

## Il benessere termoclimatico

L'ASHRAE (American society of heating, refrigeration and air conditioning) stabilisce quali sono le condizioni di benessere termoclimatico, cioè di comfort fisico e psicologico dovute alle condizioni termiche e dell'umidità.

L'equazione di riferimento è la seguente (in condizioni temporaneamente):

$$\frac{dU}{dt} = M - P - C - R - E_{\text{diff}} - E_{\text{sw}} - E_{\text{re}} - E_{\text{ve}}$$

La velocità di variazione dell'energia interna uguaglia la potenza dovuta all'attività metabolica (M) alle quale vanno sottratti i termini di potenza disperse. Una persona a riposo ha  $M = 1$  met. Vediamo cosa sono gli altri termini:

→ P potenza convertita in lavoro:

$$P = \eta M$$

Con  $\eta$  fattore di proporzionalità tra M e P;

- C potenza dispersa per convezione e R per irraggiamento:

$$C + R = A_c \cdot \frac{t_{pe} - t_a}{0,155 I_a + \frac{1}{f_{ce} \cdot h}}$$

In cui:

-  $t_{pe} = 35,7 - 0,0275 (M - P)$ , a riposo  $t_{pe} = 32,8^\circ\text{C}$ ;

-  $t_a = \frac{h_r t_{mr} + h_c t_a}{h_r + h_c}$ , media pesata tra  $t_{mr}$ , temperatura di scambio termico radiante, e  $t_a$ , temperatura di scambio termico convettivo (che è la temperatura ambiente);

-  $A_c$  superficie corporea;

-  $f_{ce}$  resistenza termica di abbigliamento. Una persona con vestiti invernali ha 1 clo di resistenza termica di abbigliamento;

$$f_{ce} = 1 + 0,2 I_{ce} \text{ per } I_{ce} < 0,5 \text{ clo (estivo)}$$

$$f_{ce} = 1,05 + 0,1 I_{ce} \text{ per } I_{ce} > 0,5 \text{ clo (invernale)}$$

-  $I_{ce}$  resistenza termica di abbigliamento [clo];

-  $E_{\text{diff}}$  potenza termica dispersa per diffusione di vapore attraverso la pelle:

$$E_{\text{diff}} = h_{ev} \cdot \delta \cdot A_c [p_s(t_{pe}) - p_v] = 305 \cdot 10^{-3} A_c [256 t_{pe} - 373 - i \cdot p_s(t_a)]$$

In cui  $\delta$  è la permeabilità di vapore della pelle per unità di area  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}\right]$ ;



-  $E_{sw}$  potenza termica dispersa per sudorazione:

$$E_{sw} = 0,42 \cdot A_c \left[ \frac{(M-P)}{A_c} - 58,2 \right]$$

-  $E_{ve}$  potenza termica dispersa attraverso la respirazione come calore latente:

$$E_{ve} = h_{ev} \cdot m_{ave} (y_{exp} - y_a) = 0,0173 \cdot M [5,87 - i_{ps}(t_a)]$$

Più c'è umidità più  $E_{ve}$  diminuisce; non riusciamo a scambiare calore;

-  $E_{ve}$  potenza termica dispersa con la respirazione:

$$C_{ve} = 0,0014 \cdot M (34 - t_a)$$

La temperatura media radiante introdotta per analizzare  $t_{br}$  è indicata da:

$$t_{mr} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{oi} S_{oi}}{\sum_{i=1}^N S_{oi}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{oi} S_{oi}}{S_{tot}}$$

Ogni temperatura viene moltiplicata per la superficie cui appartiene e poi si divide per la superficie totale.

