

**ENEA**

Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

**RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

## **Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA**

**M. Beccali, P. Finocchiaro, R. Padalino, A. Messineo  
B. Di Pietra**



**Report RSE/2009/78**



Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA

*M. Beccali, P. Finocchiaro, R. Padalino  
B. Di Pietra, A. Messineo*



UNIVERSITÀ DI PALERMO

Report RSE/2009/78

## SVILUPPO ALGORITMI SU AMBIENTE INTEGRATO ENEA

M. Beccali, P. Finocchiaro, R. Padalino, A. Messineo (Dipartimento di Ricerche Energetiche e Ambientali – DREAM – dell’Università di Palermo)

B. Di Pietra (ENEA)

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Studio e dimostrazione di forme di finanza innovativa e di strumenti di programmazione e pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici a scala territoriale e urbana

Responsabile Tema: Ilaria Bertini, ENEA



Accordo di Collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM) dell'Università degli Studi di Palermo

**TITOLO DELL'ATTIVITÀ DI RICERCA:**

Contributo all'implementazione di sistemi di Solar Desiccant Cooling nell'ambiente integrato di sviluppo

**DELIVERABLE A2:**

“Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

Data: 31/03/2009

Responsabile Scientifico: Prof. Marco Beccali

Pietro Finocchiaro

Rosa Padalino

## **DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”**

### **1 INTRODUZIONE**

Il presente Deliverable descrive il lavoro di ricerca condotto dal DREAM relativo all'implementazione di sistemi di Solar Desiccant Cooling nell'ambiente integrato da sviluppare in Simulink. Nella prima parte del documento sono presentate le configurazioni impiantistiche DEC che sono state prese in considerazione ed implementate nell'ambiente di sviluppo integrato. Successivamente, vengono presentati i modelli sviluppati in TRNSYS per la simulazione dell'intero sistema nelle varie configurazioni impiantistiche esaminate.

Segue una breve descrizione dei modelli Matlab per la simulazione dei singoli componenti e dell'intero sistema DEC appositamente sviluppati nell'ambito di questo lavoro. In particolare, vengono presentati i blocchi Simbad impiegati per la costruzione del modello relativo all'intero sistema e quelli per la simulazione di quei componenti non presenti nella libreria citata e creati ex novo o modificati a partire da quelli presenti. (ruota essiccante, ventilatore, regolatore per cambio modalità di funzionamento, ecc..).

### **2 CONFIGURAZIONI DI UNITA' DI TRATTAMENTO ARIA DEC ALIMENTATE CON ENERGIA SOLARE**

E' stata operata una selezione delle configurazioni che trovano maggiormente applicazione e che ad oggi possono essere considerate tecnologicamente mature. In particolare sono state prese in esame le seguenti configurazioni impiantistiche:

- Sistema desiccant cooling standard (configurazione **A**)
- Sistema desiccant cooling con due batterie di raffreddamento ausiliarie (configurazione **B**)
- Sistema desiccant cooling con due batterie di raffreddamento ausiliarie e recupero del calore di condensazione (configurazione **C**)
- Sistemi convenzionali di riferimento (configurazione **D**)

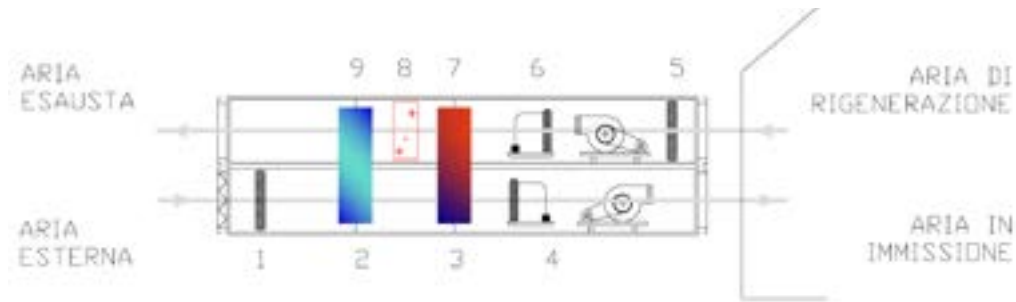
Inoltre, al fine di ampliare il ventaglio di opzioni impiantistiche, le sequenze di trattamento dell'aria precedenti possono essere accoppiate a collettori solari:

- ad aria
- ad acqua

#### **2.1 SISTEMA DESICCANT COOLING STANDARD**

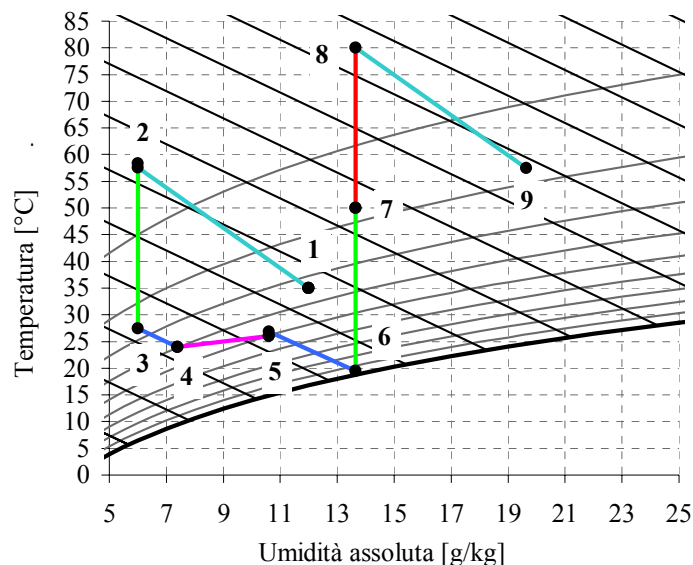
Nel ciclo desiccant cooling di riferimento ovvero quello cosiddetto “*standard*”, il trattamento dell'aria è ottenuto tramite la realizzazione di tre processi successivi: un processo iniziale di deumidificazione tramite adsorbimento nella ruota essiccante, un successivo raffreddamento evaporativo indiretto realizzato con il flusso d'aria di ritorno dall'edificio ed infine, quando richiesto, un raffreddamento evaporativo diretto attuato sino a portare l'aria in condizioni di immissione. Nello schema di seguito è descritto il principio di funzionamento del sistema desiccant cooling standard.

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”



**Figura 1: Schema di funzionamento di un ciclo desiccant cooling standard con ruota al gel di silicio**

In Figura 2 sono riportati su un diagramma di Mollier le trasformazioni termodinamiche per il sistema esaminato. L'aria esterna in condizioni di temperatura ed umidità elevata attraversando il rotore adsorbente viene fortemente deumidificata ma al contempo subisce un riscaldamento a causa del calore latente di condensazione (1→2). Tramite poi uno scambiatore di calore rotativo viene raffreddata in controcorrente con il flusso proveniente dall'edificio precedentemente portato a saturazione (2→3) (*raffreddamento evaporativo indiretto*). Successivamente, tramite un raffreddamento evaporativo diretto viene raffreddata ulteriormente e portata alle condizioni di ingresso (3→4). La temperatura di immissione è così vincolata all'umidità specifica in ingresso all'umidificatore nel senso che è possibile abbassare la temperatura del flusso d'aria tramite il raffreddamento evaporativo solo fino a che non venga superato il valore di progetto per l'umidità assoluta in immissione.



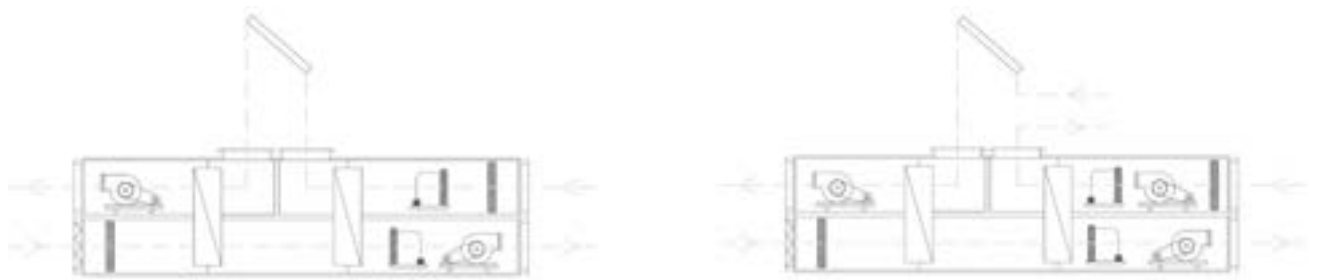
## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

(raffreddamento evaporativo), l'aria viene raffreddata e portata a saturazione (5→6) e successivamente preriscaldata nello scambiatore rotativo (6→7). A questo punto, attraverso lo scambiatore rigenerativo (7→8), viene ulteriormente aumentata la sua temperatura ed inviata al rotore adsorbente per la sua rigenerazione (8→9).

E' da sottolineare che il ciclo standard descritto sopra presenta dei limiti di applicazione. Infatti, quando l'umidità assoluta e la temperatura dell'aria esterna superano un certo limite oppure in presenza di carichi latenti interni elevati, con il ciclo standard spesso non è possibile garantire le condizioni di immissione di progetto. Ad esempio, per un caso tipico ove sia richiesto un titolo di immissione di  $8 \text{ g}_v/\text{kg}_a$ , con un rotore deumidificante di media efficienza operante ad una temperatura di rigenerazione di  $80^\circ\text{C}$  e una temperatura dell'aria di processo di  $35^\circ\text{C}$ , la capacità di deumidificazione unitaria è di circa  $7 \text{ g}_v/\text{kg}_a$ , per cui il contenuto massimo di umidità nell'aria esterna che può essere trattato risulta pari a circa  $16 \text{ g}_v/\text{kg}_a$ .

### 2.2 SISTEMI DESICCANT COOLING AD ARIA

Non essendo installato normalmente un accumulo termico, questi possono essere impiegati quando vi è alta corrispondenza tra la radiazione solare ed il carico dell'impianto oppure in quei casi ove è possibile sfruttare l'attivazione delle masse interne all'edificio.



**Figura 3: Unità di trattamento aria desiccant cooling rigenerata con collettori ad aria senza sistema ausiliario con riscaldamento dell'aria di ritorno dall'edificio (a sinistra) e dell'aria esterna (a destra) per la rigenerazione della ruota essiccante**

I sistemi che impiegano collettori ad aria, pur avendo il vantaggio della semplicità non essendo presente il sistema di accumulo, presentano consumi elettrici per gli ausiliari più elevati rispetto ai sistemi che impiegano collettori ad acqua. Nella Figura 3 riportati gli schemi impiantistici di due unità di trattamento aria di tipo desiccant cooling con aria di rigenerazione riscaldata con collettori ad aria.

Nello schema riportato nella Figura 3 a sinistra la rigenerazione della ruota deumidificante è realizzata tramite riscaldamento dell'aria proveniente dall'edificio. Questa opzione ha il vantaggio del pre-riscaldamento dell'aria di rigenerazione grazie al calore sensibile ceduto dal recuperatore di calore e la presenza soltanto di due ventilatori. Presenta lo svantaggio di maggiori perdite di carico dovendo la portata d'aria di ritorno dall'edificio passare comunque attraverso la ruota deumidificante anche quando questa non risulta attiva.

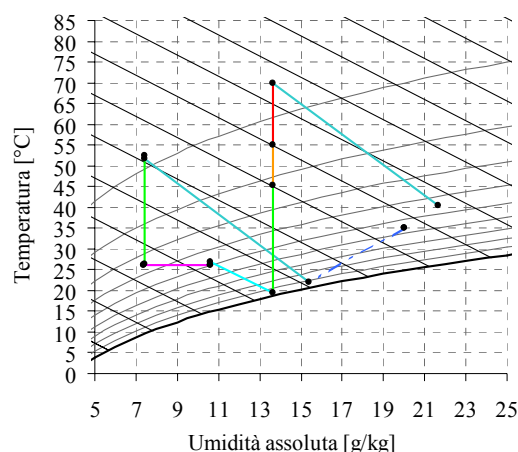
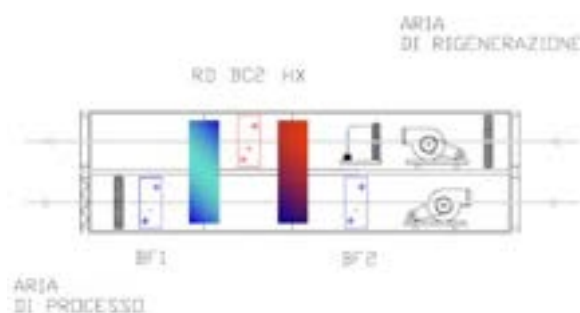
Nello schema di Figura 3 a destra la rigenerazione della ruota deumidificante è realizzata tramite riscaldamento dell'aria proveniente dall'esterno. Questa opzione può avere il vantaggio di un minor contenuto di umidità dell'aria di rigenerazione con conseguente

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

miglioramento in termini di prestazioni della ruota deumidificante. E' da sottolineare comunque come questo debba essere verificato in ogni caso specifico tenendo presente le caratteristiche climatiche del sito e le reali condizioni operative dell'impianto. In regioni climatiche caratterizzate da climi umidi infatti il contenuto di vapore nell'aria esterna può risultare addirittura maggiore di quello dell'aria in uscita dall'umidificatore di ritorno, per cui la soluzione citata non risulterebbe conveniente. Inoltre è da considerare che per il funzionamento del sistema sono necessari tre ventilatori anziché due.

