Impianti di Condizionamento

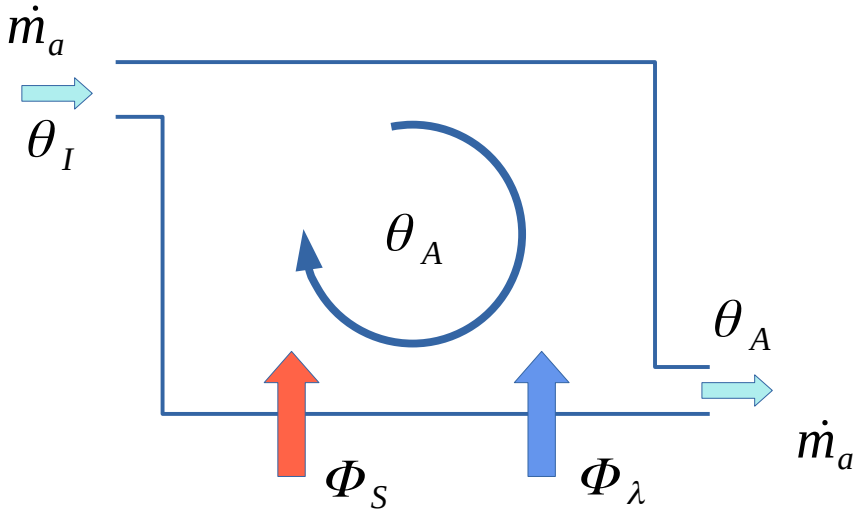
Marco Manzan

Università di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura

ottobre 2026

Impianto tutt'aria

Bilancio Ambiente



bilancio massa e energia

$$
\begin{aligned}
(\dot{m}_a)_u &= (\dot{m}_a)_e \\
(\dot{m}_{av})_u &= (\dot{m}_{av})_e + \dot{m}_v \\
m_a \cdot x_A &= m_a \cdot x_I + \dot{m}_v \\
\dot{m}_a \cdot h_u &= \dot{m}_a \cdot h_I + \Phi_S + \Phi_\lambda
\end{aligned}
$$

Retta d'esercizio

Pendenza Retta

$$\begin{aligned} \Phi_{tot} &= \dot{m}_a \cdot (h_A - h_I) \\ \dot{m}_v &= \dot{m}_a \cdot (x_A - x_I) \\ \frac{\Phi_{tot}}{\dot{m}_v} &= \frac{h_A - h_I}{x_A - x_I} \end{aligned}$$

Invernale

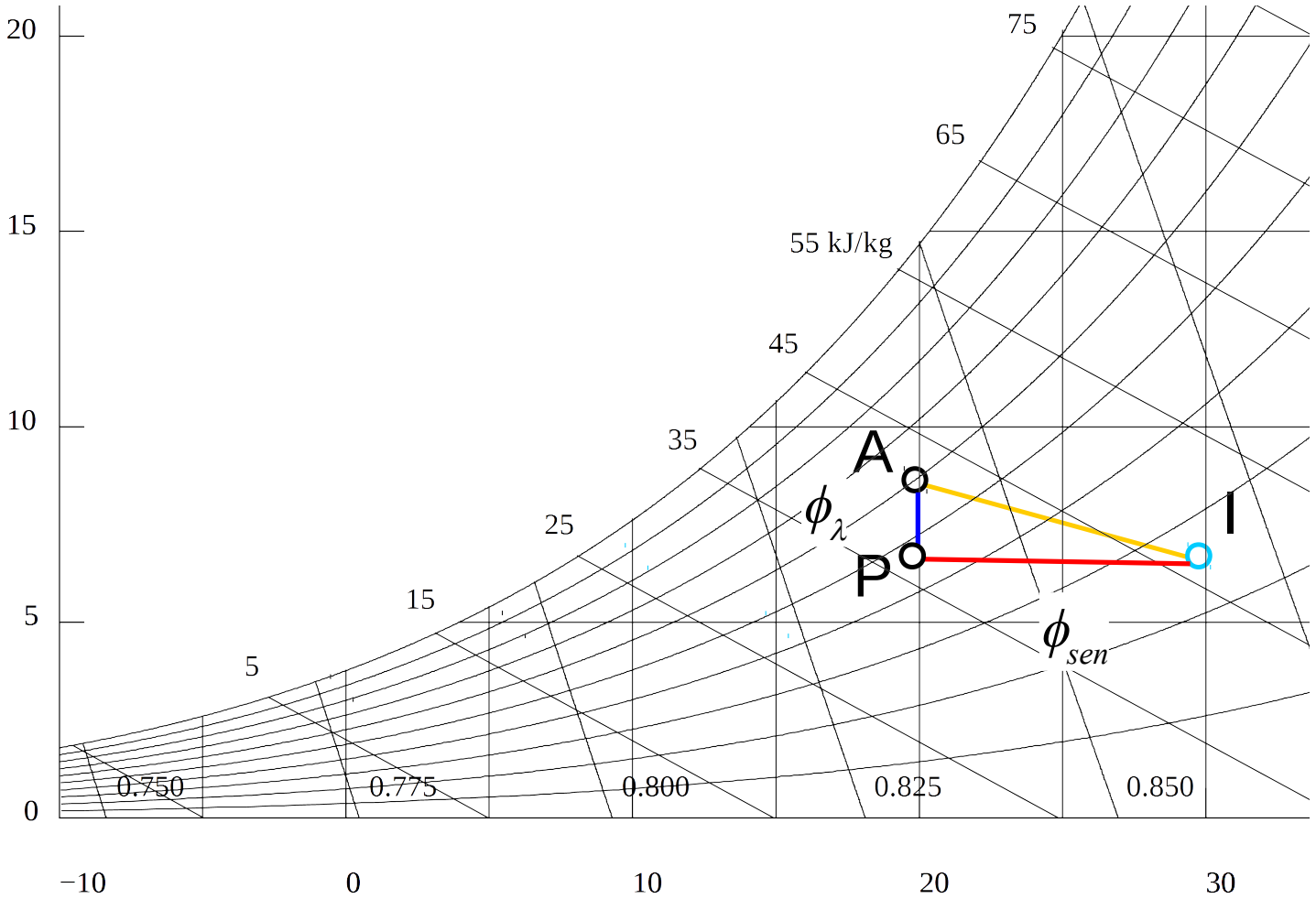
$$\Phi_S < 0;\ \Phi_\lambda > 0 \Longrightarrow \Phi_{tot} < 0; \qquad \frac{h_A - h_I}{x_A - x_I} = \frac{\Phi_{tot}}{\dot{m}_v} < 0$$

Estivo

$$\Phi_S > 0;\ \Phi_\lambda > 0 \Longrightarrow \Phi_{tot} > 0; \qquad \frac{h_A - h_I}{x_A - x_I} = \frac{\Phi_{tot}}{\dot{m}_v} > 0$$

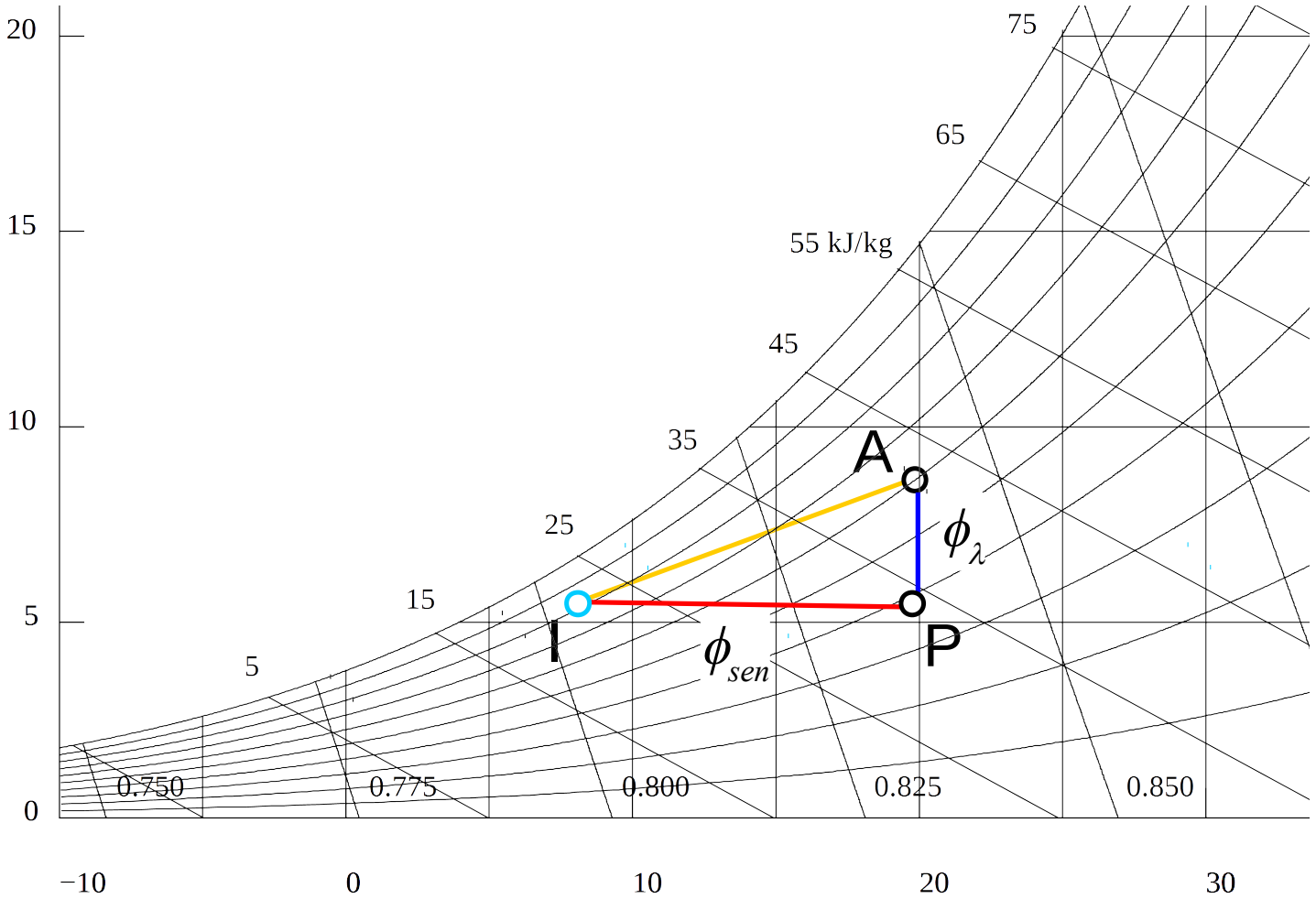
Carico Sensibile e latente

invernale



Carico Sensibile e Latente

estivo



Carico Latente e Sensibile

Bilancio in Ambiente

carico totale

$$\Phi_{tot} = \dot{m} \cdot (h_A - h_I)$$

punto ausiliario

$$\theta_P = \theta_A$$

$$x_P = x_I$$

carichi

$$\dot{m} \cdot (h_A - h_I) = \dot{m} \cdot (h_A - h_P) + \dot{m} \cdot (h_P - h_I)$$