In condizioni non temporaneamente vale l'equazione di Fanger:

$$M - P = C + R + E_{diff} + E_{sw} + E_{ve} + C_{ve}$$

$$\Rightarrow M(1-m) = \frac{A_c (t_2 - t_a)}{0,155 I_{cl} + \frac{1}{f_{cl} \cdot h}} + 3,05 \cdot 10^{-3} A_c [256 t_{pe} - 3375 - i_{ps}(t_a)] + 0,42 A_c \left[ \frac{M-P}{A_c} - 58,2 \right] + 0,0173 \cdot M [5,87 - i_{ps}(t_a)] + 0,0014 \cdot M (34 - t_a)$$

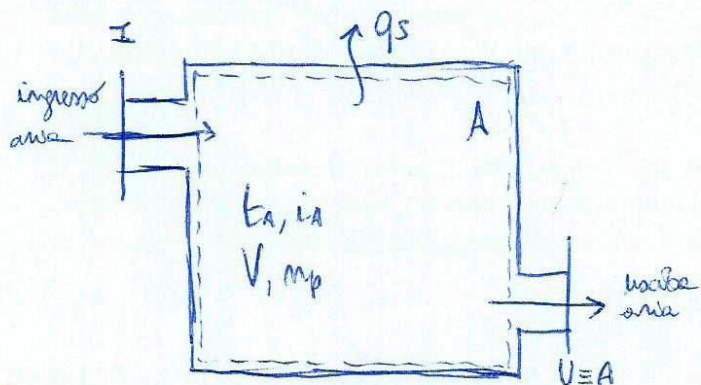
Fanger ha pure raccolto dati, ancora oggi significativi, per costruire grafici e tabelle sul benessere termoclimatico.



## Impianti di condizionamento

Il condizionamento dell'aria consiste nel controllo della temperatura e della quantità di vapore dell'aria. Quando si condiziona un ambiente bisogna tenere conto di carichi di natura sensibile (differenze di temperatura) e latente (infiltrazioni).

Consideriamo un volume di controllo e le relative equazioni di bilancio energetico e di massa



$$\frac{dW_{rc}}{dt} = q_s - P + m_{as}(H_i - H_u) + \dot{m}_v H_v$$

$$\dot{m}_{as,u} = \dot{m}_{as,i}$$

$$\dot{m}_{as} y_i + \dot{m}_v = \dot{m}_{as} y_u$$

$m_p$  sono le persone mediamente presenti

In regime stazionario:

$$\begin{cases} \dot{q}_0 = q_s + M \cdot m_p + \dot{m}_{as}(H_i - H_u) + \dot{m}_v H_v \\ \dot{m}_v = \dot{m}_{as}(y_u - y_i) \end{cases}$$

Data una portata volumetrica  $\dot{Q}_{as}$  [ $m^3/h$ ], funzione delle destinazioni d'uso del locale, del numero di persone presenti mediamente e del volume del locale, valutiamo  $\dot{m}_{as}$ :

$$\dot{m}_{as} = \dot{Q}_{as} \cdot \rho_a \quad \text{con} \quad \rho_a = \frac{p_a}{R_a T_a} = \frac{p_a - i p_s(t_a)}{R_a T_a}$$

Passiamo alla massa di vapore:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{v,p} + \dot{m}_{v,org} + \dot{m}_{v,inf}$$

↑  
persone

↑  
sorgenti  
(cucina, acqua)

↑  
infiltrazioni  
da porte e finestre

Le portate massiche dovute alle persone e quelle causate dalle infiltrazioni sono:

$$\dot{m}_{v,p} = \dot{m}_{sw} \cdot m_p$$

$$\dot{m}_{v,inf} = \dot{m}_{ing}(y_o - y_a)$$

In generale:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{sw} \cdot m_p + \sum_k \dot{m}_{v,org,k} + \dot{m}_{v,inf}$$

Introduciamo il carico termico latente:

$$q_c = \dot{m}_v \cdot H_v = (\dot{m}_{v,p} + \dot{m}_{v,org} + \dot{m}_{v,inf}) H_v$$