La regolazione del sistema prevede tre modi di funzionamento per le diverse condizioni di carico sulla base dei quali vengono attivati o disattivati gli elementi che compongono il sistema come descritto nella seguente tabella.

### 2.3 SISTEMA DESICCANT COOLING CON DUE BATTERIE DI RAFFREDDAMENTO AUSILIARIE



**Figura 4: Sistema desiccant cooling con due batterie fredde ausiliarie – Schema di funzionamento (a sinistra) e ciclo di trattamento sul diagramma di Mollier per le condizioni dell'aria esterna di 20 g/kg e 35°C (a destra)**

In questa configurazione di unità di trattamento, l'aria esterna viene pretrattata allo scopo di abbassarne la temperatura ed il contenuto di umidità in una batteria di raffreddamento ausiliaria posta a monte del rotore deumidificante. Questo permette il raggiungimento dell'umidità di immissione anche in casi di aria esterna molto umida ed una maggiore efficienza nel successivo processo di deumidificazione realizzato nella ruota essiccante. Il successivo trattamento dell'aria di processo è simile a quello visto per il ciclo desiccant cooling standard a meno di una seconda batteria ausiliaria di raffreddamento che interviene nel caso in cui all'uscita dell'umidificatore non si sia raggiunta la temperatura di immissione voluta.

Sul lato dell'aria di ritorno impiegata per la rigenerazione della ruota essiccante valgono le considerazioni fatte al paragrafo citato.

Questa configurazione è caratterizzata dalla possibilità di coprire sempre il carico. Infatti la presenza della batteria ausiliaria di pre-deumidificazione permette il raggiungimento delle condizioni di immissione qualunque sia la disponibilità di radiazione solare e dunque il grado di deumidificazione raggiunto per mezzo della ruota essiccante. Per ogni caso specifico e

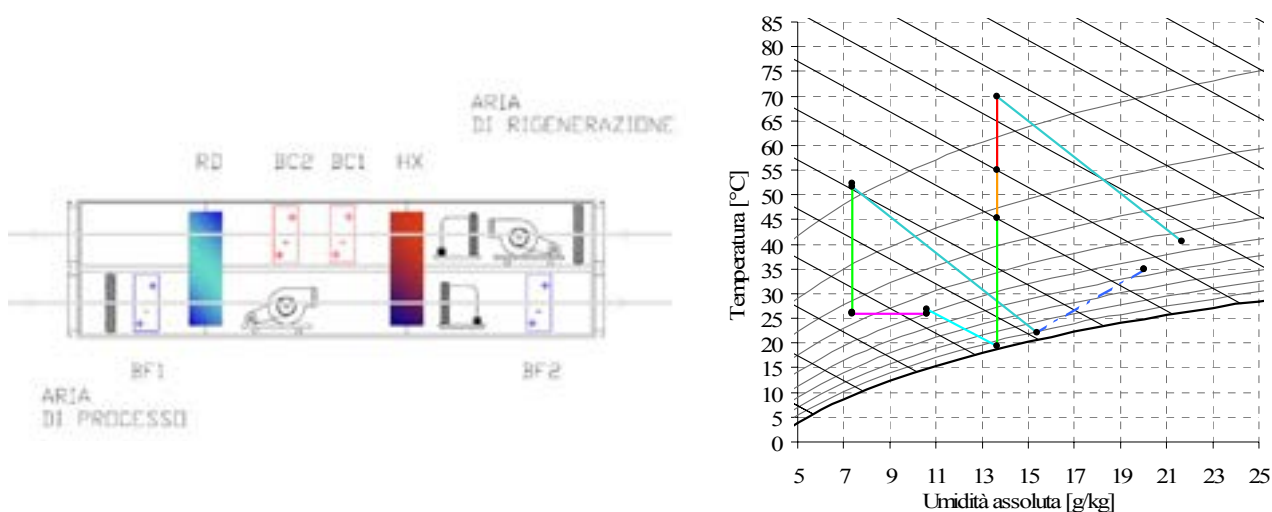
## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

sulla base della disponibilità di radiazione solare, la batteria di pre-deumidificazione può essere controllata in modo tale da minimizzarne l'impiego.

L'altra batteria di raffreddamento è impiegata invece per portare l'aria alla temperatura di immissione nel caso in cui questa non dovesse essere raggiunta all'uscita dall'umidificatore.

Questa configurazione presenta il vantaggio che la temperatura dell'acqua refrigerata in ingresso nelle batterie di raffreddamento può essere più alta (13-16°C) rispetto ai valori comunemente impiegati nelle unità convenzionali (6-9°C) con notevole aumento delle prestazioni della macchina frigorifera. La deumidificazione dell'aria è così realizzata in due passi successivi. Nelle simulazioni svolte si è scelto di mantenere costante il set point di umidità assoluta dell'aria in uscita dal componente ed in particolare si è scelto un limite di intervento per l'umidità assoluta dell'aria esterna pari a 15 g/kg. Solo per le configurazioni che impiegano i collettori ad aria di tipo ibrido si è scelto il valore di 13 g/kg al fine di limitare la superficie dei collettori solari.

### 2.4 SISTEMA DESICCANT COOLING CON DUE BATTERIE DI RAFFREDDAMENTO AUSILIARIE E RECUPERO DEL CALORE DI CONDENSAZIONE



**Figura 5: Sistema desiccant cooling con due batterie fredde ausiliarie e recupero del calore di condensazione - Schema di funzionamento (a sinistra) e ciclo di trattamento sul diagramma di Mollier per le condizioni dell'aria esterna di 20 g/kg e 35°C (a destra)**

Il ciclo di trattamento dell'aria di processo per questa configurazione è lo stesso di quello visto precedentemente per la configurazione che impiega due batterie fredde ausiliarie. La differenza sostanziale è relativa al processo subito dall'aria di ritorno dall'edificio e risiede nella possibilità di attuare il recupero del calore di condensazione della macchina frigorifera ausiliaria al fine di pre-riscaldare l'aria di rigenerazione. Questo permette, a parità di temperature di rigenerazione e dunque di prestazioni dell'unità di trattamento, la diminuzione del calore che deve essere fornito dal sistema solare ed in definitiva l'installazione di una superficie minore di collettori con relativi benefici in termini di un minore costo di impianto.

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

Questa configurazione è anche denominata “a pompa di calore integrata” o “a recupero termodinamico”.

E' da considerare comunque che la temperatura dell'aria in uscita dallo scambiatore di calore rotativo e in ingresso nella batteria condensante ha valori normalmente intorno a 35 – 40°C per cui l'impiego di una macchina frigorifera condensata ad acqua non è consigliabile per questa applicazione risultando molto modesto il salto termico ottenibile sul lato dell'aria di rigenerazione. Infatti la temperatura massima di raffreddamento per una macchina condensata ad acqua è di circa 45°C.

### 2.5 SISTEMA CONVENZIONALE DI RIFERIMENTO

Inoltre, al fine di avere un riferimento per il confronto dei risultati in termini di consumo energetico, verrà implementata una configurazione di trattamento dell'aria di tipo convenzionale. In particolare si è scelta una unità di trattamento aria con scambiatore di calore (sensibile o entalpico) posto tra il flusso di ritorno dall'edificio e quello di aria proveniente dall'esterno accoppiata ad un chiller elettrico. Uno schema dell'unità presa come riferimento è riportato nella figura seguente.

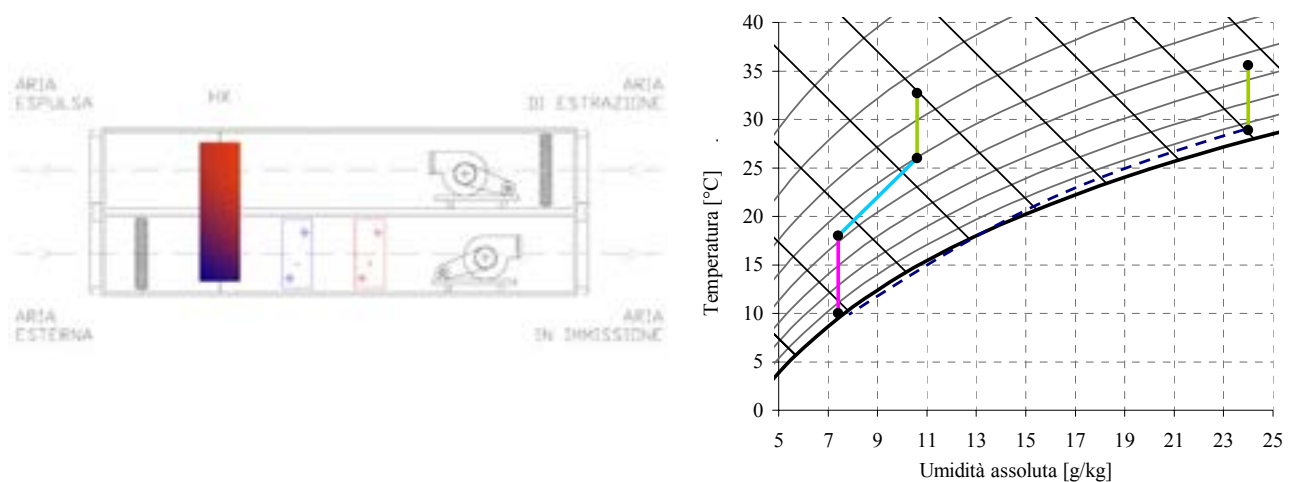


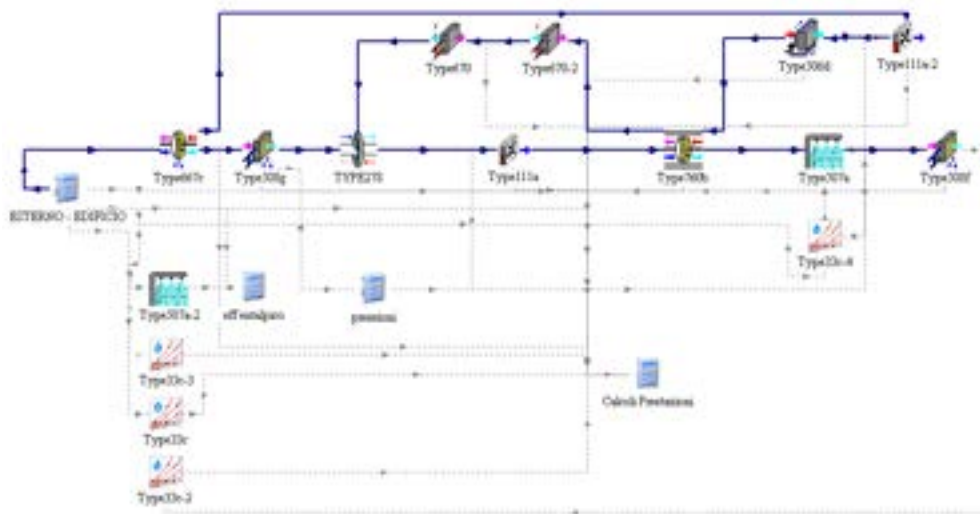
Figura 6: Unità convenzionale di riferimento - Schema di funzionamento (a sinistra) e ciclo di trattamento sul diagramma di Mollier (a destra)

### **3 SVILUPPO SU PIATTAFORMA TRNSYS 16 DI MODELLI COMPLETI PER LA SIMULAZIONE DEI SISTEMI SOLAR DEC**

Per un confronto con i risultati dei modelli di simulazione sviluppati in Simulink, è stato creato un modello TRNSYS dell'intero impianto completo di tutti i componenti previsti nell' ciclo DEC. Il modello creato per la simulazione dinamica delle configurazioni esaminate, tiene conto della variabilità delle condizioni climatiche e dunque del diverso input energetico dato all'unità di trattamento aria in termini di rigenerazione della ruota essiccante e carico sensibile e latente da trattare. Inoltre, viene considerata l'accensione e lo spegnimento di ogni componente di impianto dovuto alla logica di regolazione e controllo.

Nello studio sono state osservate le seguenti condizioni operative:

- simulazioni svolte con un time step di 0,25 h
- tolleranza sulla temperatura interna al locale adottata nella logica di regolazione  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
- tolleranza sull'umidità relativa interna al locale adottata nella logica di regolazione  $\pm 5\%$
- tutte le configurazioni sono controllate dalla stessa logica di regolazione descritta al paragrafo



**Figura 7: Interfaccia grafica del modello realizzato in Trnsys per la simulazione dinamica dei sistemi impiantistici esaminati**

I risultati ottenuti dalle simulazioni in ambiente TRNSYS hanno permesso un raffronto con quelli provenienti dai modello Simulink sviluppato. In particolare, sono state eseguite delle verifiche sul funzionamento del modello della ruota essiccante, ottenendo risultati soddisfacenti in termini di errore sulla stima della capacità di deumidificazione.