$$\dot{m} \cdot (h_A - h_P) = \dot{m}_v \cdot (cp_v \cdot \theta_A + r_0) \simeq \dot{m}_v \cdot r_0 = \Phi_\lambda$$

$$\dot{m} \cdot (h_P - h_I) = \dot{m} \cdot (cp_a + x_I \cdot cp_v) \cdot (\theta_P - \theta_I) = \dot{m} \cdot c_{pau} \cdot (\theta_A - \theta_I)$$

$$\dot{m} \cdot (h_P - h_I) = \Phi_{sen}$$

Sensible heat ratio

SHR Sensible heat ratio

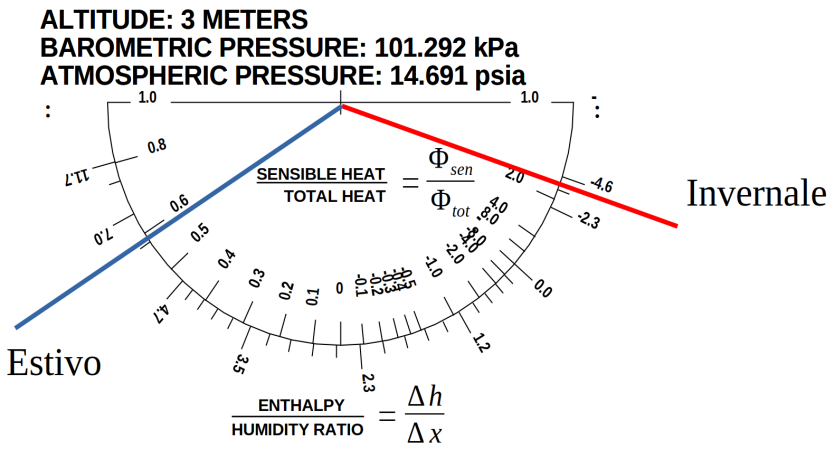
- La pendenza della retta d'esercizio può essere indicata anche dal Sensible Heat Ratio *SHR*, definito come il rapporto tra carico sensibile su carico totale

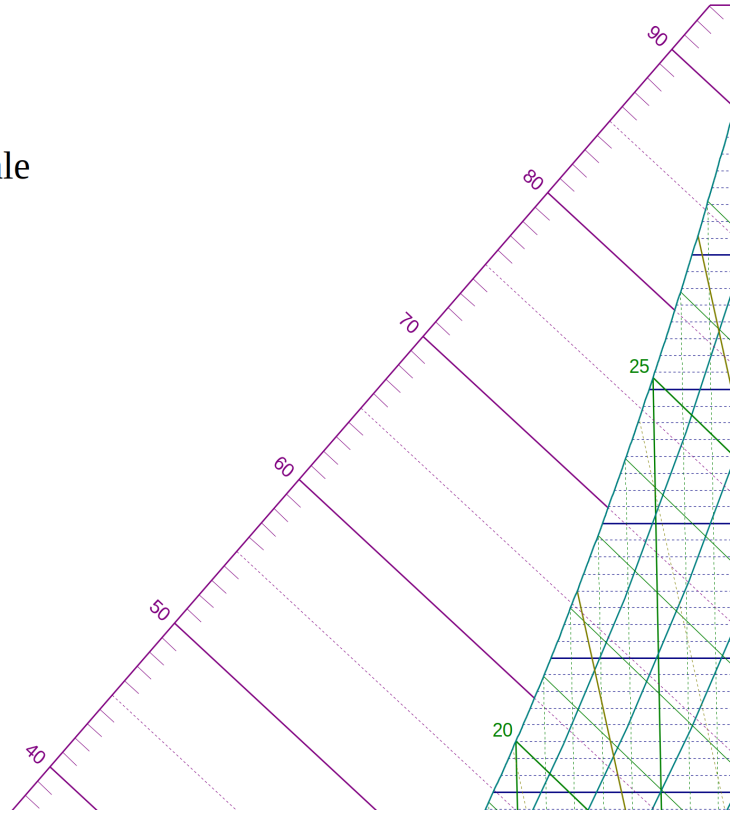
$$SHR = \frac{\Phi_{sen}}{\Phi_{tot}} = \frac{\Phi_{sen}}{(\Phi_{sen} + \Phi_{\lambda})}$$

- nel diagramma ASHRAE sono riportate entrambe le pendenze

Retta d'esercizio

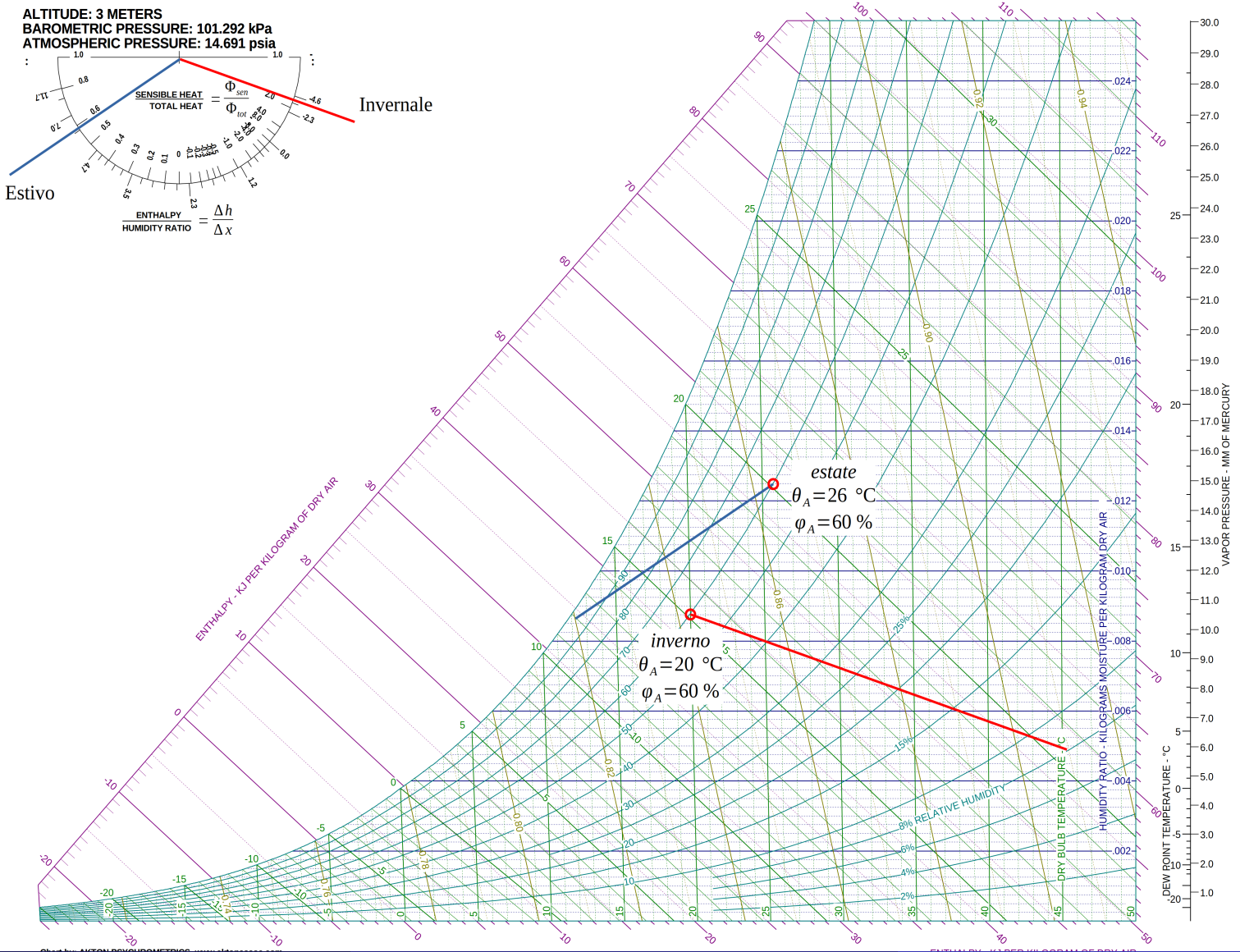
Cartiglio Retta d'esercizio e SHR su diagramma ASHRAE