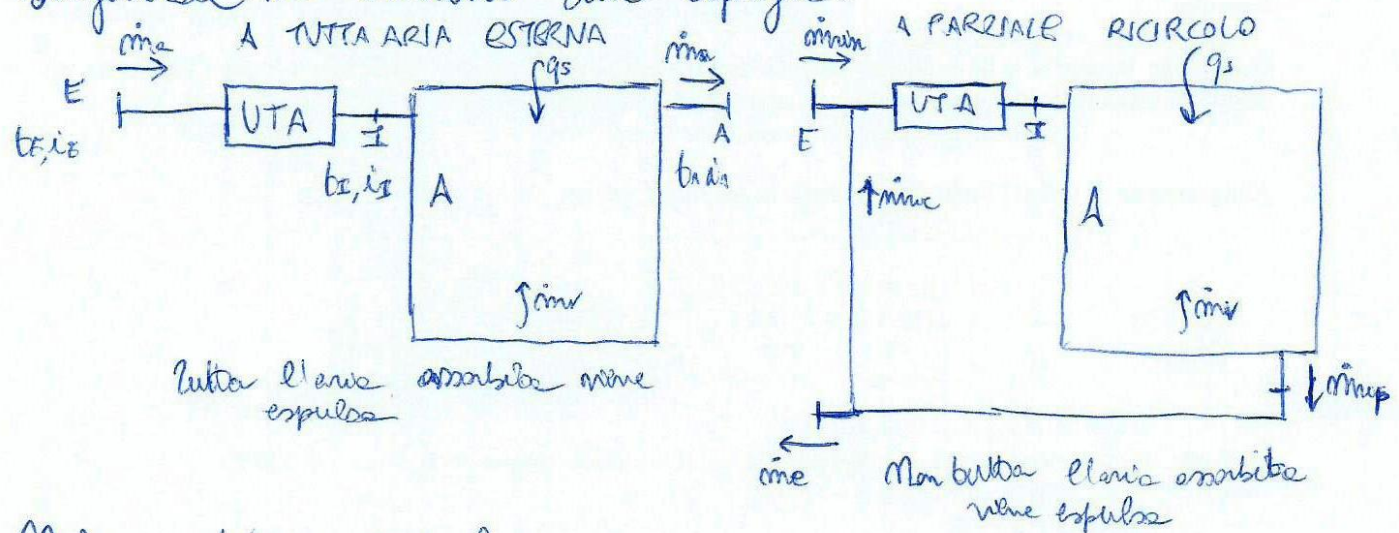
Passiamo ora al carico sensibile, che fa variare la temperatura dell'aria ambiente:

$$q_s = q_{b,o} + q_{b,r} + q_{sorg} + q_{inf}$$

flusso del perimetro opaco:  $q_{b,o} = \sum_i K_i S_i \Delta t$   
 flusso del perimetro vetro:  $q_{b,r} = \sum_j K'_j S_j \Delta t_j + \sum_j F_j S_j I_s$   
 flusso dovuto alle sorgenti:  $q_{sorg} = n_{p,p} q'_{p,s} + \sum_k q_{pog,k}$   
 infiltrazioni:  $q_{inf} = \frac{n_{in} (C_{pa} + \gamma C_{pv})}{(t_e - t_a)^{-1}}$

In cui  $K$  è la trasmittanza,  $S$  l'area e  $\Delta t = t_e - t_a$ . Nel caso del vetro  $F_j$  è il fattore di guadagno e  $I_s$  l'intensità della radiazione solare. A  $K$  viene aggiunto un apice perché la trasmittanza del vetro è molto diversa da quella delle pareti opache. Per le sorgenti abbiamo il numero medio di persone  $n_{p,p}$ , la potenza termica sensibile prodotta da ogni persona  $q'_{p,s}$  e la potenza delle sorgenti  $k$ -esime  $q_{pog,k}$ . Nelle infiltrazioni si trascura spesso il termine  $\gamma C_{pv}$ .