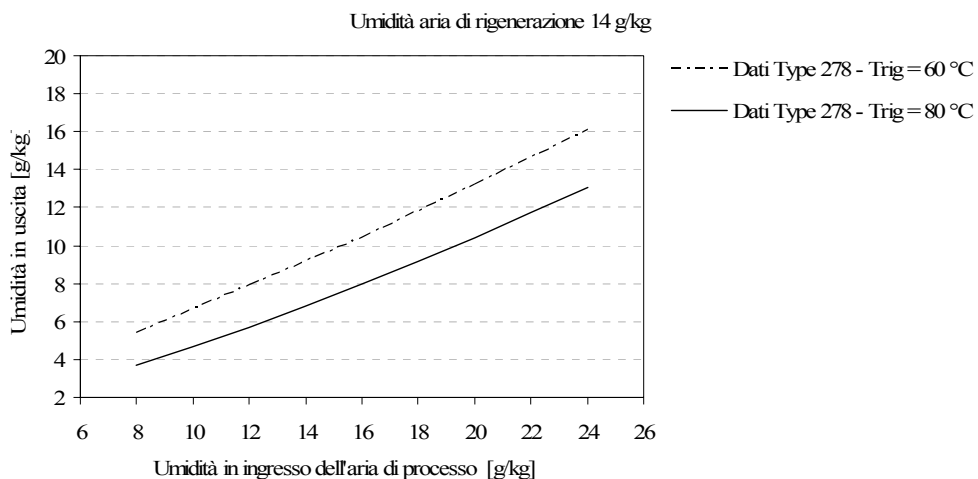
Il componente che caratterizza il ciclo di trattamento desiccant cooling è la ruota essiccante. La sua modellizzazione matematica risulta dunque di fondamentale importanza per la validità dei risultati ottenuti. Nella libreria di componenti TESS disponibile in aggiunta a quella dei componenti standard che viene fornita a corredo con il programma è presente un modello di

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

ruota essiccante, il TYPE 683, basato su un sistema di equazioni sviluppato da Jurinak descritto nei prossimi paragrafi. Il modello determina la temperatura di rigenerazione necessaria per il raggiungimento di una data umidità assoluta dell'aria di processo in uscita dal componente, note le condizioni dell'aria di processo in ingresso, l'umidità assoluta dell'aria di rigenerazione e le portate su entrambi i lati. In output viene restituita inoltre la temperatura dell'aria di processo in uscita dal componente.

Questo modello non risulta però indicato per l'applicazione al caso considerato. Infatti, essendo la temperatura di rigenerazione dipendente dalle condizioni operative del sistema solare, per tutte le configurazioni impiantistiche prese in esame questa deve essere necessariamente un input e non un output per il modello della ruota essiccante.

Per la simulazione del componente in questione si è scelto di impiegare un modello Trnsys non standard e sviluppato al Fraunhofer ISE di Friburgo. Il codice matematico alla base del modello è stato introdotto nella libreria di Trnsys con il nome di Type 278.



**Figura 8: Output del TYPE 278 - Umidità assoluta dell'aria di processo in uscita dalla ruota essiccante in funzione di quella in ingresso e della temperatura di rigenerazione per il modello di ruota essiccante 1**

Il modello in esame si basa su dati di catalogo relativi a tre diversi costruttori di ruote essiccanti. Il modello di ruota scelto per le simulazioni è il numero 1.

Gli input richiesti dal modello sono:

- la portata dell'aria di processo e di rigenerazione
- la temperatura dell'aria di processo in ingresso e di rigenerazione
- l'umidità assoluta dell'aria di processo e di rigenerazione
- frazione della portata di rigenerazione by-passata
- controllo on-off

I parametri sono la pressione dell'aria e il modello relativo ai tre costruttori considerati.

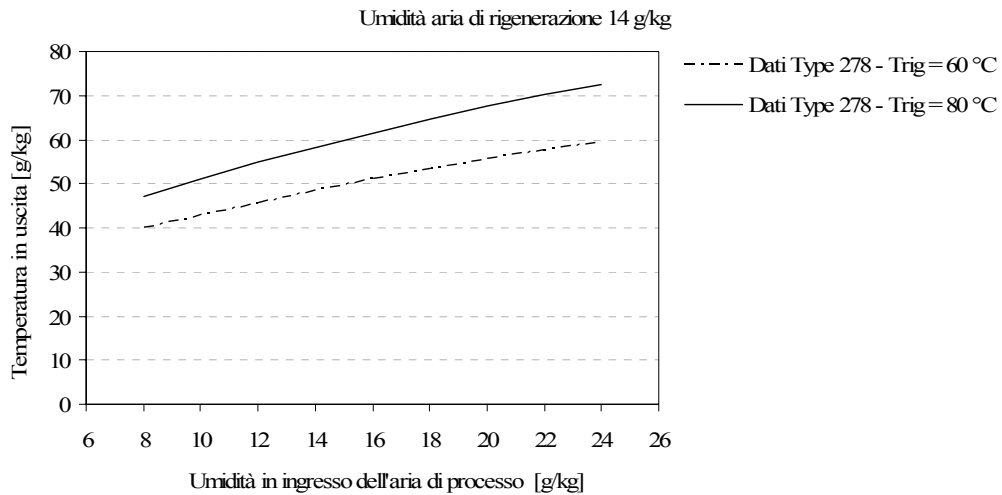
Gli output restituiti dal modello sono:

- la portata dell'aria di processo in uscita dalla ruota essiccante
- la temperatura dell'aria di processo in uscita dalla ruota essiccante

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

- l’umidità assoluta dell’aria di processo in uscita dalla ruota essiccante

Nella modellizzazione del componente non sono considerate invece, la variazione delle prestazioni in funzione della velocità di rotazione e di altre caratteristiche dimensionali quali la taglia e lo spessore della ruota essiccante.



**Figura 9: Output del TYPE 278 - Temperatura dell’aria di processo in uscita dalla ruota essiccante in funzione dell’umidità in ingresso e della temperatura di rigenerazione per il modello di ruota essiccante 1**

## **4 ADATTAMENTO DEGLI ALGORITMI PER L’INSERIMENTO NELL’AMBIENTE INTEGRATO DI SVILUPPO**

L’implementazione dei sistemi DEC in oggetto dovrà essere integrata all’interno della piattaforma di simulazione del sistema edificio impianto sviluppata da ENEA e denominata O.DES.S.E. (Optimal DESign for Smart Energy). La piattaforma è in grado di simulare dinamicamente l’esercizio di fonti energetiche funzionanti in generazione distribuita al servizio d’utenze reali (edifici) e con condizioni tariffarie, fiscali e normative reali. Per integrare il modello del Solar Desiccant Cooling all’interno della piattaforma ODESSE è necessario quindi parametrizzare tutte le grandezze dipendenti dai dati nominali del sistema e la configurazione di impianto. Infatti sia i dati nominali che la configurazione di impianto verranno settati dall’utente in una apposita interfaccia grafica e scritti da ODESSE nel file dei parametri con il quale viene inizializzato il modello del Solar Desiccant Cooling.

A tal fine, sono stati creati in ambiente Simulink tutti i blocchi necessari per implementare l’intera Unità di trattamento aria dei sistemi DEC, organizzandoli in un’apposita libreria (HVCA). Per effettuare alcuni calcoli interni sono stati utilizzati alcuni blocchi del pacchetto Simbad, opportunamente modificati. Inoltre è stato creato uno specifico blocco di controllo dell’umidità relativa, il quale interviene mantenendo la temperatura e riportando l’umidità in condizioni di saturazione, nel caso in cui durante la simulazione si raggiungano dei punti privi di significato fisico, in maniera analoga a quanto avviene nel programma di simulazione Trnsys. Tutti i blocchi prevedono un ingresso di comando Com che, se posto ad uno, ne determina l’accensione e, in caso contrario, rende il blocco inattivo pur considerando la relativa caduta di pressione. Ogni blocco è collegato mediante un vettore di ingresso e di uscita relativo all’aria trattata con quattro componenti: Temperatura [°C]; Umidità assoluta [Kgv/Kga]; Pressione totale [Pa]; Portata [Kg/s].

### **4.1 PRINCIPALI MODELLI DI SIMULAZIONE SIMULINK**

#### *4.1.1 VENTILATORE*

Il blocco “ventilatore” è stato costruito modificando il blocco “Simple Fan” della libreria Distribution Elements, presente nel toolbox Simbad.

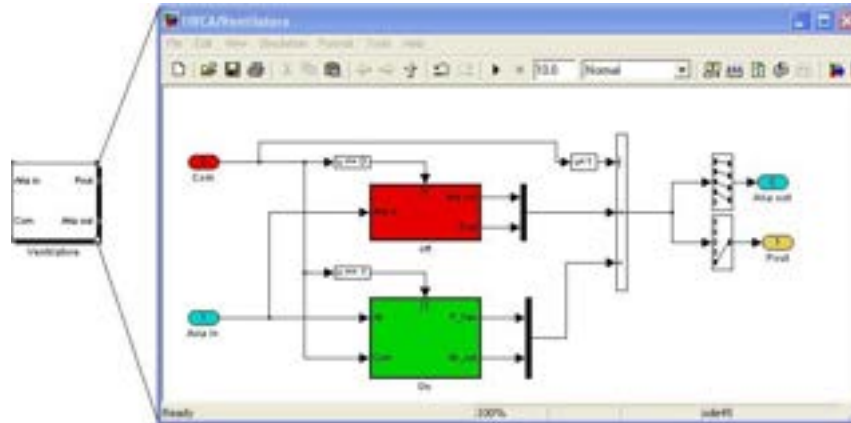
Le principali modifiche effettuate sono:

- Quando il ventilatore è spento (comando a zero) fornisce in uscita il vettore di aria in ingresso inalterato e potenza nulla;
- E’ stato introdotto un ulteriore parametro **a**, che tiene conto del calore fornito dal motore della ventola, qualora posizionato all’interno. Quindi mentre prima la temperatura di uscita era la stessa di quella in ingresso, con l’aggiunta di tale parametro varia in base al calore fornito.

Il modello del ventilatore consente principalmente il calcolo del consumo di energia elettrica a seconda che esso funzioni a singola velocità, con due velocità o a velocità variabile.

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

La portata che attraversa la ventola dipende dall'ingresso di comando fornito dal controllore, mentre si trascura il calcolo della pressione.



**Figura 10: Modello ventilatore**

Il blocco presenta i seguenti ingressi:

1. **Com:** Ingresso di comando per il controllore, permette di selezionare la modalità di funzionamento (0 ventilatore spento, 1 singola velocità, 1 o 2 due velocità, da 0 a 1 velocità variabile);
2. **Aria In:** Vettore normalizzato relativo alle proprietà dell'aria in ingresso (Temperatura [°C], umidità assoluta [Kg/Kg aria secca], Pressione [Pa], Portata [Kg/s]).

Le uscite di questo blocco sono:

1. **Aria out:** Vettore normalizzato contenente tutte le informazioni relativi all'aria in uscita dal ventilatore (Temperatura [°C], umidità assoluta [Kg/Kg aria secca], Pressione [Pa], Portata [Kg/s]).
2. **P\_fan:** Potenza elettrica consumata dal ventilatore [W].

I parametri sono:

1. **Fan\_type:** Tipo di ventilatore (1 velocità variabile, 2 velocità singola, 3 due velocità);
2. **Pnom:** Potenza nominale della ventola [W];
3. **Qnom:** Portata nominale [Kg/s];
4. **Qlow:** Portata minima di progetto [Kg/s];
5. **Qhigh:** Portata massima di progetto [Kg/s];
6. **a:** aliquota di potenza elettrica trasformata in potenza termica.

I parametri del ventilatore sono stati inseriti nel file generale.m, contenente tutti i parametri dei vari componenti della libreria HVCA.

La tabella seguente mostra le relazioni utilizzate per il calcolo della Portata e della Potenza elettrica fornita in uscita:

F.type	com	Portata	Potenza
	0	0	0
1	1	Qhigh	$\frac{Q_{in}}{Q_{nom}} \geq 0,4 \quad P_{fan} = [2,0556 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right)^2 - 1,6278 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right) + 0,5722] \cdot P_{nom}$

**DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”**

			$\frac{Q_{in}}{Q_{nom}} < 0,4$	$P_{fan} = 0,298$
2	0	0	0	
	1	Qlow	$\frac{Q_{in}}{Q_{nom}} \geq 0,2$	$P_{fan} = [0,875 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right)^2 - 0,425 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right) + 0,55] \cdot P_{nom}$
			$\frac{Q_{in}}{Q_{nom}} < 0,2$	$P_{fan} = 0,5$
3	0	0	0	
	1	Qlow	$\frac{Q_{in}}{Q_{nom}} \geq 0,18$	$Q_{in} \geq 0,75$ $P_{fan} = [0,875 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right)^2 - 0,425 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right) + 0,55] \cdot P_{nom}$
			$\frac{Q_{in}}{Q_{nom}} < 0,18$	$Q_{in} < 0,75$ $P_{fan} = [0,5 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right)^2 - 0,1 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right) + 0,258] \cdot P_{nom}$
			$\frac{Q_{in}}{Q_{nom}} < 0,18$	$P_{fan} = 0,298$
	2	Qhigh	$\frac{Q_{in}}{Q_{nom}} \geq 0,18$	$Q_{in} \geq 0,75$ $P_{fan} = [0,875 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right)^2 - 0,425 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right) + 0,55] \cdot P_{nom}$
			$\frac{Q_{in}}{Q_{nom}} < 0,18$	$Q_{in} < 0,75$ $P_{fan} = [0,5 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right)^2 - 0,1 \cdot \left(\frac{Q_{in}}{Q_{nom}}\right) + 0,258] \cdot P_{nom}$
			$\frac{Q_{in}}{Q_{nom}} < 0,18$	$P_{fan} = 0,298$

La potenza e la portata nominale, fornite dal costruttore vengono utilizzate per determinare il consumo elettrico del ventilatore relativamente a portate differenti.