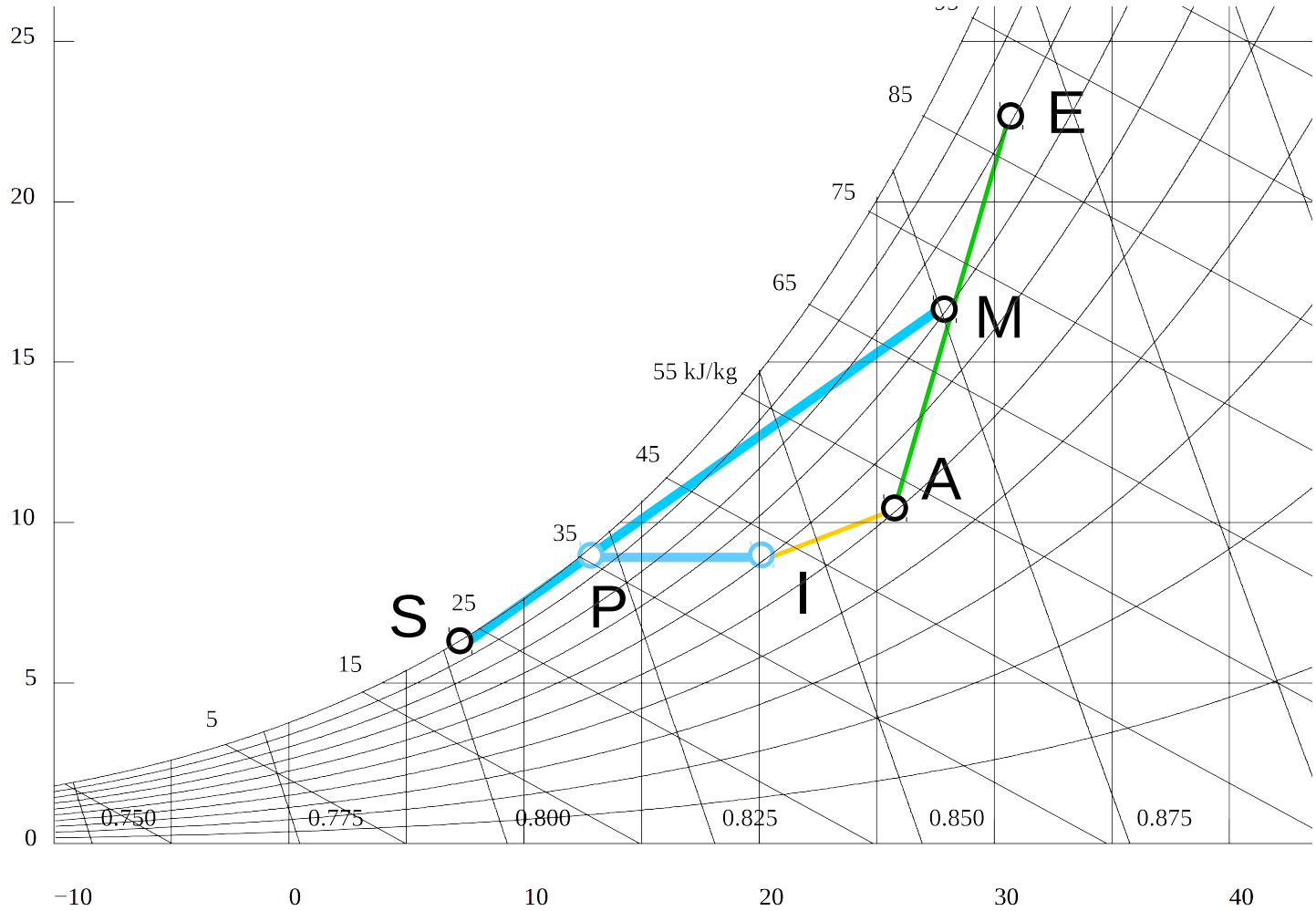


Retta d'esercizio

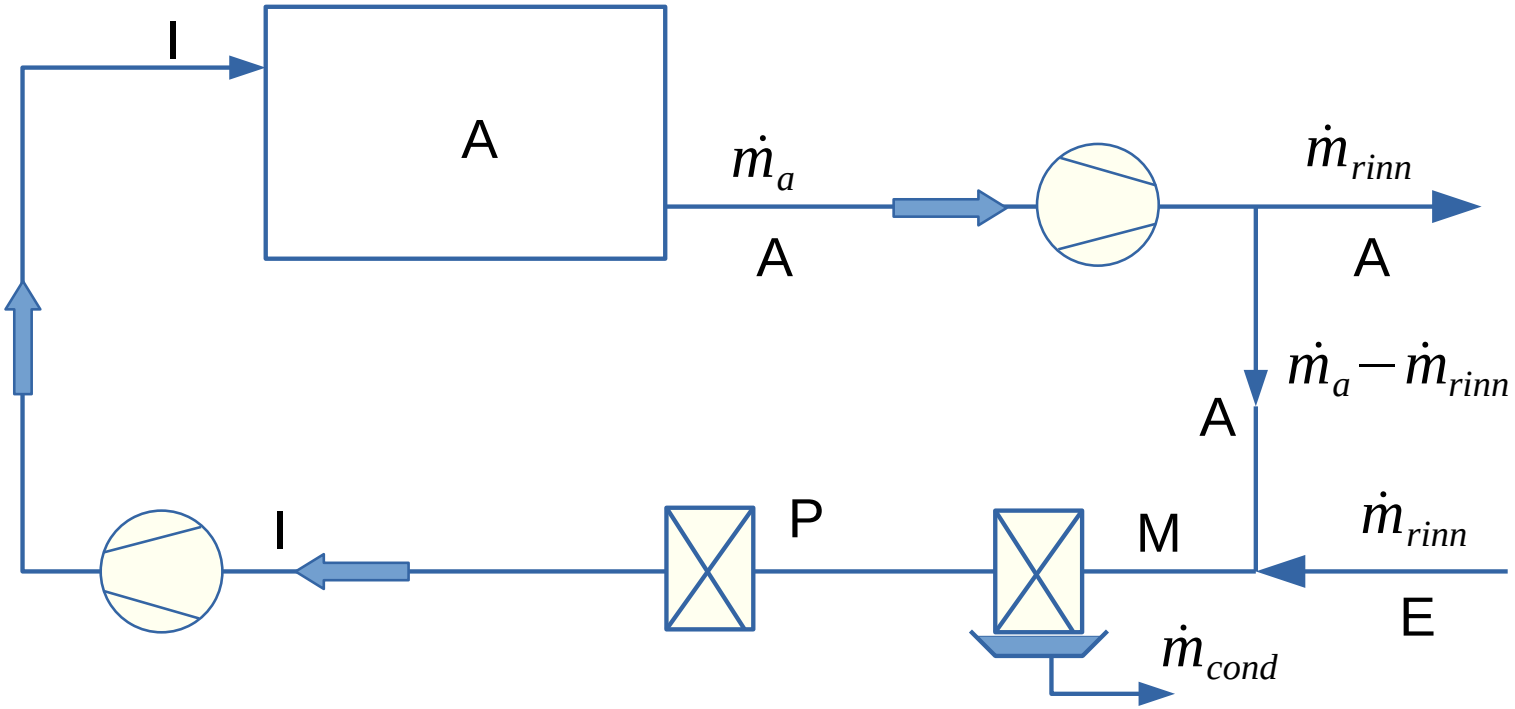
Retta d'esercizio e SHR su diagramma ASHRAE



Ciclo Condizionamento Estivo

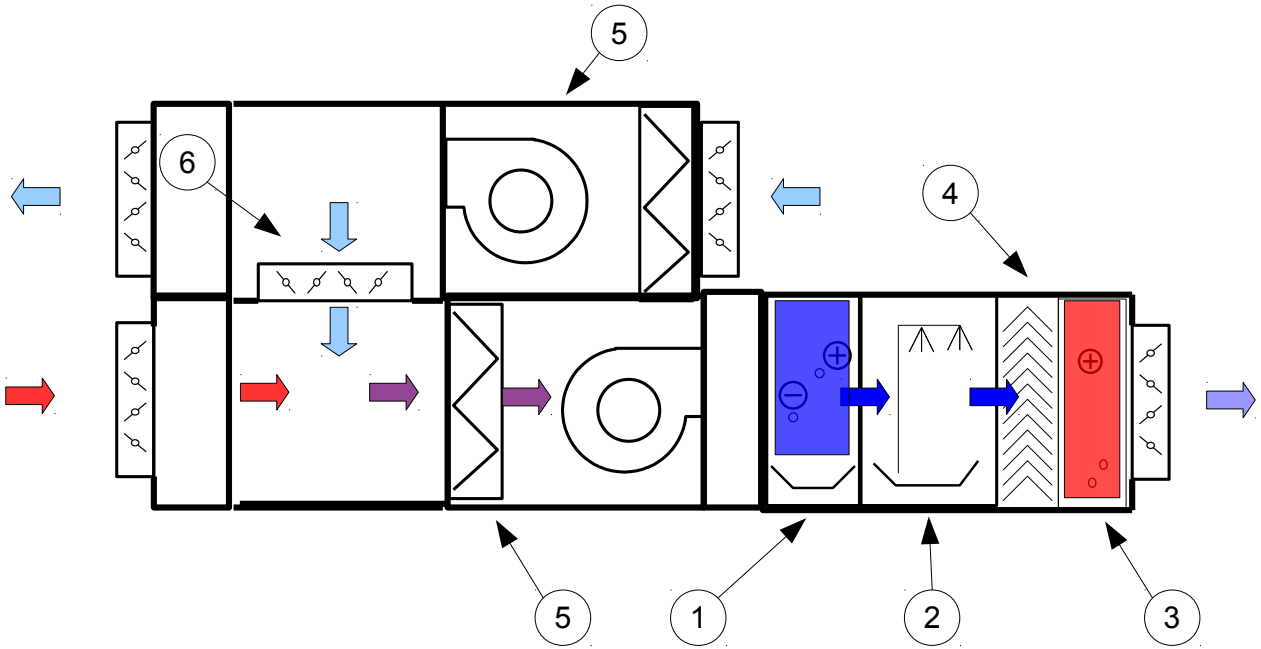


Schema Funzionamento Estivo



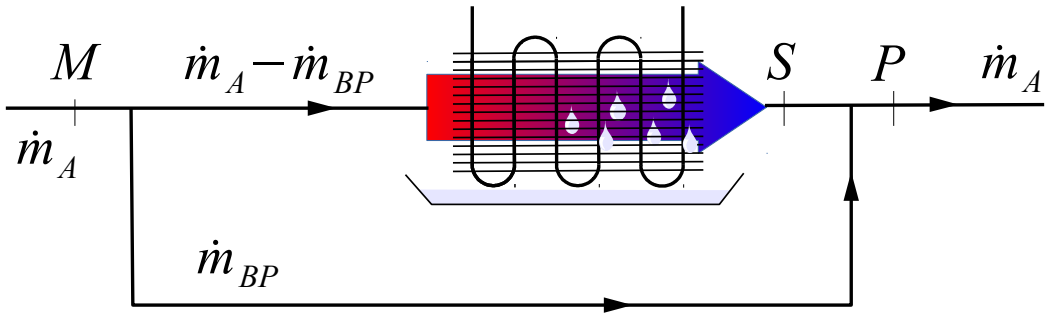
Unità di Trattamento Aria - UTA

funzionamento estivo



1. Batteria fredda
2. umidificatore (disattivato)
3. Batteria postriscaldamento
4. separatore di gocce
5. filtri
6. ricircolo