A questo punto possiamo approfondire il discorso sugli impianti. In generale ne esistono due tipologie:



Nel secondo caso si hanno:

$$\dot{m}_{e} = \dot{m}_{min} \quad \text{e} \quad \dot{m}_{sup} = \dot{m}_{rec} + \dot{m}_{min} = \dot{m}_a$$

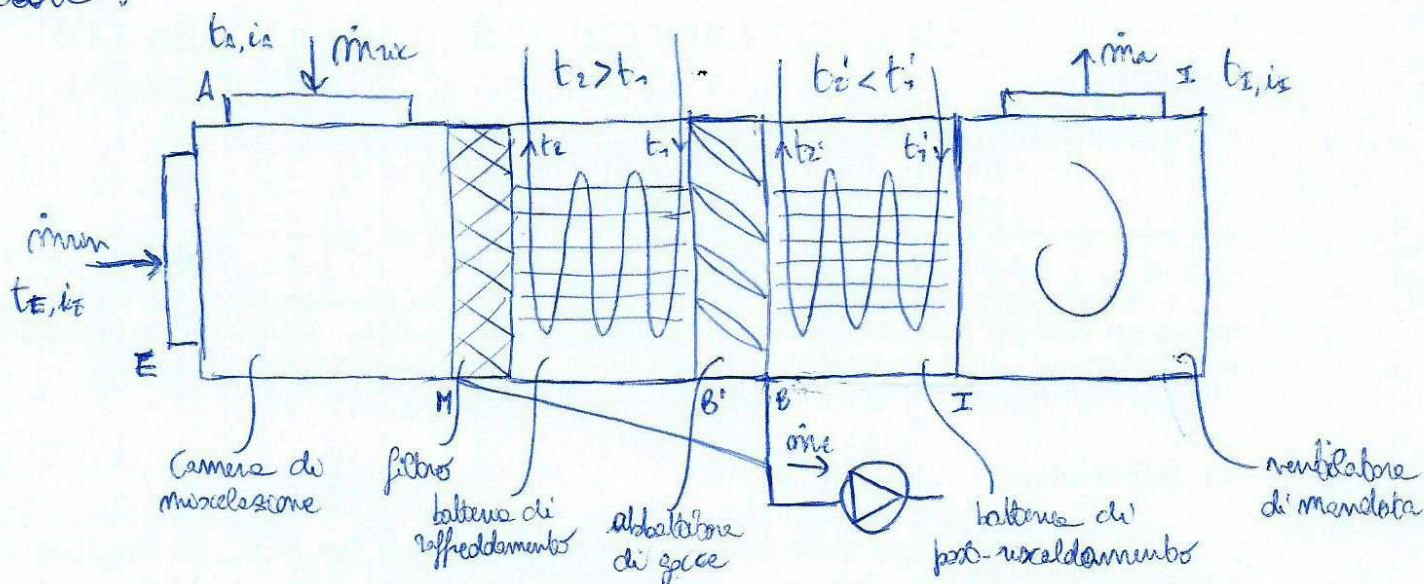
L'aria esterna è sempre migliore di quella interna. Peggio è la qualità dell'aria interna.



## Condizionamento estivo

Esistono due casi di condizionamento, indipendentemente dal fatto che l'impianto sia a tutta aria secca o a parziale ricambio: quello estivo e quello invernale.

Nel condizionamento estivo bisogna raffreddare e deumidificare:



La portata di rinnovo, proveniente dall'esterno, viene miscelata con quella di ricambio nella camera di miscelazione. Il filtro serve a intrappolare batteri e impurità dell'aria di ricambio. Nella I fase, di miscelazione, vale:

$$\begin{cases} \dot{m}_{min} \cdot h'_E + \dot{m}_{max} \cdot h_A = (\dot{m}_{min} + \dot{m}_{max}) \cdot h_I \\ \dot{m}_{min} \cdot y_E + \dot{m}_{max} \cdot y_A = (\dot{m}_{min} + \dot{m}_{max}) \cdot y_I \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{m}_{min}}{\dot{m}_{max}} = \frac{AM}{ME} = \frac{y_A - y_M}{y_M - y_E} = \frac{h_A - h_I}{h_I - h'_E}$$

Successivamente l'aria passa nella batteria di raffreddamento. Subito dopo attraversa l'abbattitore di gocce che esegue la deumidificazione. In tale II fase vale:

$$q_{br} = \dot{m}_{as} (h'_B - h'_I) \quad \dot{m}_e = \dot{m}_{as} (y_A - y_{B'})$$