Questo blocco calcola la portata, la potenza di uscita in base al parametro Fan\_type e all'ingresso di comando e con l'ulteriore modifica introdotta anche la temperatura in uscita, mentre non effettua nessun calcolo sulle altre componenti del vettore di ingresso.

L'analogo blocco di Trnsys è il **Type 111**, il quale è caratterizzato da una velocità compresa tra 0 e quella nominale. Dal segnale di controllo dipendono linearmente la portata di aria e secondo un'espressione polinomiale la potenza assorbita dalla ventola.

Gli ingressi del Type 111 sono:

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

1. Inlet air temperature;
2. Inlet air humidity ratio;
3. Not used (RH);
4. Air flow rate;
5. Inlet air pressure;
6. Control signal;
7. Air-side pressure increase.

Le uscite sono:

1. Outlet air temperature;
2. Outlet humidity ratio;
3. Outlet air %RH;
4. Outlet flow rate;
5. Outlet air pressure;
6. Power consumption;
7. Air heat transfer;
8. Ambient heat transfer.

I parametri che devono essere impostati in questo blocco sono:

1. Humidity mode;
2. Rated flow rate;
3. Rated power;
4. Motor efficiency;
5. Motor heat loss fraction;
6. Number of power coefficients;
7. Power coefficient-1;
8. Power coefficient-2.

Come con la maggior parte delle pompe e ventilatori in TRNSYS, il Type111 prende in ingresso la portata, ma in realtà considera questo valore solo al fine di eseguire i controlli di bilancio di massa.

La portata è fissata sulla base della sua portata nominale e del segnale di controllo, dato in ingresso.

### 4.1.2 SCAMBIATORE DI CALORE ROTATIVO

Per simulare lo scambiatore rotativo non è stato possibile utilizzare il blocco Flat Plate Recovery della libreria Distribution Elements di Simbad, perché al suo interno richiamava una S-function inesistente.

Pertanto è stato implementato facendo riferimento al type 760 di Trnsys, come descritto di seguito. Come primo passo si calcola il coefficiente di calore da utilizzare per il calcolo del calore sensibile scambiato tra i due flussi (aria fresca ed aria esausta):

$$C_{\min} = \text{MIN} \cdot (\dot{m}_{\text{exh}} C_{p_{\text{exh}}}, \dot{m}_{\text{fresh}} C_{p_{\text{fresh}}})$$

$$\dot{Q}_{\text{sens}} = \eta_{\text{sens}} C_{\min} (T_{\text{exh},\text{in}} - T_{\text{fresh},\text{in}})$$

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

dove  $\dot{m}_{exh}$ ,  $Cp_{exh}$  sono la portata e il calore specifico del fluido entrante nello scambiatore che nel caso specifico è l'aria di rigenerazione, mentre  $\dot{m}_{fresh}$ ,  $Cp_{fresh}$  sono la portata ed il calore specifico del secondo fluido coinvolto nello scambio, ovvero l'aria fresca di processo. Noto il calore sensibile scambiato dai due fluidi e l'efficienza, impostata come parametro, è possibile calcolare la temperatura dei due fluidi in uscita.

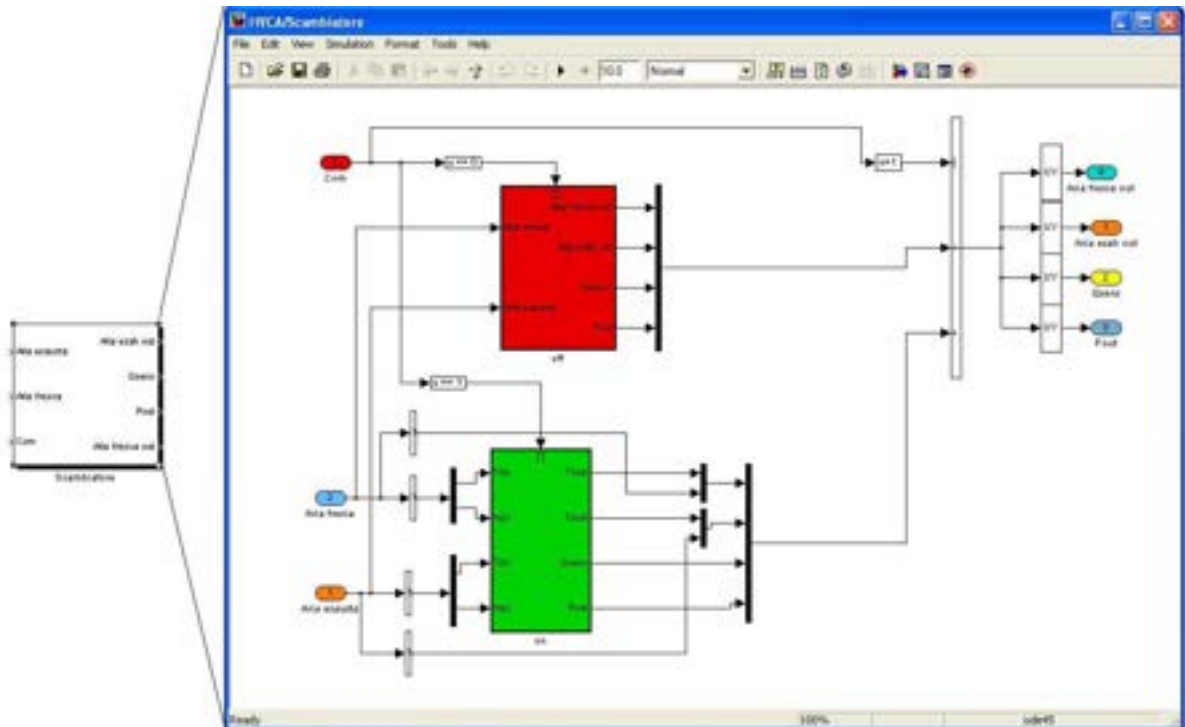


Figura 11: Struttura del blocco Scambiatore di calore

Gli ingressi di questo blocco sono:

1. **Aria fresca:** Vettore di ingresso aria fresca (Temperatura [°C], umidità assoluta [Kg/Kg aria secca], pressione [Pa], Portata [Kg/s]);
2. **Aria esausta:** Vettore normalizzato di ingresso aria estratta (Temperatura [°C], umidità assoluta [Kg/Kg aria secca], pressione [Pa], Portata [Kg/s]);
3. **Com:** Ingresso di comando On/Off.

Di seguito sono elencate le uscite:

1. **Aria fresca out:** Vettore normalizzato di aria fresca in uscita (Temperatura [°C], umidità assoluta [Kg/Kg aria secca], pressione [Pa], Portata [Kg/s]);
2. **Aria esausta out:** Vettore normalizzato di aria fresca in uscita (Temperatura [°C], umidità assoluta [Kg/Kg aria secca], pressione [Pa], Portata [Kg/s]);
3. **Qsens:** Calore sensibile scambiato [KJ];
4. **Pout:** Potenza consumata [W]

I parametri da settare sono:

1. **Cp1:** Calore specifico aria fresca;
2. **Cp2:** Calore specifico fluido esausto;
3. **Pnom:** Potenza nominale [W];
4. **Eff:** Efficienza (in termini di temperatura) dello scambiatore (valori compresi tra zero e uno).

## **DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”**

In Trnsys per simulare lo scambiatore rotativo si utilizza il Type 760, ovvero uno scambiatore di calore che interessa due flussi di aria, i quali si scambiano calore senza trasferimento di massa. Questo blocco presenta cinque possibili modalità di controllo, nella prima la temperatura di uscita dei due fluidi non viene controllata, nelle altre modalità di controllo la temperatura di uscita, sia dell'aria esausta che dell'aria fresca, viene impostata ad un valore di set-point. Inoltre è caratterizzato da un'efficienza costante che può essere impostata dall'utente sia nel modello a flussi incrociati, che in quello a flussi in controcorrente o a flussi paralleli.

Gli ingressi del Type 760 sono:

1. Exhaust air temperature;
2. Exhaust air humidity ratio;
3. Not used (RH);
4. Exhaust air flow rate;
5. Exhaust air pressure;
6. Exhaust air pressure drop;
7. Fresh air temperature;
8. Fresh air humidity ratio;
9. Not used (RH);
10. Fresh air flow rate;
11. Fresh air pressure;
12. Fresh air pressure drop;
13. Sensible effectiveness;
14. On/Off Control Signal;
15. Control temperature.

Le uscite di questo blocco sono:

1. Exhaust air temperature;
2. Exhaust air humidity ratio;
3. Exhaust air %RH;
4. Exhaust air flow rate;
5. Exhaust air pressure;
6. Fresh air temperature;
7. Fresh air humidity ratio;
8. Fresh air %RH;
9. Fresh air flow rate;
10. Fresh air pressure;
11. Heat transfer rate;
12. Power;
13. Condensate temperature – exhaust stream;
14. Condensate flow rate –exhaust stream;
15. Condensate temperature – fresh air stream;
16. Condensate flow rate – fresh air stream.

I parametri del Type760 sono:

1. Humidity mode;
2. Rated power;
3. Control mode.

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

Nell’esperienza pratica si verifica un trafilamento d’aria tra i due flussi che influenza la reale efficienza del dispositivo. Si indagheranno in futuro eventuali algoritmi per tener conto del fenomeno.

### 4.1.3 BATTERIE AUSILIARIE DI RAFFREDDAMENTO E RISCALDAMENTO.

Per simulare le batterie fredde e calde si utilizzano rispettivamente i modelli statici Simple Static Cooling Coil e Simple Static Heating Coil presenti nella libreria Coils di Simbad. Questi blocchi fanno riferimento al modello, descritto su IEA Annex 17 model e ai modelli HVAC 2 Toolkit (CCSIM e CCDET) dell’ASHARE.

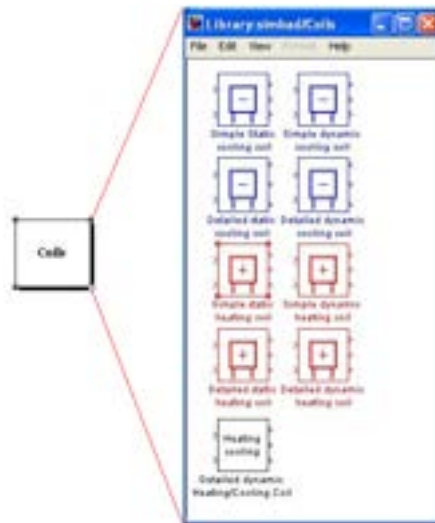


Figura 12: Blocchi presenti nella libreria Coil

La struttura della batteria calda differisce da quella fredda essenzialmente nel calcolo di coefficienti di trasferimento di calore, che vengono calcolati in entrambi i casi tramite delle S-function.

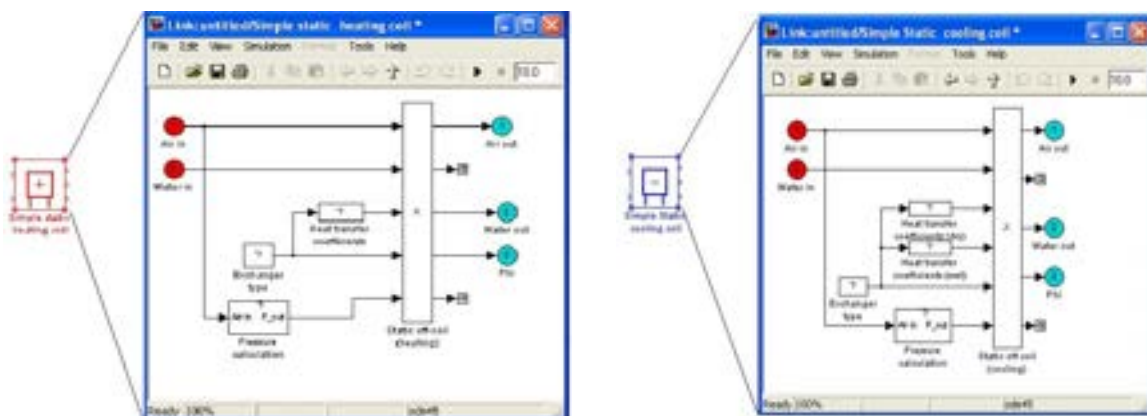


Figura 13 Blocco Simbad batteria calda e batteria fredda

Anche questi blocchi sono stati modificati inserendo l’ingresso di comando On/Off.