Fattore di Bypass



Miscelamento

$$BF = \frac{\dot{m}_{BP}}{\dot{m}_{AI}}$$

$$\dot{m}_{AI} h_P = \dot{m}_{BP} h_M + h_S(\dot{m}_{AI} - \dot{m}_{BP})$$

$$\dot{m}_{AI}(h_P - h_S) = \dot{m}_{BP}(h_M - h_S)$$

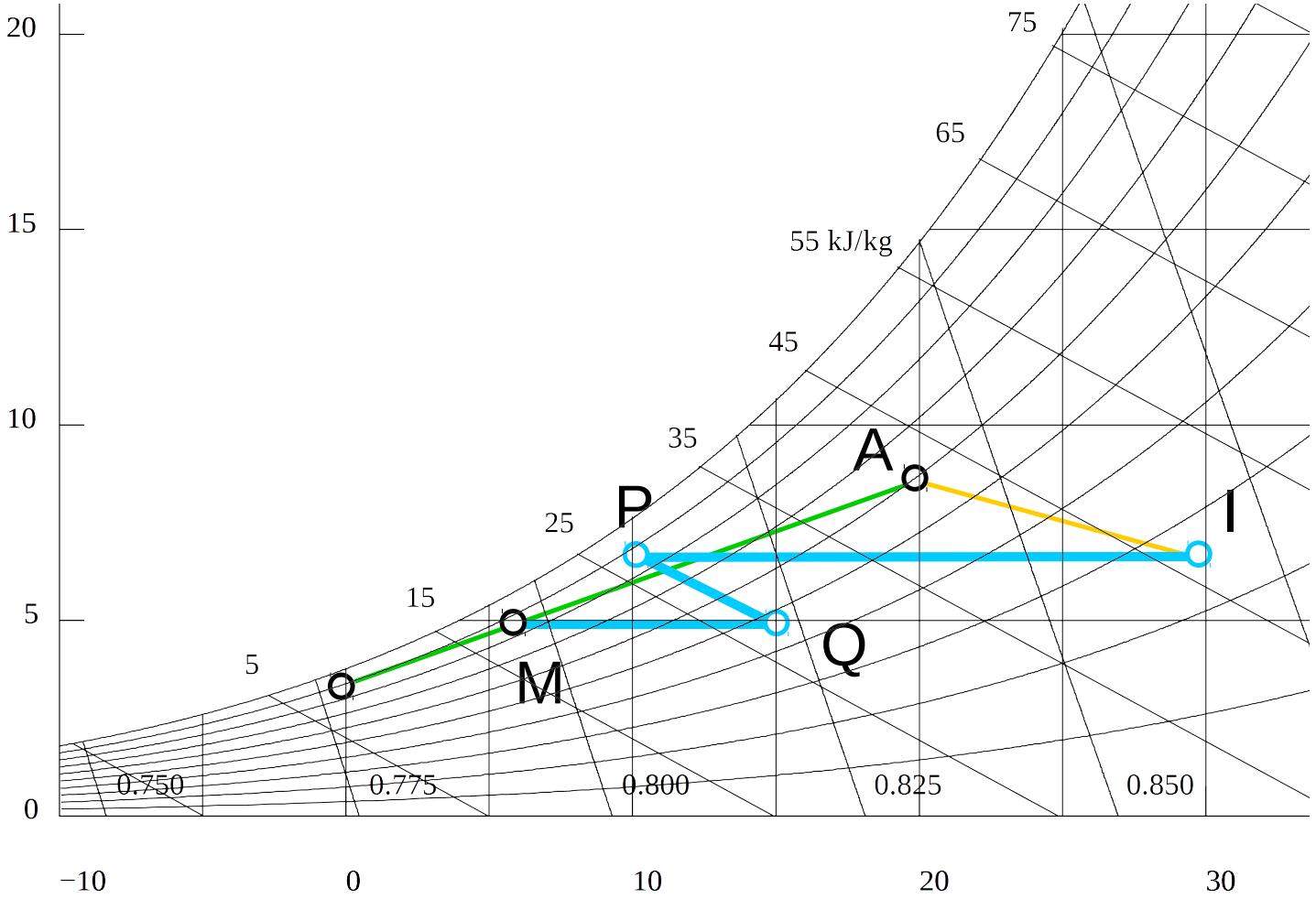
$$BF = \frac{(h_P - h_S)}{(h_M - h_S)} \approx \frac{(\theta_P - \theta_S)}{(\theta_M - \theta_S)}$$