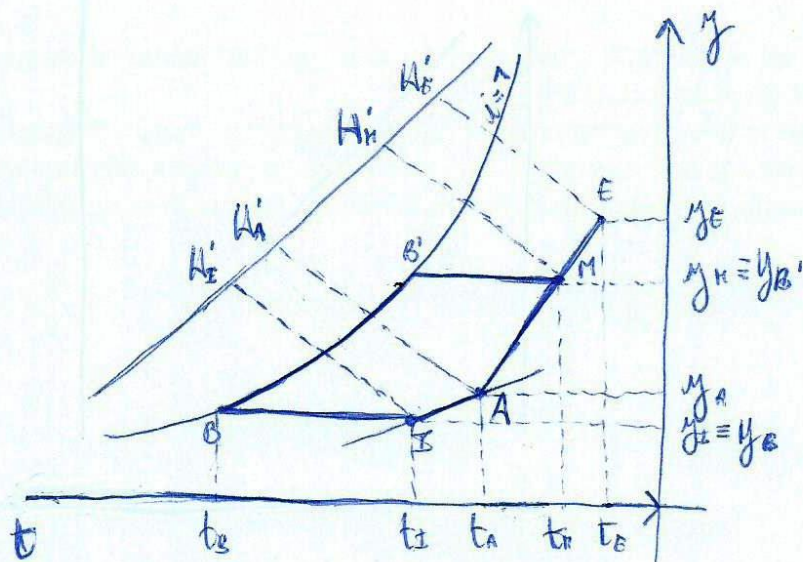
Infine abbiamo la batteria di post-riscaldamento che serve a far aumentare l'umidità relativa e grado igrometrico costante:

$$q_{pr} = \dot{m}_{as} (h'_I - h'_B)$$

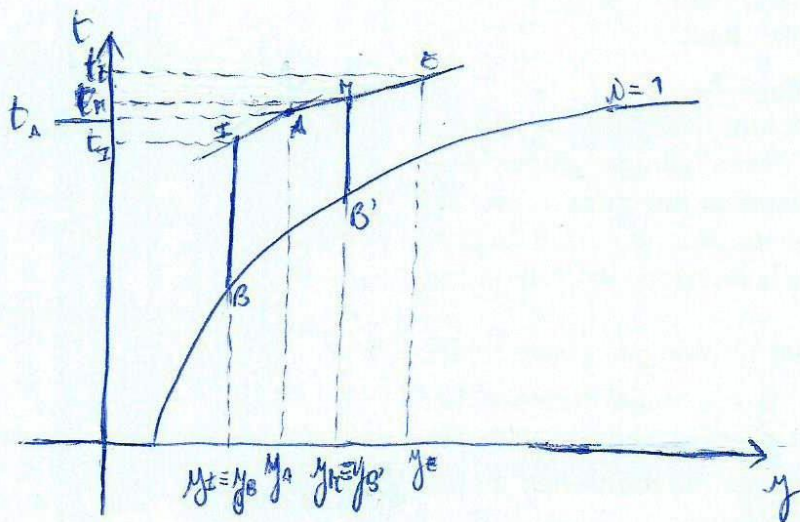
La pompa serve ad espellere l'acqua raccolta dall'abbattitore di gocce. Il ventilatore manda l'aria all'ambiente.



Graficamente le trasformazioni sono così rappresentate (sul diagramma di Carter):