Gli ingressi per la batteria sono:

Vettore di input relativo all’aria in ingresso **Aria in**:

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

1. TAI: Temperatura di bulbo secco aria in ingresso [°C];
2. GI: Umidità assoluta aria in ingresso [Kg/Kg];
3. PIN: Pressione aria in ingresso [Pa];
4. MA: Portata aria secca [Kg/s];

### Vettore di input relativo all’acqua in ingresso **Acqua in:**

1. TWI: Temperatura dell’acqua in ingresso [°C];
2. MW: Portata dell’acqua in ingresso [Kg/s];

Le uscite sono:

### Vettore relativo all’aria in uscita dalla batteria **Aria out:**

1. TAO: Temperatura di bulbo secco dell’aria in uscita [°C];
2. GO: Umidità assoluta dell’aria in uscita [Kg/Kg];
3. PO: Pressione aria in uscita [Pa];
4. MA: Portata aria secca [Kg/s];

### Vettore relativo all’acqua in uscita dalla batteria **Acqua out:**

1. TWO: Temperatura dell’acqua in uscita [°C];
2. MW: Portata dell’acqua in uscita [Kg/s];

### Vettore relativo al calore trasferito:

1. QTOTAL: Calore totale trasferito [KW];
2. QSENSI: Calore sensibile trasferito [KW];
3. EFFECT: Efficienza dello scambiatore;

Parametri da settare sono:

1. Tipo di scambiatore (0=Crossflow, 1=Counterflow);
2. Coefficiente di resistenza del flusso;

Inoltre le batterie sono state ulteriormente modificate in modo da consentire all’utente di impostare un riferimento di temperatura per l’aria in uscita. Il raggiungimento del set point di temperatura viene fatto attraverso una valvola che fa variare la portata d’acqua, la regolazione dell’apertura della valvola è affidata ad un regolatore PID.

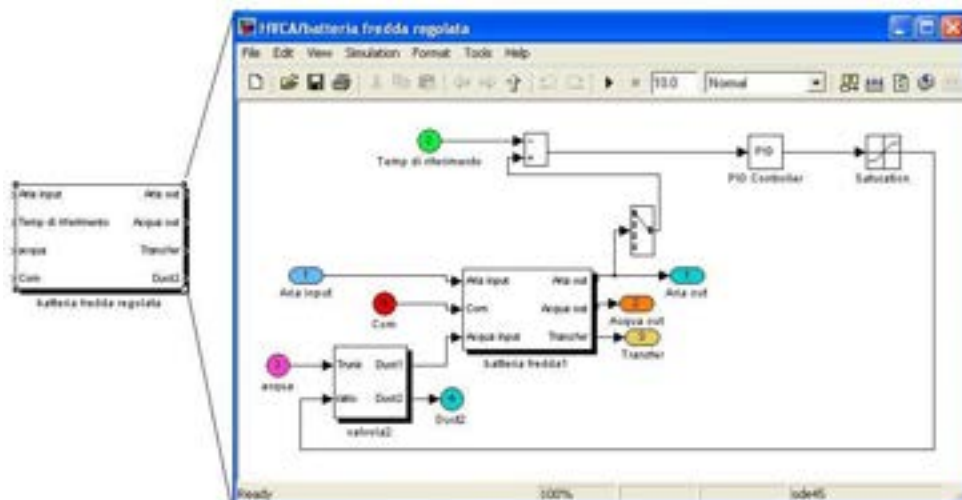


Figura 14: Blocco Simbad batteria con regolatore PID

## **DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”**

In Trnsys per simulare le batterie si utilizza il Type 670, il quale simula un sistema di riscaldamento con un by-pass controllato internamente che mantiene la temperatura dell'aria di uscita al di sopra della temperatura dell'aria di ingresso e al di sotto di un determinato set point di temperatura, fissato dall'utente.

Gli ingressi del Type sono:

1. Fluid inlet temperature;
2. Fluid flow rate ;
3. Air inlet temperature;
4. Air inlet humidity ratio;
5. Air inlet relative humidity;
6. Air inlet flow rate;
7. Air inlet pressure ;
8. Effectiveness of heat exanger;
9. Air-side pressure drop;
10. Air set point temperature;

Le uscite sono:

1. Outlet fluid temperature;
2. Outlet fluid flow rate;
3. Outlet air temperature;
4. Outlet air humidity ratio;
5. Outlet air %RH;
6. Outlet air flow rate;
7. Outlet air pressure;
8. Bypass fraction for liquid-side;
9. Heat transfer rate;
10. Bypass fluid temperature;
11. Bypass fluid flow rate;
12. Coil outlet fluid temperature;
13. Coil outlet flow rate.

I parametri da settare sono:

1. Humidity mode;
2. Liquid specific heat.

Entrambi i modelli tengono conto di eventuale deumidificazione dell'aria nel caso di raffreddamento al di sotto della temperatura di rugiada.

### *4.1.4 VALVOLE DIVERGENTI E CONVERGENTI*

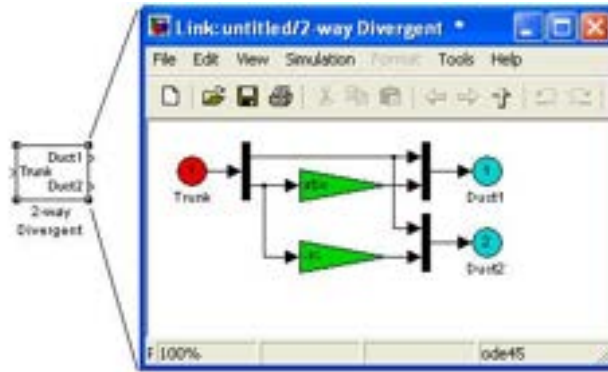
I blocchi che permettono di simulare delle valvole divergenti e convergenti, sono 2-way-divergent e Convergent della Libreria Distribution Element di Simbad. Nel primo caso un flusso d'aria viene suddiviso in due condotti differenti secondo un rapporto specifico, mentre nel caso di valvole convergenti due flussi d'aria provenienti da due condotti a portata differente vengono riuniti all'interno di uno stesso condotto.

La valvola divergente ha come ingresso un vettore (Temperatura [°C], Portata [Kg/s]) relativo alle condizioni dell'aria in ingresso e come uscita un vettore (Temperatura [°C], Portata [Kg/s])

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

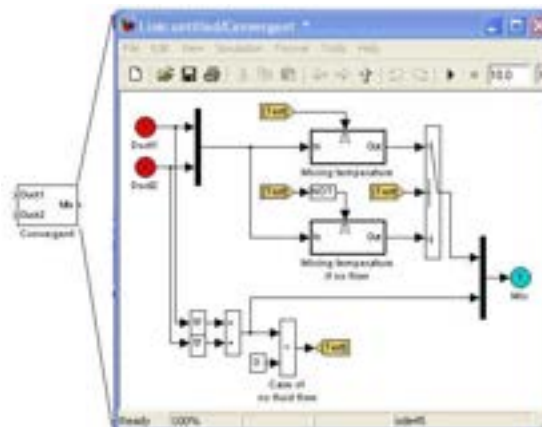
per ciascun flusso. L'unico parametro da impostare è il rapporto di flusso d'aria dei condotti di uscita, il quale assume un valore tra 0 e 1.

Dall'analisi della struttura di questo blocco, si è notato che il calcolo della temperatura di uscita non è fatta secondo il bilancio di entalpia ma come un semplice bilancio di massa.



**Figura 15: Blocco Simbad valvola divergente**

Le valvole convergenti prevedono come ingresso un vettore (Temperatura [°C], Portata [Kg/s]) relativo all'aria in ingresso per ciascun condotto e un vettore di uscita (Temperatura [°C], Portata [Kg/s]) per il flusso ottenuto dalla miscela dei due in ingresso. Anche se questo blocco ha una struttura più complessa, come si può notare dalla figura seguente, il calcolo della temperatura in uscita non è effettuato sulla base di un bilancio entalpico. Pertanto per utilizzare queste valvole per il bypass è necessario introdurre il calcolo dell'entalpia dei flussi in ingresso e in uscita, il bilancio e quindi la determinazione della temperatura in uscita.



**Figura 16: Blocco Simbad valvola convergente**

### 4.1.5 UMIDIFICATORE

Il modello di umidificatore è stato realizzato considerando un processo di umidificazione ideale con una trasformazione isoentalpica che a partire da un punto iniziale sul diagramma psicrometrico porta ad un altro punto sulla curva di saturazione.

Per realizzare questo componente sono stati utilizzati alcuni blocchi della libreria psicrometrica di Simbad, più precisamente il blocco per il calcolo dell'entalpia per data

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

temperatura di bulbo secco e umidità assoluta, il blocco per il calcolo della pressione di saturazione per una data temperatura e il blocco per il calcolo della umidità assoluta note la temperatura e la pressione.

Le relazioni alle quale si fa riferimento per determinare la temperatura e l’umidità assoluta di uscita sono riportate di seguito:

- $h = 1.006t + W(2501 + 1.805t)$  (Rif. Equ. 32 del capitolo 6 ASHARE);
- $W_s = 0.62198 \frac{P_{ws}}{p - p_{ws}}$  (Rif. Equ. 23 del capitolo 6 ASHARE);

Dove con  $h$  si indica l’entalpia, con  $W$  l’umidità assoluta,  $W_s$  l’umidità assoluta di saturazione con  $t$  la temperatura di bulbo secco, con  $p$  la pressione totale, con  $p_{ws}$  la pressione di saturazione.

Inoltre per tenere conto del fatto che l’umidificazione non è un processo ideale che porta alla saturazione ma il processo si arresta un pò prima, si introduce, in maniera analoga a quanto presente nel Type di Trnsys, un’ efficienza che l’utente può impostare dall’esterno come parametro. Tale efficienza è definita come:

$$\eta = \frac{W_{out} - W_{in}}{W_s - W_{in}}$$

Gli ingressi di questo blocco sono:

**Aria input:** Vettore relativo all’aria in ingresso all’umidificatore avente le seguenti componenti:

- Temperatura [°C];
- Umidità assoluta [Kg/Kg];
- Pressione totale [atm];
- Portata.

In uscita si ha il vettore **Aria out** :

- Temperatura [°C];
- Umidità assoluta [Kg/Kg];
- Pressione totale [atm];
- Portata.

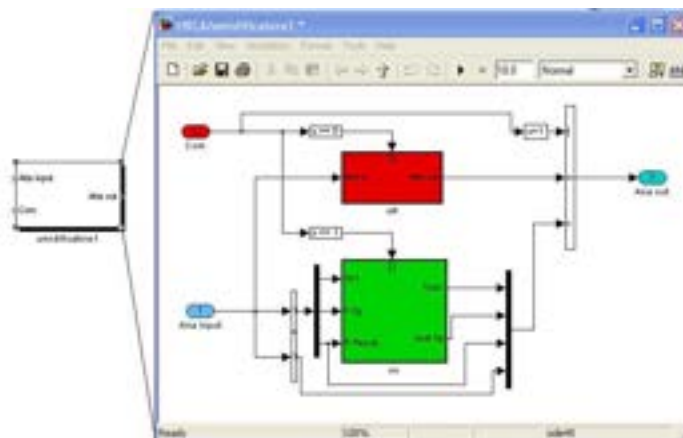


Figura 17: Blocco umidificatore

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

In Trnsys il blocco utilizzato per simulare l’umidificatore è il Type 506, il quale modella un dispositivo di raffreddamento evaporativo diretto, al quale l’utente fornisce come input le condizioni dell’aria di processo e l’efficienza di saturazione e come output le condizioni dell’aria umidificata.

Gli ingressi di questo blocco sono:

1. Inlet air temperature;
2. Inlet air Humidity ratio;
3. Not used;
4. Inlet air flow rate;
5. Inlet air pressure;
6. Air-side pressure drop;
7. On/Off control signal;
8. Saturation efficiency.

Le uscite sono:

1. Outlet air temperature;
2. Outlet humidity ratio;
3. Outlet air %RH;
4. Outlet air flow rate;
5. Outlet air pressure;
6. Power consumption;
7. Air heat transfer.

I parametri sono:

1. Humidity mode;
2. Parasitic Power.

In questa fase sono state fatte delle prove di confronto tra il blocco umidificatore implementato in Simulink e il Type 506 (nel caso di ingressi con significato fisico). Si è notata una leggera differenza tra le uscite dei modelli di simulazione. Tale differenza è dovuta ai metodi di risoluzione utilizzati rispettivamente nel modello Simulink e in quello Trnsys.

In entrambi i modelli l’entalpia dell’acqua è trascurata.

Il modello per l’umidificatore posto sulla mandata si basa sulle precedenti relazioni descritte nel modello di umidificatore descritto nel paragrafo precedente e relativo al flusso d’aria di ripresa. La differenza sostanziale è che questo nuovo modello presenta un ulteriore ingresso, **Xout set**, ovvero il riferimento di umidità assoluta che si vuole ottenere sull’aria in uscita dall’umidificatore.