$$BF = 0,67^n \quad 0 < BF < 1$$

n numero di ranghi della batteria

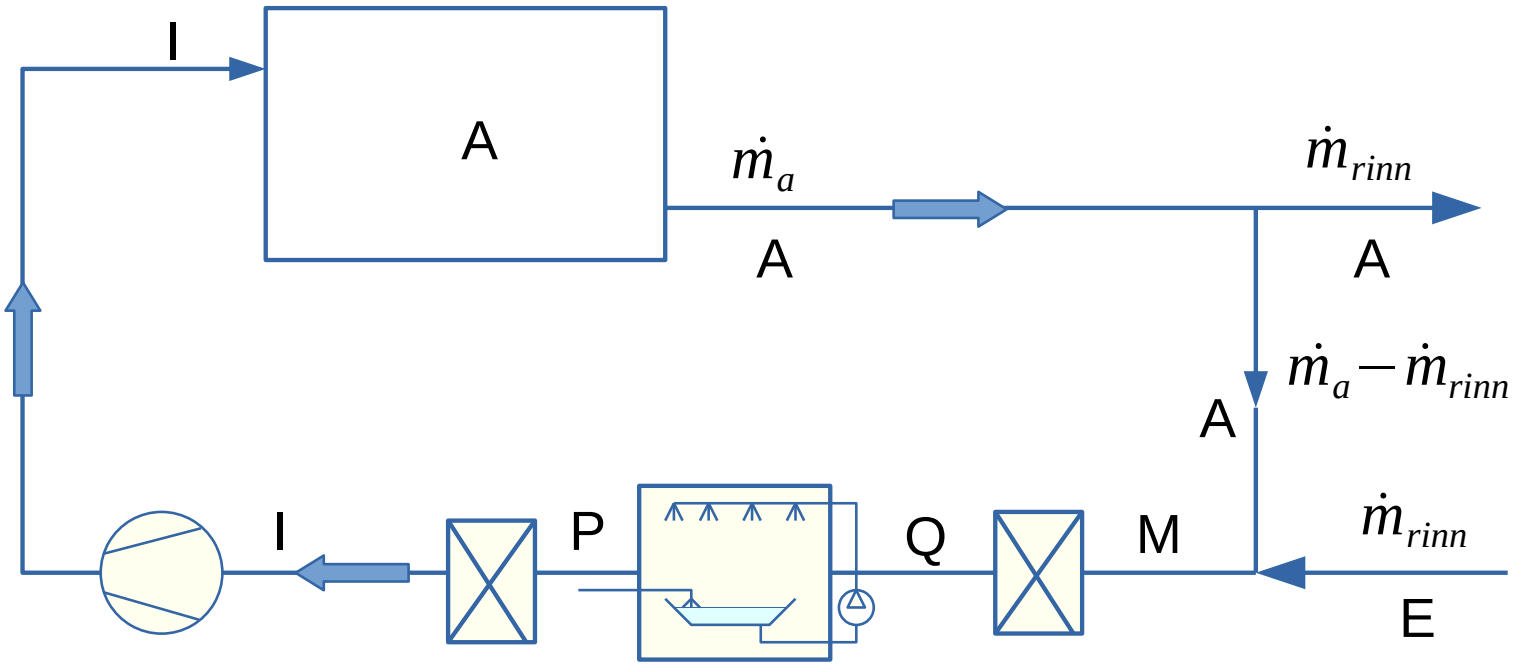
Ciclo Condizionamento Invernale

Condizioni di progetto



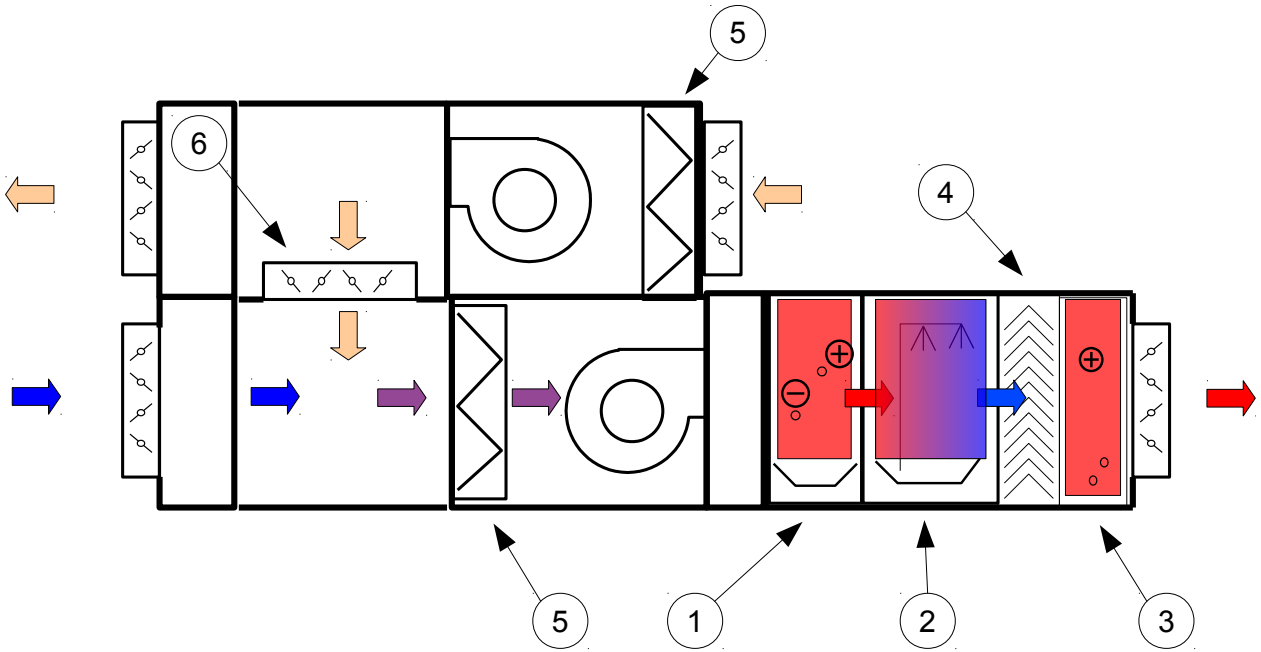
Schema Condizionamento Invernale

Umidificazione Adiabatica



Unità di Trattamento Aria - UTA

funzionamento invernale



1. Batteria di preriscaldamento
2. saturatore adiabatico
3. Batteria postriscaldamento
4. separatore di gocce
5. filtri
6. ricircolo

Caratteristica del Saturatore

Il saturatore adiabatico è caratterizzato dalla sua efficienza

$$\varepsilon_{sat} = \frac{x_u - x_e}{x_{us} - x_e} \approxeq \frac{\theta_e - \theta_u}{\theta_{us} - \theta_e}$$

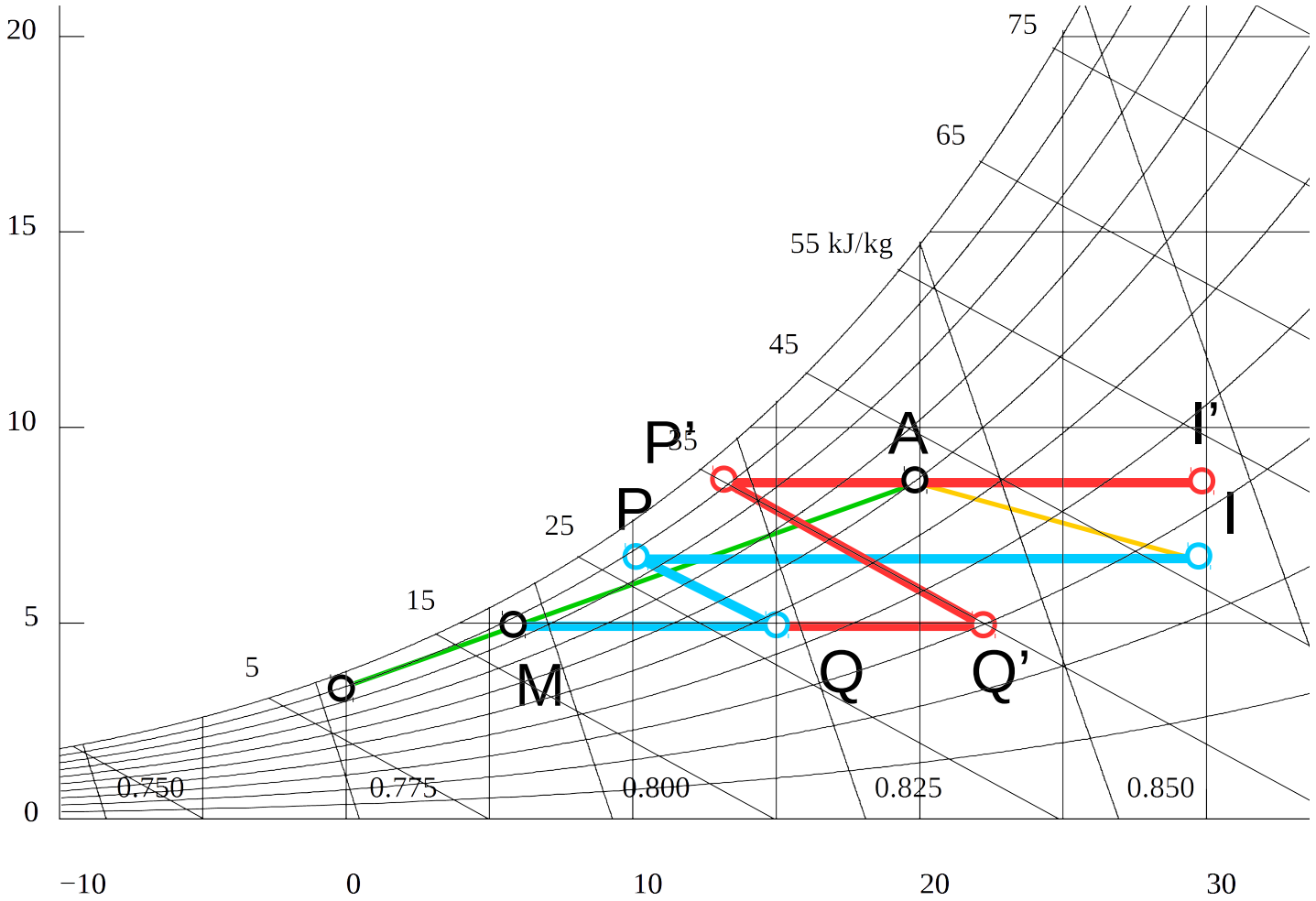
x_e, θ_e umiditá specifica e temperatura in entrata

x_u,θ_u umiditá specifica e temperaatura in uscita

x_{us},θ_{us} umidità specifica e temperatura a saturazione alla stessa temperaatura di bulbo bagnato