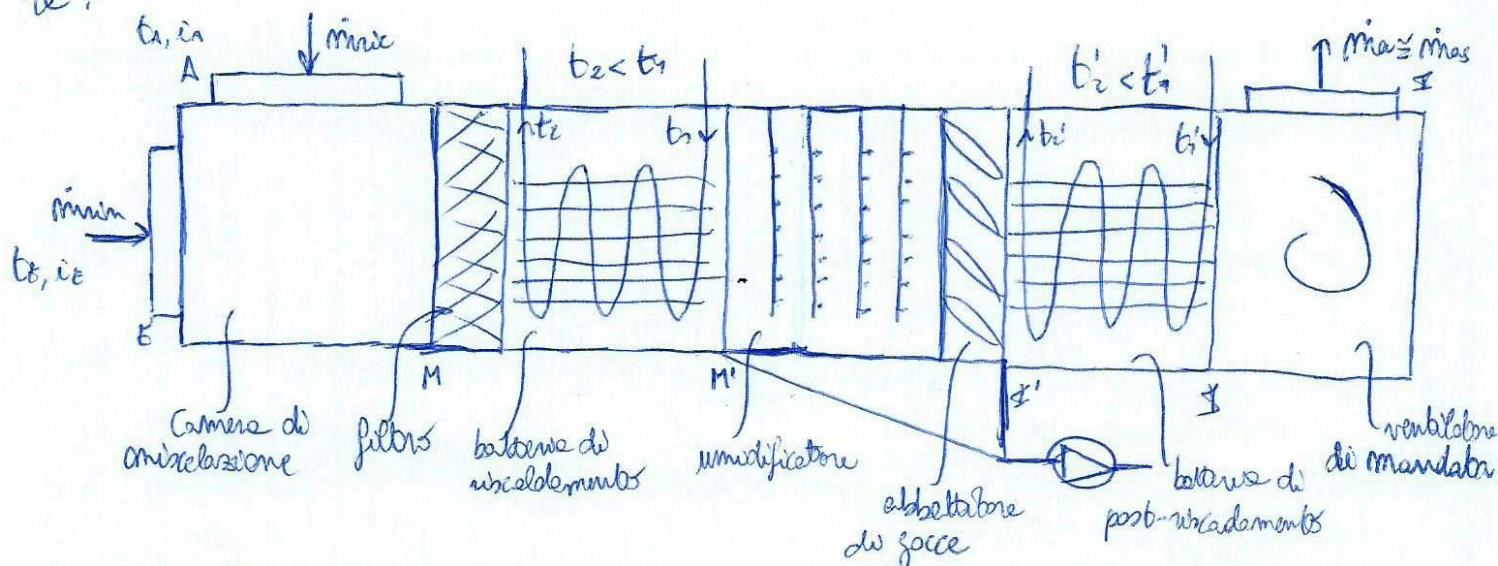
Sul diagramma di Mollier:





## Condizionamento invernale

Nel condizionamento invernale bisogna riscaldare e umidificare:



Nella I fase, di miscelazione, l'aria di rinnovo viene miscelata con quella di ricambio:

$$\begin{cases} \dot{m}_{min} \cdot h_1^e + \dot{m}_{max} \cdot h_1^a = (\dot{m}_{min} + \dot{m}_{max}) \cdot h_1^i \\ \dot{m}_{min} \cdot y_1^e + \dot{m}_{max} \cdot y_1^a = (\dot{m}_{min} + \dot{m}_{max}) \cdot y_1^i \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{m}_{min}}{\dot{m}_{max}} = \frac{h_1^a - h_1^i}{h_1^e - h_1^i} = \frac{y_1^a - y_1^i}{y_1^e - y_1^i} = \frac{h_1^a - h_1^e}{h_1^i - h_1^e}$$

Il filtro elimina le impurità dall'aria di ricambio. Si passa poi alla batteria di riscaldamento, la II fase:

$$q_{12} = \dot{m}_{max} (h_2^i - h_1^i) = \dot{m}_{max} \cdot c_p (t_{120,i} - t_{120,u})$$

La III fase è l'umidificazione:

