessivo singolo canale (comprensivo di lamiera, layer e area libera)	3,2 mm
L scambiatore	larghezza scambiatore	1500 m
	durata fase deumidificazione	700 s
	durata fase rigenerazione	650 s
	durata fase preraffrescamento	50 s

**Tabella 1** - Dimensionamento dello scambiatore ECOS  
(Scambiatori a layer adsorbenti a raffreddamento evaporativo indiretto)

**Le prestazioni dello scambiatore nella configurazione ottimizzata descritta sopra, ottenute durante la campagna di simulazione, sono riportate nella successiva tabella 2**

:

sono rappresentative di diverse condizioni climatiche e relative temperature di rigenerazione, necessarie a garantire il target di umidità specifica di 8.7 g/kg, corrispondente alle prestazioni

fornite da un sistema convenzionale a condensazione con temperatura finale dell'aria a 12 °C, e nell'ipotesi di avere a disposizione una temperatura di rigenerazione massima  $T_{rig} = 80^\circ\text{C}$ .

Clima	Modalità	T <sub>in</sub>	ω <sub>in</sub>	T <sub>rig</sub>	T <sub>out</sub>	ω <sub>out</sub>	Gain sens	Gain lat	Q <sub>rig</sub>	COP tot	COP lat
		°C	g/Kg	°C	°C	g/Kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/s	%	%
molto caldo-umido	Ecos	35	15	68	24,6	8,57	10,49	14,59	33,38	81,4%	47,4%
	Ecos adiabatico	35	15	80	52,1	11,46	12,14	8,04	45,25	21,7%	19,1%
	DEC a ruota	35	15	80	28,5	8,70	6,54	14,30	31,25	71,8%	49,3%
molto caldo-umido	DEC a ruota	35	15	60	27,8	10,80	7,25	9,51	18,50	97,9%	55,5%
	Ecos	31	14	60	29,6	8,61	7,44	12,23	29,16	72,7%	45,2%
caldo-umido	Ecos adiabatico	31	14	80	49,5	10,09	18,61	9,88	49,27	71,2%	19,4%
	DEC a ruota	31	14	80	24,7	8,70	6,33	12,03	32,80	60,3%	39,5%
caldo-umido	DEC a ruota	31	14	60	27,2	9,30	3,82	10,67	20,50	76,1%	56,0%
	Ecos	31	12	45	23,4	8,75	8,49	7,88	14,48	122,8%	16,4%
caldo-secco	Ecos adiabatico	31	12	70	49,8	8,76	14,93	7,36	39,21	20,8%	20,2%
	DEC a ruota	31	12	80	21,2	8,70	9,85	7,49	33,60	55,0%	24,0%
caldo-secco	DEC a ruota	31	12	60	24,5	8,70	6,54	7,49	20,50	73,7%	39,4%

**Tabella 2** - Prestazioni attese in differenti condizioni climatiche (Scambiatori a layer adsorbenti a raffreddamento evaporativo indiretto)

**Il lavoro svolto ha confermato** la validità del concetto teorico di partenza, e cioè **l'effetto positivo che l'accoppiamento dei processi evaporativo e di adsorbimento produce sulla deumidificazione e il raffreddamento dell'aria esterna**

. Uno scambiatore aria-aria come quello analizzato rappresenta la tipologia ideale per massimizzare gli effetti di tale accoppiamento, ma presenta specifiche problematiche tecnologiche a fronte delle quali si ritiene necessario investigare strade alternative, ovvero di perseguire il medesimo obiettivo – il contenimento della temperatura nella fase di deumidificazione – attraverso soluzioni tecnologiche differenti.

**I limiti maggiori della presente soluzione** sono legati alla **complessità del sistema di canalizzazione dell'aria**, alla

sostanziale

**impossibilità di effettuare un recupero termico**

che contenga i consumi energetici dovuti alle fasi di riscaldamento/raffreddamento degli scambiatori,

**all'ingombro dei componenti**

e alla

**potenziale difficoltà pratica di bagnare in maniera uniforme e sufficiente i layer idrofili all'interno degli stretti canali di ripresa.**