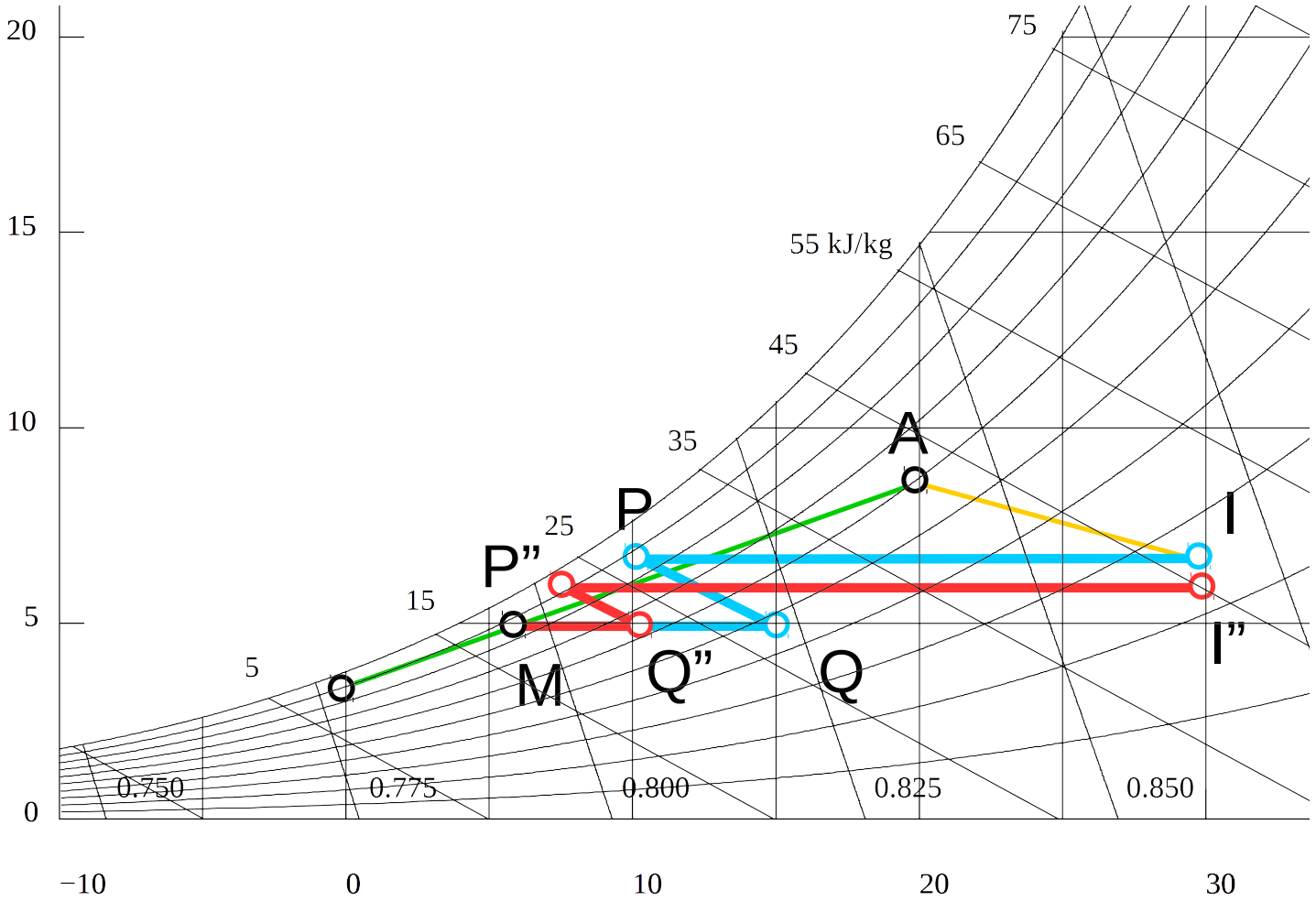
Ciclo Condizionamento Invernale

Carico latente nullo



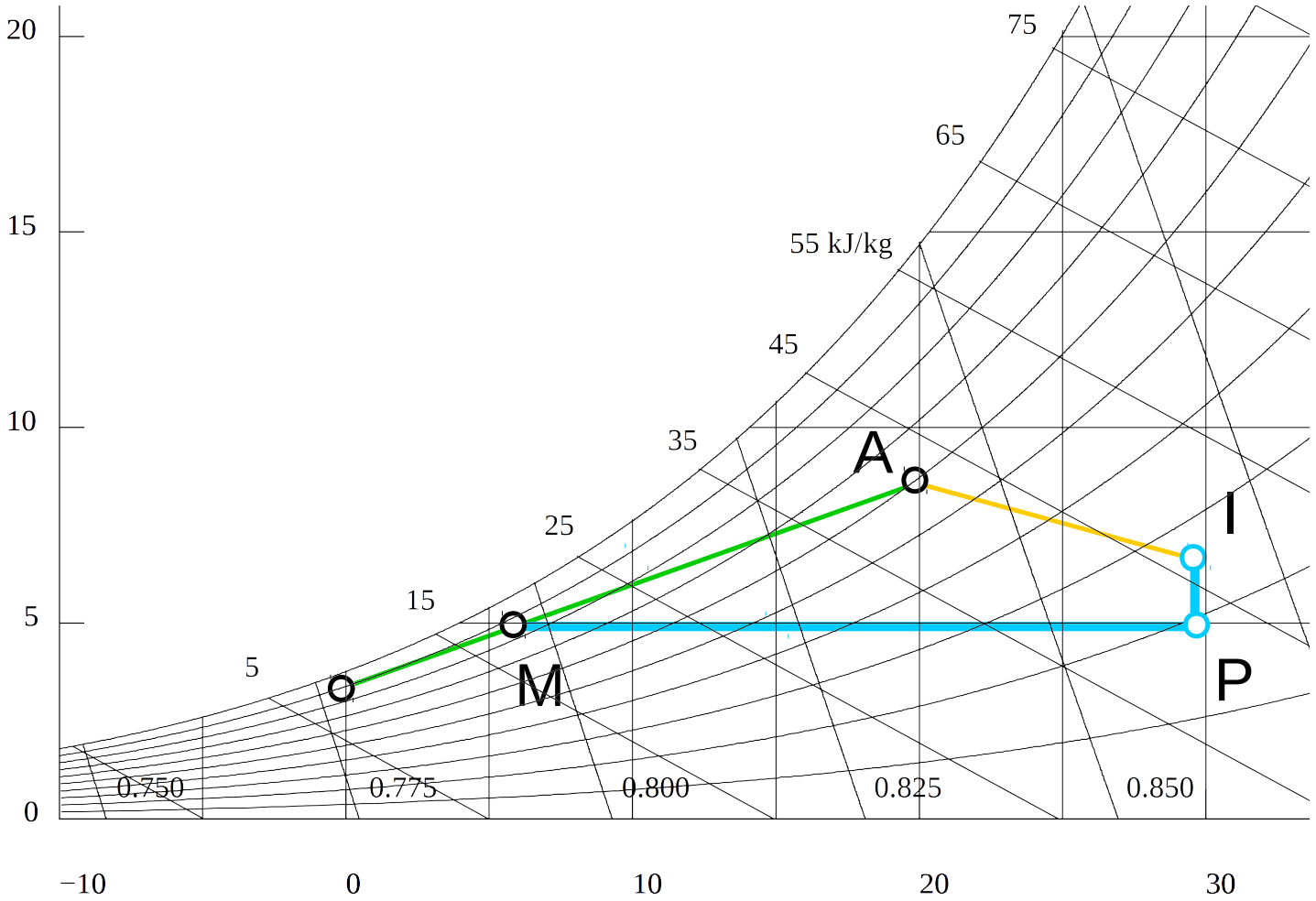
Ciclo Condizionamento Invernale

Carico latente massimo



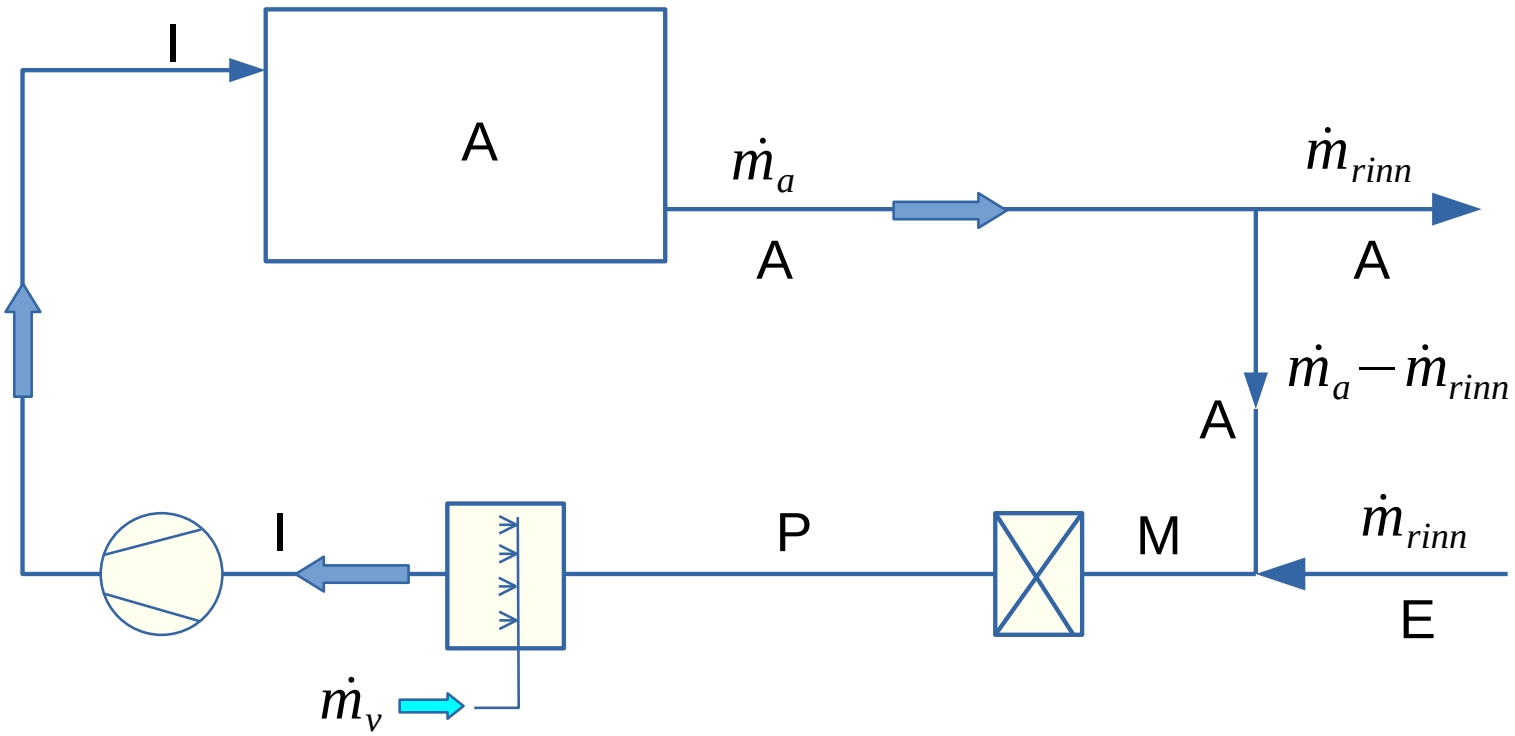
Ciclo Condizionamento Invernale

Umidificazione a vapore



Schema Funzionamento Invernale

Umidificazione a Vapore



Batteria di preriscaldamento

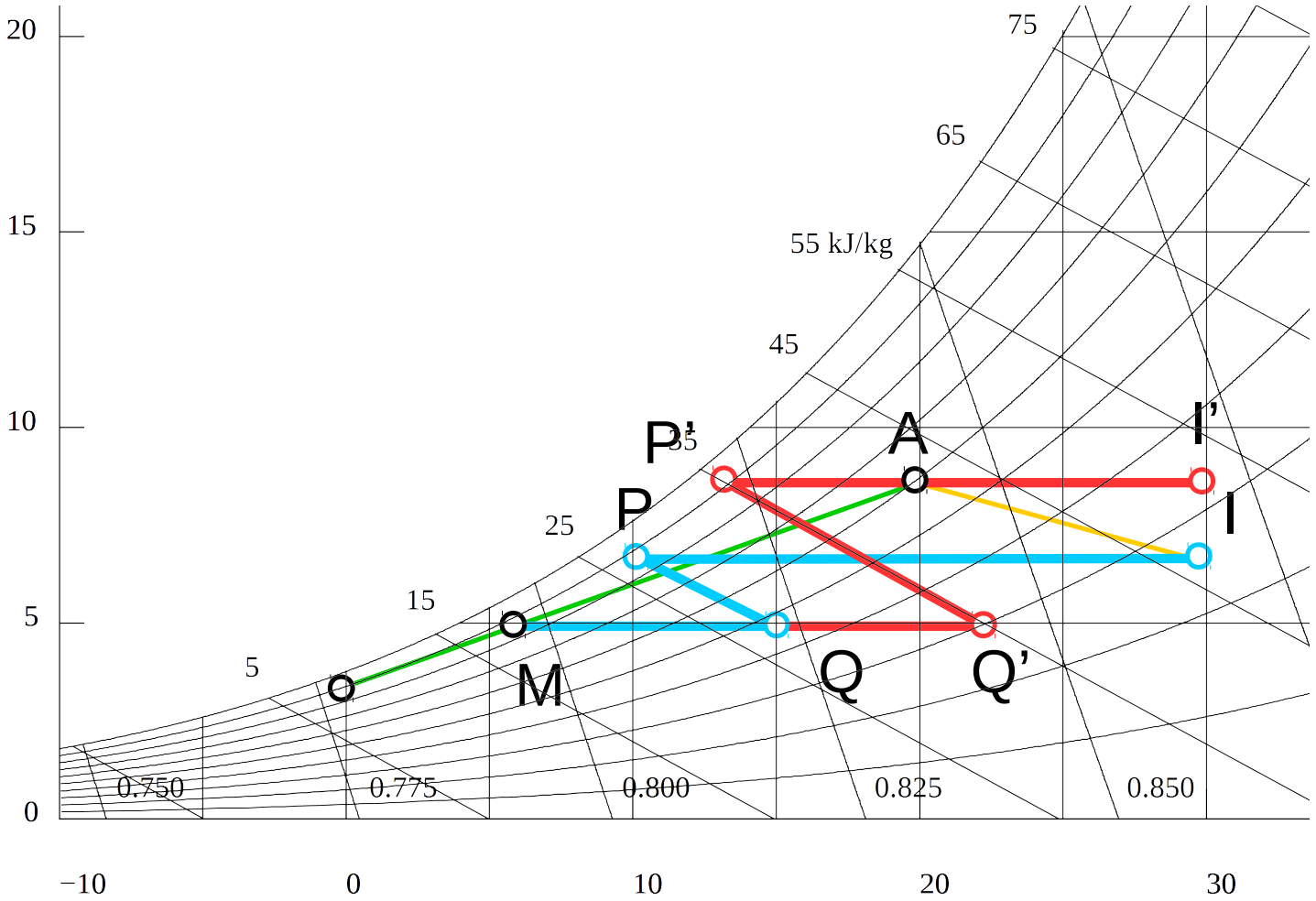
invernale

Caratteristiche

- batteria calda, può essere eventualmente utilizzata come fredda estiva
- di solito è alimentata da una caldaia
- determina l'umidità specifica del punto *I*
- è regolata da un sensore di umidità in ambiente

Ciclo Condizionamento Invernale

Carico latente nullo



Batteria di preriscaldamento

Invernale carico latente nullo

Lato aria

$$\Phi_{pre,MAX} = \dot{m}_{AI}(h_{Q'} - h_M) = \dot{m}_{AI} \cdot c_{p,aria}(\theta_{Q'} - \theta_M)$$

$$\Phi_{pre,MAX} = \dot{m}_{AI}\left[c_{pa}\theta_{P'} + x_M(r_o + c_{pv}\theta_{P'}) - c_{pa}\theta_M - x_M(r_o + c_{pv}\theta_M)\right]$$

$$\Phi_{pre,MAX} = \dot{m}_{AI}\left[c_{pa}(\theta_{Q'} - \theta_M) + x_M c_{pv}(\theta_{Q'} - \theta_M)\right]$$

$$\Phi_{pre,MAX} = \dot{m}_{AI}\left[c_{pau}(\theta_{Q'} - \theta_M)\right]$$

Lato acqua

$$\Delta\theta_{H_2O} = (\theta_m - \theta_r) = 10\ K$$

$$\Phi_{pre,MAX} = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta\theta$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{|\Phi_{pre,MAX}|}{c_{H_2O} \cdot 10}$$

Batteria fredda