Sia il processo di umidificazione che l’efficienza dipendono dalle condizioni di umidità che si vogliono in uscita. L’efficienza di umidificazione definita come segue è riportata in uscita:

$$\eta = \frac{X_{out} - X_{in}}{X_{sat} - X_{in}}$$

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

Dove  $X_{out}$  è l'umidità assoluta dell'aria in uscita,  $X_{in}$  è l'umidità assoluta dell'aria in ingresso e  $X_{sat}$  è l'umidità assoluta in condizioni di saturazione.

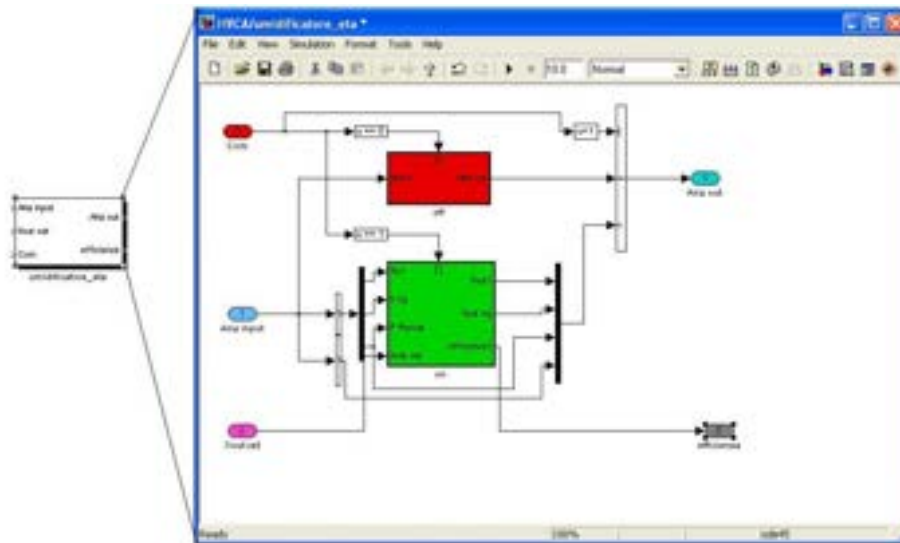


Figura 18: Blocco umidificatore eta

### 4.1.6 RUOTA DEUMIDIFICANTE

Per sviluppare un modello di simulazione per la ruota essiccante, come primo passo sono stati esaminati alcuni modelli empirici presenti in letteratura. Il risultato di questa analisi ci ha portato a prendere in considerazione in particolare due modelli empirici:

- Il modello di Jurinak;
- Il modello sviluppato da Beccali.

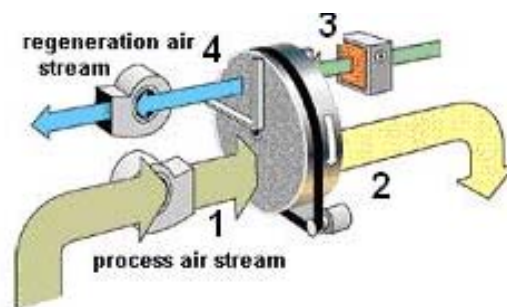


Figura 19: Rotore essiccante

#### 4.1.6.1 MODELLO DI JURINAK

Il modello di Jurinak prevede la definizione di due curve isopotenziali che nel caso di silica gel hanno la seguente espressione:

$$F1 = \frac{-2865}{T^{1.490}} + 4.344\omega^{0.8624}$$

$$F2 = \frac{T^{1.490}}{6360} - 1.127\omega^{0.07969}$$

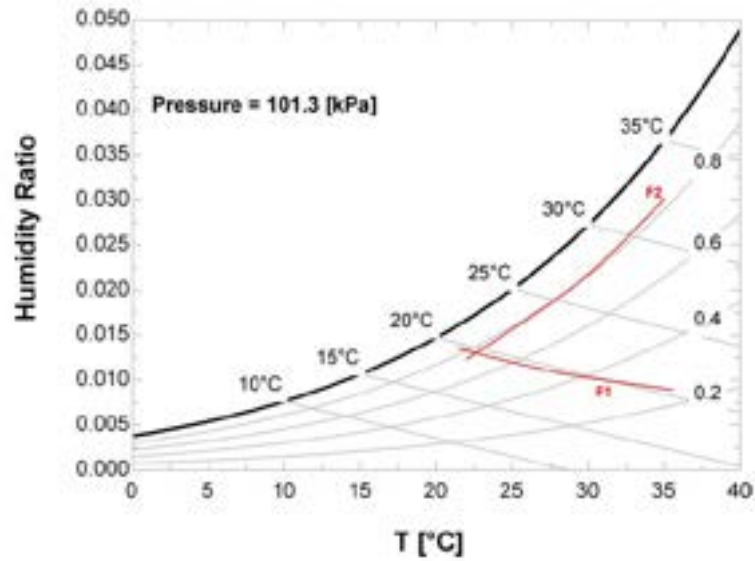


Figura 20: Andamento delle funzioni isotenziale

Usando le curve isotenziali il processo di deumidificazione è descritto nella figura seguente.

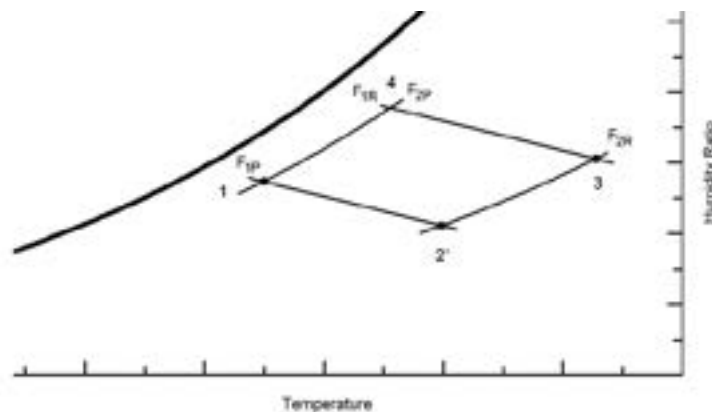


Figura 21: Andamento delle funzioni isotenziale in un processo di deumidificazione

Per ogni punto in ingresso e in uscita della ruota deumidificante, sia lato processo che rigenerazione, è possibile valutare il valore assunto dalle curve isotenziali:

- F11 e F21 → Per il punto 1, ovvero aria di processo in ingresso alla ruota.
- F12 e F22 → Per il punto 2, ovvero aria di processo in uscita dalla ruota.
- F13 e F23 → Per il punto 3, ovvero aria di rigenerazione in ingresso alla ruota.
- F14 e F24 → Per il punto 4, ovvero aria di rigenerazione in uscita dalla ruota.

Come mostra la figura precedente si avrà che:

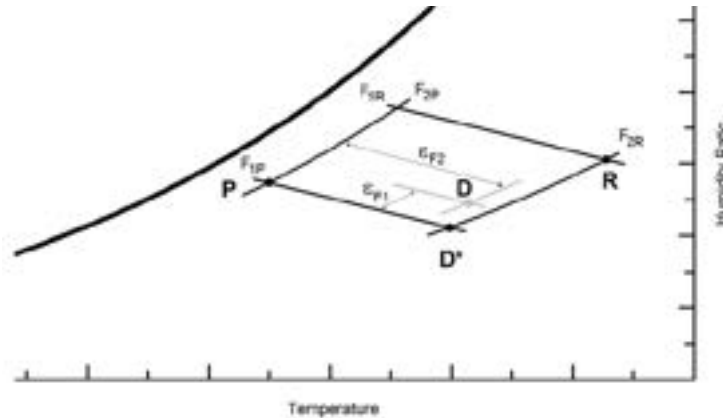
- F11=F12
- F22=F23

Il modello di Jurinak prevede anche due efficienze definite come segue, le quali tengono conto dei fattori costruttivi e della non idealità del processo:

**DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”**

$$\varepsilon_{F1} = \frac{F12 - F11}{F13 - F11}$$

$$\varepsilon_{F2} = \frac{F22 - F21}{F23 - F21}$$



**Figura 22: Correzione delle curve isopotenziale in base alle efficienze**

Sul modello di Jurinak si basa il TYPE 683 di Trnsys. Questo Type non risulta però indicato per la simulazione in quanto la temperatura di rigenerazione è calcolata come output e non richiesta invece come input. Più precisamente, come primo passo si calcola la funzione  $F11 = f(T_1, \omega_1)$  per il punto 1 e imponendo un set point di umidità assoluta per l'aria di processo in uscita dalla ruota, dato che  $F11 = F12$ , si determina la temperatura T2 che si dovrebbe avere per quel dato riferimento di umidità. L'altra condizione da soddisfare  $F22 = F23$ , consente il calcolo, secondo un procedimento iterativo, della temperatura di rigenerazione da fornire per avere l'aria di processo in uscita in quelle condizioni di temperatura e umidità assoluta. I valori ottenuti sono corretti tenendo conto delle efficienze.

Sempre sulla base delle relazioni di Jurinak è stato da noi implementato un modello di ruota, che superasse il limite del Type 683, e quindi consentisse di calcolare la temperatura e l'umidità assoluta dell'aria di processo in uscita dalla ruota a partire dalla conoscenza delle condizioni in ingresso sia lato processo che rigenerazione. Tale modello prevede il calcolo della funzione  $F11 = f(T_1, \omega_1)$  per il punto1 (aria di processo in ingresso) e della funzione  $F23 = f(T_3, \omega_3)$  per il punto3 (aria di rigenerazione in ingresso). A partire dalla conoscenza di queste funzioni vengono calcolate la temperatura e l'umidità assoluta in uscita dalla ruota lato processo, risolvendo il seguente sistema: di due equazioni e due incognite.

$$\begin{cases} \frac{-2865}{T_2^{1.490}} + 4.344\omega_2^{0.8624} = F11 \\ \frac{T_2^{1.490}}{6360} - 1.127\omega_2^{0.07969} = F23 \end{cases}$$

Tenendo conto delle efficienze il sistema diventa:

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

$$\begin{cases} \frac{-2865}{T_2^{1.490}} + 4.344\omega_2^{0.8624} = F11 + \varepsilon_{F1}(F13 - F11) \\ \frac{T_2^{1.490}}{6360} - 1.127\omega_2^{0.07969} = F22 + \varepsilon_{F2}(F23 - F21) \end{cases}$$

Il vantaggio di questo modello è rappresentato dalla presenza delle due efficienze che potrebbero essere impostate come parametri dall'utente, sulla base dei dati nominali forniti dal costruttore e quindi consentire di tener conto, con soli due parametri, delle prestazioni dei diversi tipi di ruota.

A partire da dei dati sperimentali è stato fatto uno studio per verificare l'andamento delle due efficienze, si è notato che non hanno un valore costante al variare degli ingressi. Successivamente è stato implementato in simulink il modello descritto precedentemente, considerando come efficienze il valore medio ottenuto dall'analisi, per quel set di dati sperimentali. Purtroppo le uscite fornite dal modello non sono risultate compatibili con i dati sperimentali utilizzati nella fase di test, pertanto si è preferito, al momento, accantonare questo modello e utilizzare il modello Beccali, il quale offre delle prestazioni migliori.

Il modello descritto in questo paragrafo richiede, uno studio ancora più approfondito per accertarne la validità e per il calcolo delle efficienze. Sicuramente potrebbe essere migliorato introducendo un set-point per l'umidità assoluta dell'aria di processo in uscita dalla ruota. In ogni caso un altro limite di questo modello è che non tiene conto delle portate e non consente di effettuare il by-pass.

### 4.1.6.2 MODELLO BECCALI

Un altro modello esaminato è quello empirico sviluppato da Beccali et al. che si basa sulla correlazioni di dati di prestazione forniti da quattro costruttori di ruote deumidificanti.

Questo modello si basa sul fatto che l'umidità relativa ( $UR$ ) e l'entalpia ( $h$ ) possono essere espresse mediante correlazione lineare come segue:

$$\Delta UR = (UR_{in} - UR_{out}) = m(UR_{in} - UR_{rig}) + q$$

$$\Delta h = (h_{out} - h_{in}) = m'(h_{rig} - h_{in}) + q'$$

dove  $m$ ,  $q$ ,  $m'$ ,  $q'$  sono dei parametri calcolati per tre tipi di ruota essicante, sulla base dei dati sperimentali forniti dal costruttore.

L'entalpia  $h$  è definita come:

$$h = \frac{(2501 + 1.805T)X}{1000} + 1.006T$$

$$UR = (18.6715X + 1.7976)e^{-0.053T}$$

Il modello prevede per il calcolo della temperatura ( $T_{out}$ ) e dell'umidità assoluta ( $X_{out}$ ) dell'aria di processo in uscita dalla ruota, la risoluzione delle seguenti equazioni:

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{out} = \frac{[e^{0.0053T_{out}} (0.9428UR_{rig} + 0.0572UR_{in}) - 1.7976]}{18.671} \\ \frac{(UR e^{0.0053T_{out}} - 1.7976)}{18.671} = \frac{(h_{out} - 1.006T_{out})}{(2501 - 1.805T_{out})} \end{array} \right.$$

L'analisi dei dati sperimentali ha portato alla determinazione dei coefficienti  $m$ ,  $q$ ,  $m'$ ,  $q'$  per tre tipi di ruota; di seguito vengono riportate l'espressione dell'umidità relativa ( $UR_{out}$ ) e dell'entalpia ( $h_{out}$ ) in uscita dalla ruota, necessarie per risolvere il sistema di equazioni precedente.