$$\dot{m}_{max} (y_2^i - y_1^i) = \dot{m}_w$$

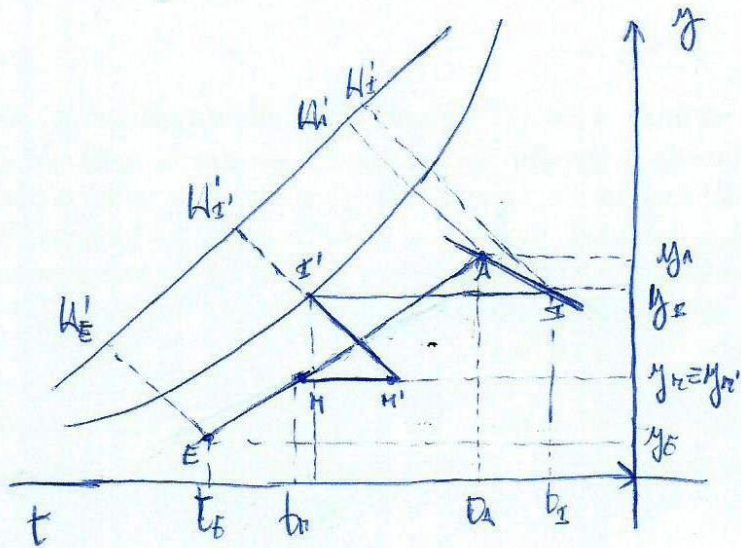
Abbiamo poi l'abbattitore di gocce e la IV fase, il post-riscaldamento, che fa aumentare l'umidità relativa a grado igrometrico costante:

$$q_{23} = \dot{m}_{max} (h_2^i - h_2^e) = \dot{m}_{max} \cdot c_p \cdot (t_{230,i} - t_{230,u})$$

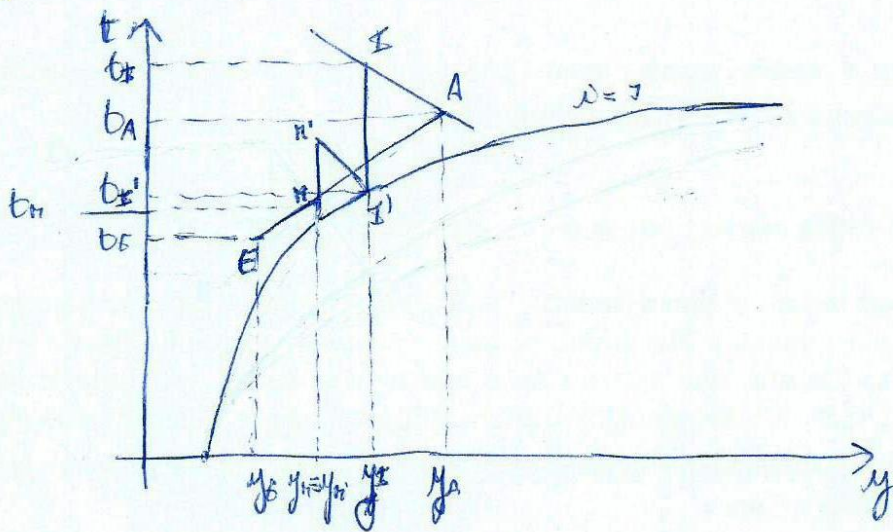
Le pompe allontano l'acqua liquida dell'abbattitore, il ventilatore inietta l'aria trattata nell'ambiente. Nelle formule sopra abbiamo assunto  $t_1 = t_{120,i}$ ,  $t_2 = t_{120,u}$ ,  $t_2' = t_{230,i}$  e  $t_2' = t_{230,u}$ .



Graficamente, sul diagramma di Carter:



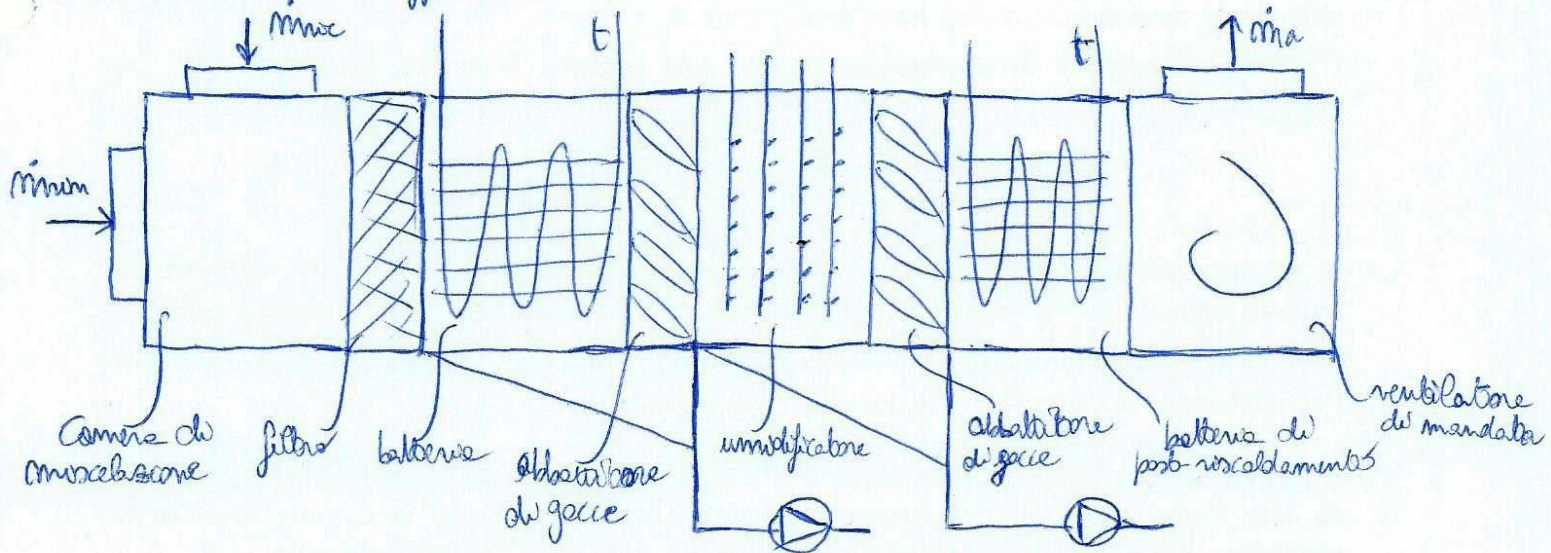
Sul diagramma di Mollier:





Impianto estivo e invernale, retta di carico e fattore di by-pass

L'impianto che realizza sia il condizionamento estivo che quello invernale è raffigurato:



Il segmento I-A rappresenta la trasformazione termologica che l'aria subisce nell'ambiente "quarto ambiente" o "retta di carico".

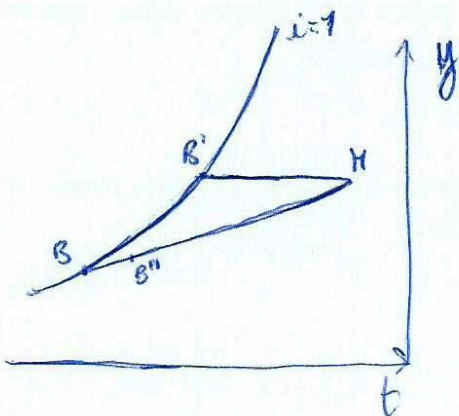
È il luogo geometrico dei punti che possiedono caratteristiche termologiche tali da mantenere l'ambiente nelle condizioni di temperatura e umidità desiderate a fronte dei carichi termici e degli apporti di calore. La pendenza di tale retta è data da:

$$R = \frac{\Delta H'}{\Delta y} = \frac{h_{a1}' - h_{a2}'}{y_{a1} - y_{a2}} = \frac{q_s}{\dot{m}v} + h_r = \frac{q_{tot}}{\dot{m}v}$$

Ovvero  $R > 0$  nel caso estivo,  $R < 0$  in quello invernale. In relazione binomiale con  $R$  è il fattore termico FT:

$$FT = \frac{q_s}{q_{tot}}$$

Introduciamo infine il fattore di by-pass (di cui abbiamo già parlato in precedenza). Quando l'aria attraversa una batteria (di riscaldamento o raffreddamento) non subisce interamente il trattamento. Una parte by-passa la batteria. Considerando il caso estivo, non passa tutta da A a B, ma una parte raggiunge B'.



Il fattore di by-pass è:

$$f_{bp} = \frac{H_{B''} - H_B}{H_A - H_{B''}} = \frac{\dot{m}_{bp}}{\dot{m}_{as} - \dot{m}_{bp}}$$