Carico termico e latente massimo

Bilancio sulla batteria

$$|\Phi_{fr}^{-}| = \dot{m}_{AI}(h_M - h_P) - \dot{m}_L \cdot h_L$$

$$\dot{m}_L h_L \approx 0 \rightarrow |\Phi_{fr}^{-}| = \dot{m}_{AI}(h_M - h_P)$$

Scelta batteria

$$BF = \frac{(h_P - h_S)}{(h_M - h_S)}$$

$$(h_M - h_P) = (h_M - h_S) + (h_S - h_P)$$

$$(h_M - h_P) = (h_M - h_S)(1 - BF)$$

Lato acqua

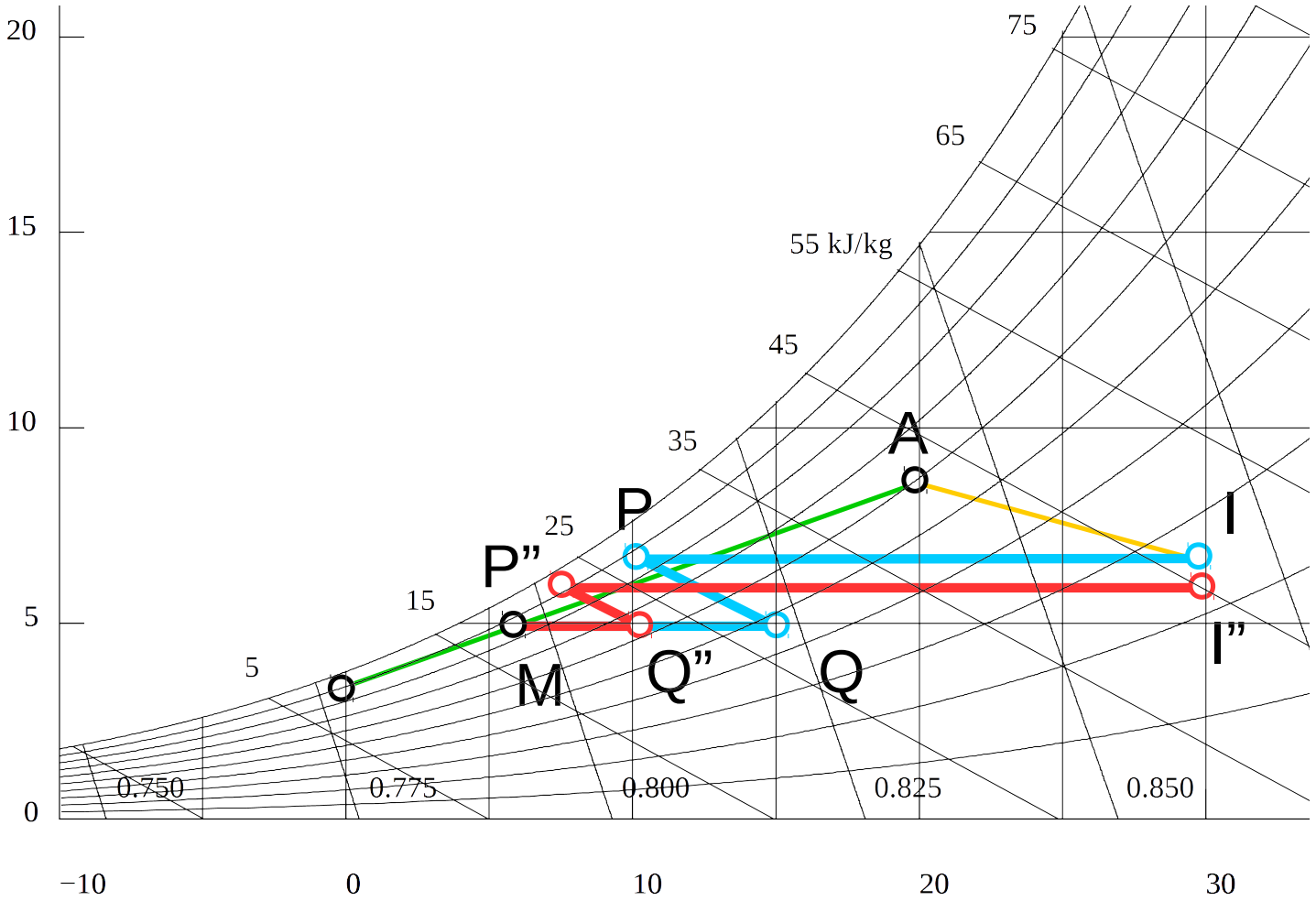
$$\Delta\theta_{H_2O} = |\theta_m - \theta_r| = 5\ K,\ \theta_m = 7^oC\ \theta_r = 12^oC$$

$$|\Phi_{fr}^{-}| = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta\theta_{H_2O}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{|\Phi_{fr}^{-}|}{c_{H_2O} \cdot \Delta\theta_{H_2O}}$$

Ciclo Condizionamento Invernale

Carico latente massimo



Batteria di postriscaldamento

invernale ed estiva

Invernale, carico latente massimo

$$\Phi_{post,max} = \dot{m}_{AI}(h_I - h_P) = \dot{m}_{AI} \cdot c_{pau}(\theta_I - \theta_P)$$

Lato acqua

$$\theta_m = 70^{\circ}C, \ \Delta\theta_{H_2O} = (\theta_m - \theta_r) \approx 10 \ K$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\Phi_{post,MAX}}{c_{H_2O} \cdot \Delta\theta_{H_2O}}$$

Portata in un impianto

Limiti

1. **Rinnovo d'aria minimo**, funzione del numero di persone e dell'attività svolta. L'aria di rinnovo è presa dall'esterno.
2. **Condizioni all'ingresso di** θ_I
3. **Qualità dell'aria interna**, per evitare stratificazione e ristagni d'aria. Va garantita una portata d'aria di lavaggio:
4. **valori da normativa**