La formula seguente è valida per tutti i tipi di ruota esaminati:

$$UR_{out} = (0.9428UR_{rig} + 0.0572UR_{in})$$

I coefficienti per il calcolo dell'entalpia in uscita assumono valore diverso in base al tipo di ruota:

- $h_{out} = (0.1312h_{rig} + 0.8688h_{in})$       Tipo I (Silica gel)
- $h_{out} = (0.1861h_{rig} + 0.8139h_{in})$       Tipo II (LiCl)
- $h_{out} = (0.1148h_{rig} + 0.8852h_{in}) - 0.9474$       Tipo III (Silica gel)

Essendo oggi a disposizione una più ampia raccolta di dati, si stanno facendo altre prove per aggiornare il modello e determinare nuovi coefficienti al fine di migliorarne ulteriormente le prestazioni.

Il modello Beccali è stato implementato in linguaggio simulink e sono state fatte delle prove utilizzando sempre i dati sperimentali forniti dal costruttore.

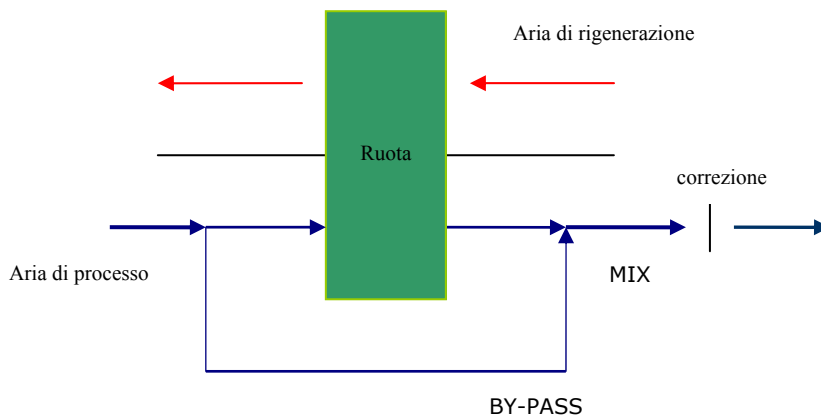


**Figura 23: Modello ruota deumidificante in linguaggio Simulink**

Anche questo blocco presenta una struttura simile agli altri nel senso che prevede in ingresso e in uscita un vettore relativo all'aria di processo e di rigenerazione con quattro componenti (temperatura, umidità assoluta, pressione e portata), in più in uscita fornisce l'entalpia dell'aria di processo deumidificata dalla ruota.

Il modello è stato costruito in maniera tale da consentire di effettuare il by-pass di una parte dell'aria di processo in ingresso alla ruota deumidificante.

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”



**Figura 23: Processo di deumidificazione con by-pass dell'aria di processo.**

In questo caso una parte dell'aria di processo viene bypassata e miscelata con quella deumidificata in uscita dal rotore, secondo un parametro  $\alpha$ .

Il modello deve essere adattato con i seguenti termini di correzione che dipendono da ulteriori coefficienti che variano a seconda del tipo di ruota:

- $$\Delta X_{mix+correction} = \frac{\Delta X_{mix} - (A\alpha + B)}{(C\alpha + D)}$$
- $$\Delta T_{mix+correction} = \frac{\Delta T_{mix} - (E\alpha + F)}{(G\alpha + H)}$$

Se l'utente prevede il funzionamento del rotore con by-pass deve impostare il parametro  $\alpha$ , ovvero il fattore di by-pass, nel file generale.m.

Anche per il modello con il by-pass sono state fatte alcune prove, sulla base dei dati forniti dal costruttore, con risultati molto interessanti.

Attualmente in Trnsys, per la simulazione della ruota essiccante si utilizza il Type 278, ovvero un modello non standard sviluppato al Fraunhofer ISE di Friburgo.

Il modello in esame si basa su dati di catalogo relativi a tre diversi costruttori di ruote essiccanti.

Gli input richiesti dal modello sono:

- La portata dell'aria di processo e di rigenerazione;
- La temperatura dell'aria di processo in ingresso e di rigenerazione;
- L'umidità assoluta dell'aria di processo e di rigenerazione;
- Frazione della portata di rigenerazione by-passata;
- Controllo on-off

I parametri sono la pressione dell'aria e il modello relativo ai tre costruttori considerati.

Gli output restituiti dal modello sono:

## **DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”**

- la portata dell'aria di processo in uscita dalla ruota essiccante
- la temperatura dell'aria di processo in uscita dalla ruota essiccante
- l'umidità assoluta dell'aria di processo in uscita dalla ruota essiccante

Nella modellizzazione del componente non sono considerate invece, la variazione delle prestazioni in funzione della velocità di rotazione e di altre caratteristiche dimensionali quali la taglia e lo spessore della ruota essiccante.

### *4.1.7 REGOLAZIONE E CONTROLLO*

Nel modello di simulazione creato è stata introdotta una logica di regolazione e controllo che prevede sei modi di funzionamento per le diverse condizioni di carico sulla base dei quali vengono attivati o disattivati gli elementi che compongono il sistema. La logica di regolazione adottata per le diverse configurazioni è unica fatta eccezione per le variabili di controllo prese come riferimento per la commutazione da un modo di funzionamento all'altro. In particolare per i sistemi a tutt'aria, le variabili sulla base delle quali viene effettuata la commutazione da una modalità di funzionamento ad un'altra, sono la temperatura e l'umidità relativa dell'aria di ritorno dall'edificio. Per i sistemi ad aria primaria le variabili monitorate e sulla base delle quali il sistema commuta da una modalità ad un'altra sono l'umidità assoluta e la temperatura dell'aria di immissione.

In funzionamento estivo, il sistema parte in modalità ventilazione  $MODE=0$  (*ventilazione*), nella quale non è realizzato alcun trattamento attivo o passivo dell'aria; se le condizioni di temperatura e umidità desiderate non sono raggiunte il sistema commuta in  $MODE=1$  (*raffreddamento evaporativo indiretto*). Se le prestazioni del sistema in termini di temperatura e umidità raggiunte non sono ancora sufficienti, allora il sistema commuta nella modalità successiva  $MODE=2$  (*desiccant cooling*) nel quale viene realizzato il ciclo di trattamento dell'aria desiccant cooling. Se, a causa dell'aumento del carico interno o dell'aggravarsi delle condizioni dell'aria esterna, il sistema non è più in grado di garantire le condizioni di progetto all'interno del locale, allora esso commuta in  $MODE=3$  (*raffreddamento con batterie ausiliarie*) dove, al ciclo di trattamento desiccant cooling si aggiungono le due batterie di raffreddamento ausiliarie. Di seguito si riporta la logica di commutazione del modo di funzionamento, per il caso di sistemi DEC con funzionamento ad aria primaria.

In funzionamento invernale, il sistema dal  $MODE=0$  commuta verso  $MODE=-1$  attuando un recupero termico dal flusso d'aria di estrazione; se le condizioni lo richiedono, ovvero se la potenza termica richiesta all'UTA è maggiore il sistema commuta in  $MODE=-2$  in cui viene attivata la batteria di riscaldamento.

La regolazione della potenza frigorifera di ognuna delle batterie è poi attuata per mezzo di un regolatore PID agendo sulla portata di acqua refrigerata all'interno di esse al fine di mantenere la temperatura o l'umidità assoluta più vicino possibile al valore di set-point.

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

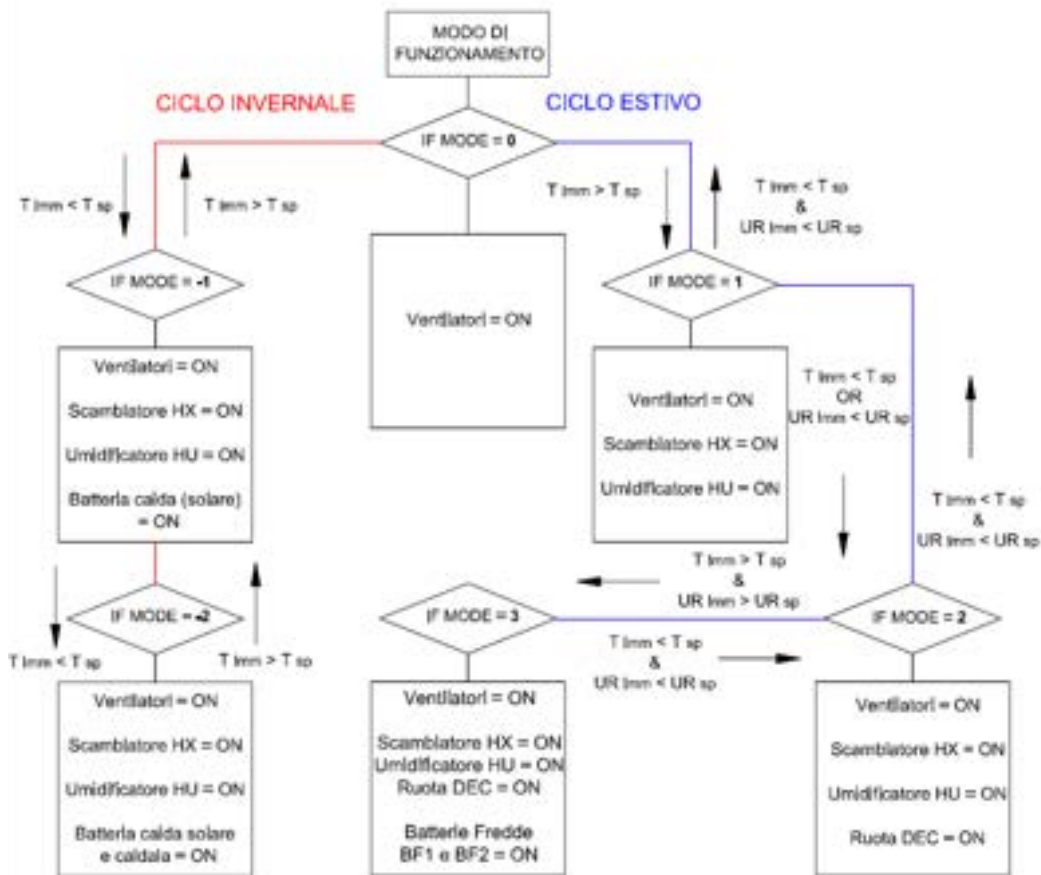


Figura 24: Modi di funzionamento per le configurazioni DEC considerate (sistemi ad aria primaria)

### 4.2 ARCHITETTURA DEL MODELLO DI SIMULAZIONE SIMULINK ED INTEGRAZIONE CON LA PIATTAFORMA INTEGRATA ENEA

I parametri dei singoli componenti che costituiscono il modello dovranno essere scritti sottoforma letterale per essere inizializzati all'avvio della simulazione, da uno specifico file scritto dal Preprocessore di ODESSE in funzione delle scelte dimensionali effettuate dall'utente utilizzando l'interfaccia di progetto.

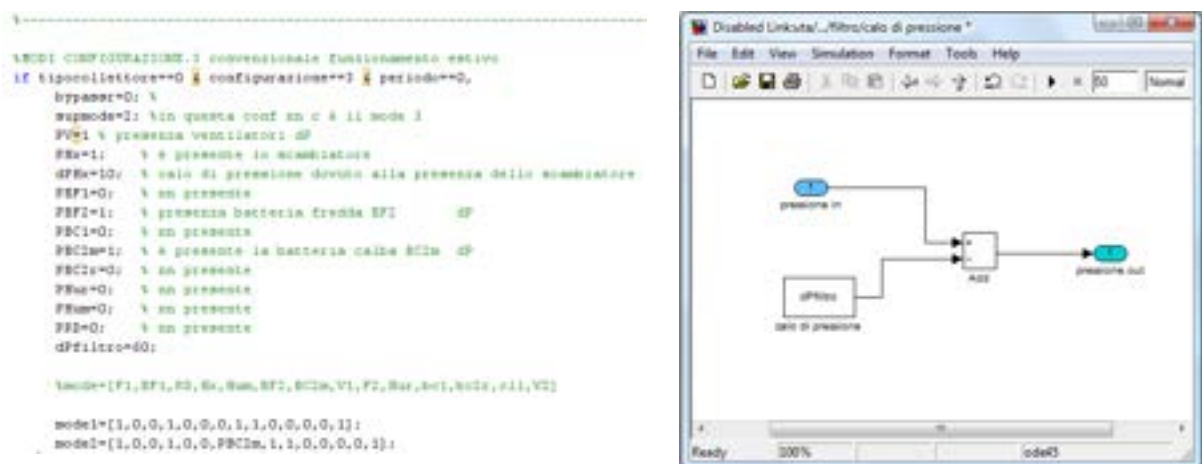
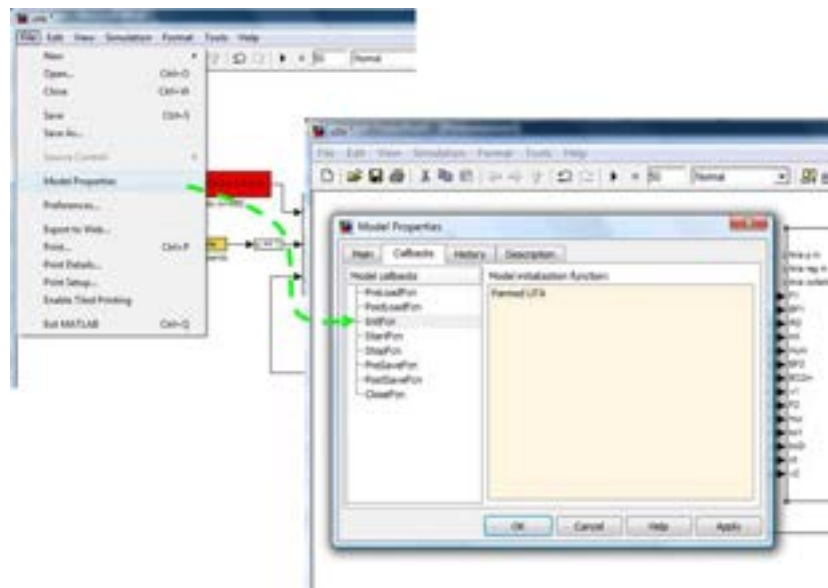


Figura 25: Esempio di Inizializzazione dei parametri

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

Tutti i parametri di ciascun componente vengono inizializzati da un unico file dei parametri scritto dal pre processore di ODESSE, in funzione delle configurazioni d’impianto e i dati nominali scelti dall’utente nell’apposita interfaccia.

Per inizializzare i parametri presenti all’interno del sistema con un unico file è necessario definirne il nome, selezionando dal menù “Model Properties” la voce Callbacks e quindi il comando IntFcn con il quale è possibile indicare da quale file .m (es. Parmod UTA) Simulink può leggere i valori dei parametri utilizzati all’interno di ciascun modello.



**Figura 26: Gestione estate – inverno**

La ruota deumidificante ha un diverso set point di riferimento per temperatura e umidità in immissione relativamente al funzionamento invernale e al funzionamento estivo. Al fine di integrare il sistema solar desiccant cooling sviluppato con la piattaforma integrata ODESSE è necessario passare dal funzionamento estivo al funzionamento invernale automaticamente, inserendo all’interno del sistema un modulo che sia in grado di calcolare sia l’ora del giorno sia il giorno dell’anno. Il primo valore consente di spegnere il deumidificatore in alcune ore del giorno (grazie anche ad uno schedule impostato dall’utente da interfaccia), il secondo valore invece consente la gestione inverno – estate.

Il blocco “clock” di Simulink fornisce il time della simulazione in secondi.

Come meglio si evince dalla seguente figura mostrante lo schema a blocchi implementato in simulink, il giorno dell’anno viene determinato dividendo il tempo di simulazione per 86400 (secondi di un giorno) e prendendo l’intero minore più vicino.

L’ora del giorno si ricava dividendo il giorno dell’anno per 3600 (i secondi di un ora).

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

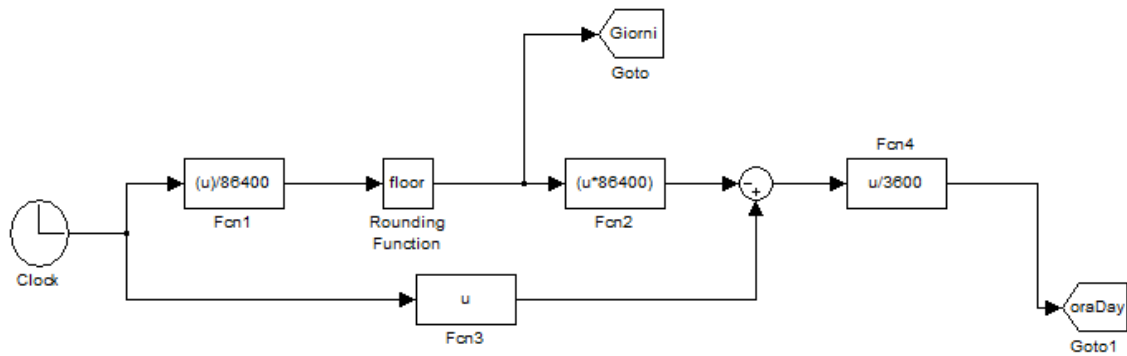


Figura 27: Blocco clock

Il settaggio dei parametri per il funzionamento estivo ed invernale può essere effettuato in automatico utilizzando una “embedded function” di Simulink, all’interno del quale può essere scritto l’algoritmo per il riconoscimento del periodo invernale ed estivo.

Il giorno di inizio riscaldamento (Ginv) e la durata del periodo di riscaldamento (Endinv) sono forniti da ODESSE secondo quanto indicato dal DPR 412/92 in funzione della zona climatica.

Se il giorno di simulazione è superiore a Ginv e inferiore a Endinv i parametri di riferimento per il funzionamento del sistema desiccant cooling sono quelli invernali, altrimenti vengono caricati i valori relativi al periodo estivo. Nella seguente figura è riportata l’embedded function con l’algoritmo estate-inverno.

```
Embedded MATLAB Editor - Block: uta/Invmo Estate*
File Edit Text Debug Tools Window Help
function [y,y1,y2,y3,y4,y5,y6]=fcn(giorno, Ginv, Dinv)
1
2
3 - if giorno>=Ginv & giorno<=Dinv
4 -     periodo=1 % periodo invernale
5 -     infmode=0;
6 -     supmode=-2;
7 -     Tr=25 %temperatura di riferimento immissione in inverno
8 -     Xr=0.013 %umidità assoluta di riferimento immissione in inverno
9 -     dT=1 %scaglia di temperatura
10 -    dX=0.0011 %scaglia di umidità assoluta
11 - else
12 -     periodo=0 % periodo estivo
13 -     infmode=0; %limite inferiore del mode in tale periodo
14 -     supmode=3; %limite superiore del mode in tale periodo
15 -     Tr=22; %temperatura di riferimento per l'aria imnessa
16 -     Xr=0.013; %umidità assoluta di riferimento immissione
17 -     dT=1; %scaglia di temperatura
18 -     dX=0.0011 %scaglia di umidità assoluta
19 - end
20
21 - y=periodo;
22 - y1=infmode;
23 - y2=supmode;
24 - y3=Tr;
25 - y4=Xr;
26 - y5=dT;
27 - y6=dX;
```

Figura 28: Embedded function con l’algoritmo estate-inverno

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

Di seguito si descrive come sono state implementate in Simulink tutte le configurazioni elencate nella prima parte del documento, su un unico file .mdl, e quali sono i parametri che l'utente deve impostare per selezionare la configurazione prescelta.

E' stato creato uno schema simulink con tutti i componenti collegati; quando l'utente seleziona la configurazione si attivano solo gli elementi effettivamente presenti nella configurazione. Quindi da programma si è fatto in modo che i componenti non presenti non determinino nessuna caduta di pressione.

Scelta la configurazione e impostato l'intervallo di tempo di controllo delle condizioni di immissione, il controllore determina la modalità di funzionamento (MODE) e quindi l'accensione o lo spegnimento dei componenti.

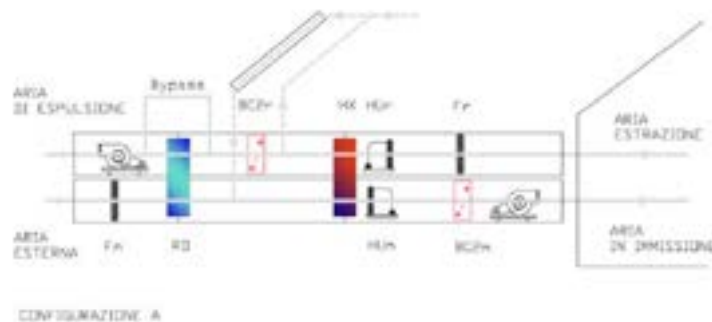
Inoltre viene data la possibilità all'utente di bypassare l'aria di rigenerazione in ingresso al rotore deumidificante, attraverso un parametro *bypassr*.

Si è scelto di consentire all'utente di spegnere l'unità di trattamento aria, per far ciò si dovrà porre a 1 il parametro *offgenerale*, presente nel file generale.m. E' stato introdotto questo parametro nel caso in cui si voglia spegnere l'impianto per un periodo di tempo senza bloccare la simulazione.

Quando il modello sarà integrato in O.DES.S.E, l'utente potrà così selezionare tutte le possibili opzioni di funzionamento direttamente sulla piattaforma principale. Settare il parametro *periodo* a 0 o 1 vorrà dire ad es. scegliere rispettivamente la modalità di funzionamento estivo o invernale.

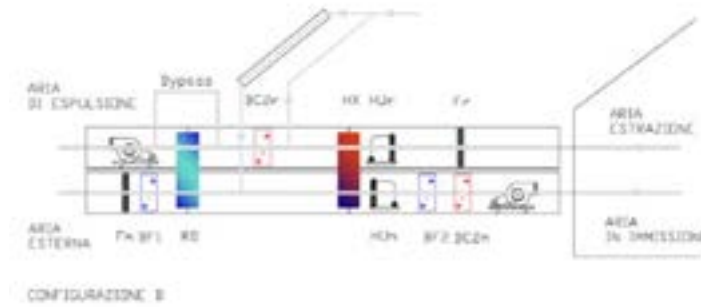
Il parametro che consente all'utente di selezionare la configurazione è *configurazione*, il quale può assumere i seguenti valori:

A → Configurazione DEC standard, con possibilità di inserire la batteria calda di mandata BC2m e selezionare il tipo di collettore (aria o acqua);

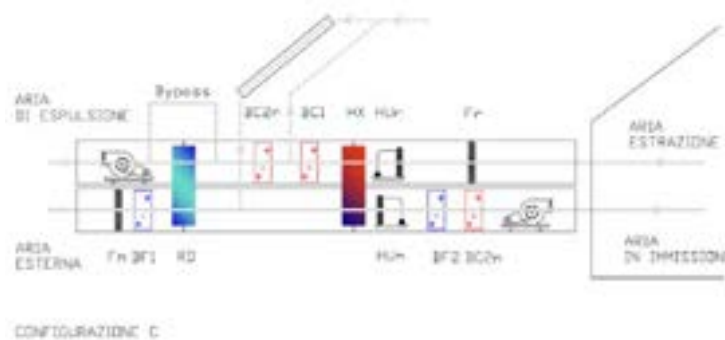


B → Configurazione DEC con batterie ausiliarie di raffreddamento, con possibilità di inserire la batteria calda di mandata, BC2m e selezionare il tipo di collettore (aria o acqua);

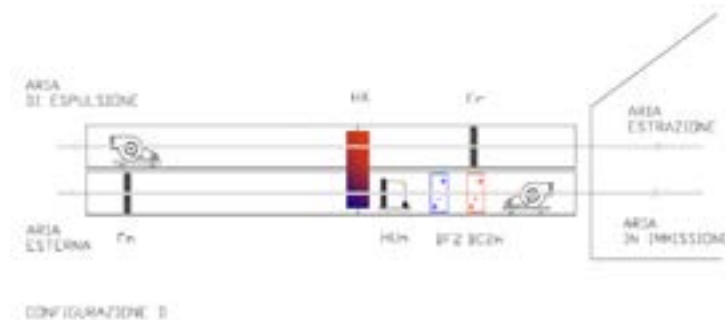
## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”



C → Configurazione con batterie ausiliarie di raffreddamento e recupero del calore di condensazione della macchina frigorifera (ove presente) per il processo di rigenerazione, con possibilità di inserire la batteria calda di mandata, BC2m e selezionare il tipo di collettore (aria o acqua);



D → Configurazione convenzionale di riferimento



**Tabella 1: Componenti presenti nelle configurazioni impiantistiche considerate**

	Configurazione	A	B	C	D
Filtro mandata	Fm	■	■	■	■
Batteria fredda aux - predeumidificazione	BF1		■	■	
Ruota deumidificante	RD	■	■	■	
Scambiatore di calore	HX	■	■	■	■
Umidificatore mandata	HUm	■	■	■	■
Batteria fredda aux – raffr sensibile	BF2		■	■	■

## DELIVERABLE A2: “Sviluppo algoritmi su ambiente integrato ENEA”

Batteria calda - riscaldamento <sup>1</sup>	BC2m	( ■ )	( ■ )	( ■ )	■
Ventilatore mandata	Fan 1	■	■	■	■
Filtro ripresa	Fr	■	■	■	■
Umidificatore ripresa	HUr	■	■	■	
Batteria recupero termico	BC1			■	
Batteria di rigenerazione solare <sup>2</sup>	BC2r	( ■ )	( ■ )	( ■ )	
Ventilatore ripresa	Fan 2	■	■	■	■

---

<sup>1</sup> L’inserimento della batteria di riscaldamento ausiliaria BC2m è un’opzione di scelta dell’utente finale

<sup>2</sup> Nelle configurazioni che impiegano collettori ad aria, la batteria di rigenerazione solare BC2r è assente e sostituita da un passaggio attraverso il collettore