Rinnova Aria minimo

$$\dot{m}_{AI} \geq \dot{m}_{rinn,min}$$

Calcolo della portata d'aria

temperatura di ingresso

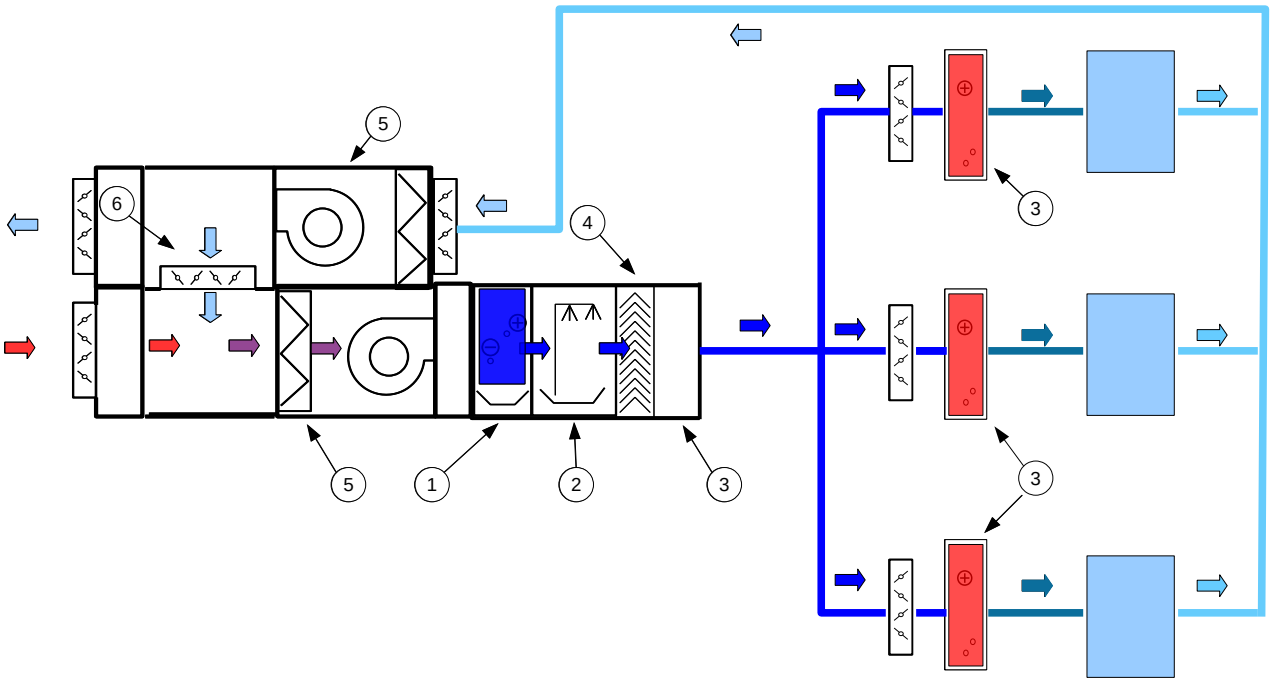
$$
\begin{aligned}
\Phi_{sen} &= \dot{m}_{AI} \cdot c_{pau} \cdot (\theta_A - \theta_I) \\
\dot{m}_{AI} &= \frac{|\Phi_{sen}|}{c_{pau} \cdot \Delta\theta} \\
\Delta\theta &\leq 20\ \mathrm{K}\ \textit{inverno} \\
\Delta\theta &\leq 10\ \mathrm{K}\ \textit{estate} \\
\dot{m}_{AI} &\geq max\{\dot{m}_{AI,inverno}, \dot{m}_{AI,estate}\}
\end{aligned}
$$

lavaggio

$$
\begin{aligned}
n_{lavaggio} &\geq 3\ volumi/ora \\
\dot{m}_{AI} &\geq 0,34 \cdot 3 \cdot V_{locale}
\end{aligned}
$$

Impianti a zone

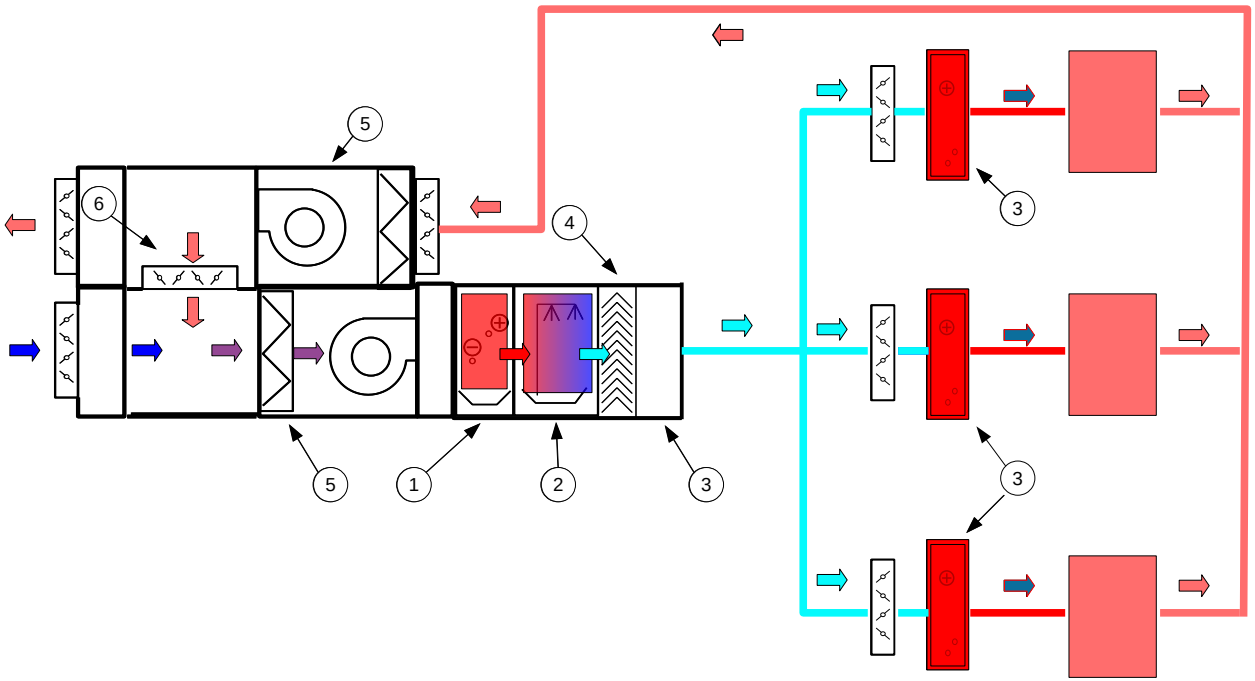
funzionamento estivo



1. Batteria fredda
2. umidificatore (disattivato)
3. Batteria postriscaldamento
4. separatore di gocce
5. filtri
6. ricircolo

Impianti a zone

funzionamento invernale



1. Batteria di preriscaldamento
2. saturatore adiabatico
3. Batteria postriscaldamento
4. separatore di gocce
5. filtri
6. ricircolo

Impianto a zone

Caratteristiche

- Controllo la temperatura di immissione
- Funziona bene se variano i carichi sensibili
- I carichi latenti devono essere uniformi
- devo garantire comunque il ricambio d'aria nell'ambiente con maggior richiesta

effetto del carico latente

$$\varphi_j \; AUMENTA \; se \; \Phi_{\lambda,j} > \Phi_{\lambda,medio}$$

$$\varphi_j \; DIMINUISCE \; se \; \Phi_{\lambda,j} < \Phi_{\lambda,medio}$$

Impianto a zone

ricambio dell'aria

calcolo portata d'aria

$$\dot{m}_{AI,j} \geq max\{\dot{m}_{rinn,min,j}, \dot{m}_{AI,inverno,j}, \dot{m}_{AI,estate,j}, \dot{m}_{lavaggio,j}\}$$

$$\dot{m}_{AI} = \sum \dot{m}_{AI,j}$$

calcolo portata di rinnovo

$$R_j = \frac{\dot{m}_{rinn,min,j}}{\dot{m}_{AI,j}}$$

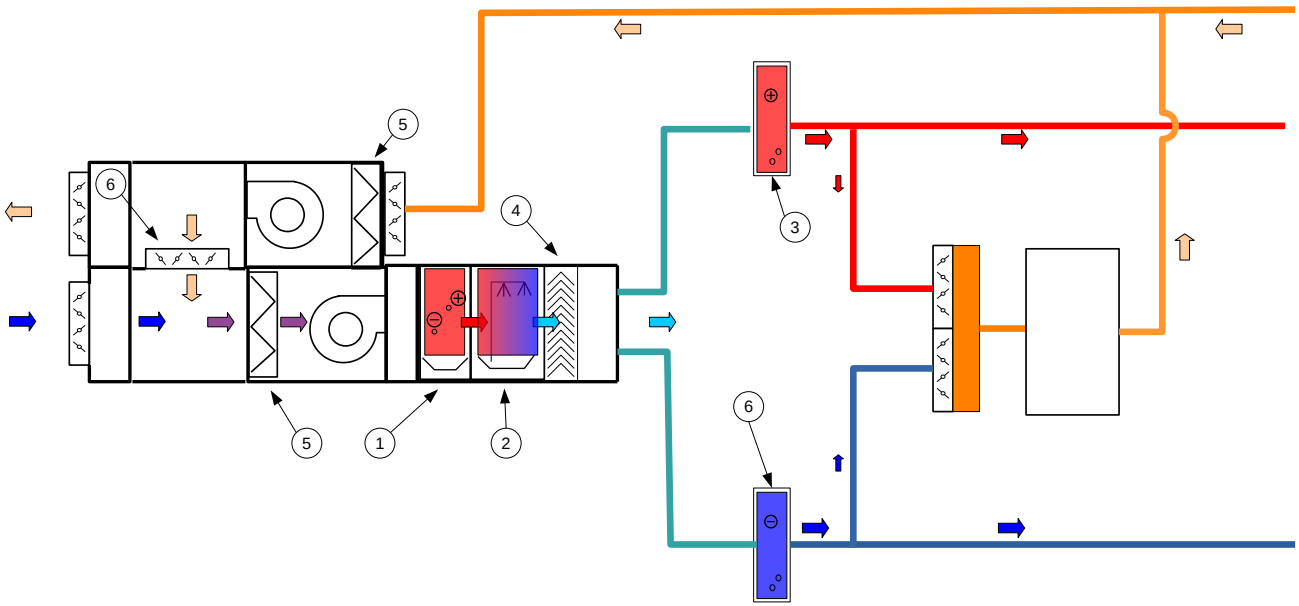
$$R_{j,max} = R_{j,tot} = \frac{\dot{m}_{rinn,tot}}{\dot{m}_{AI}}$$

$$\dot{m}_{rinn,tot} = R_{j,max} \cdot \dot{m}_{AI}$$

aumenta il consumo energetico perché il rinnovo d'aria sarà maggiore del minimo necessario in quasi tutti i locali.

Impianti a zone

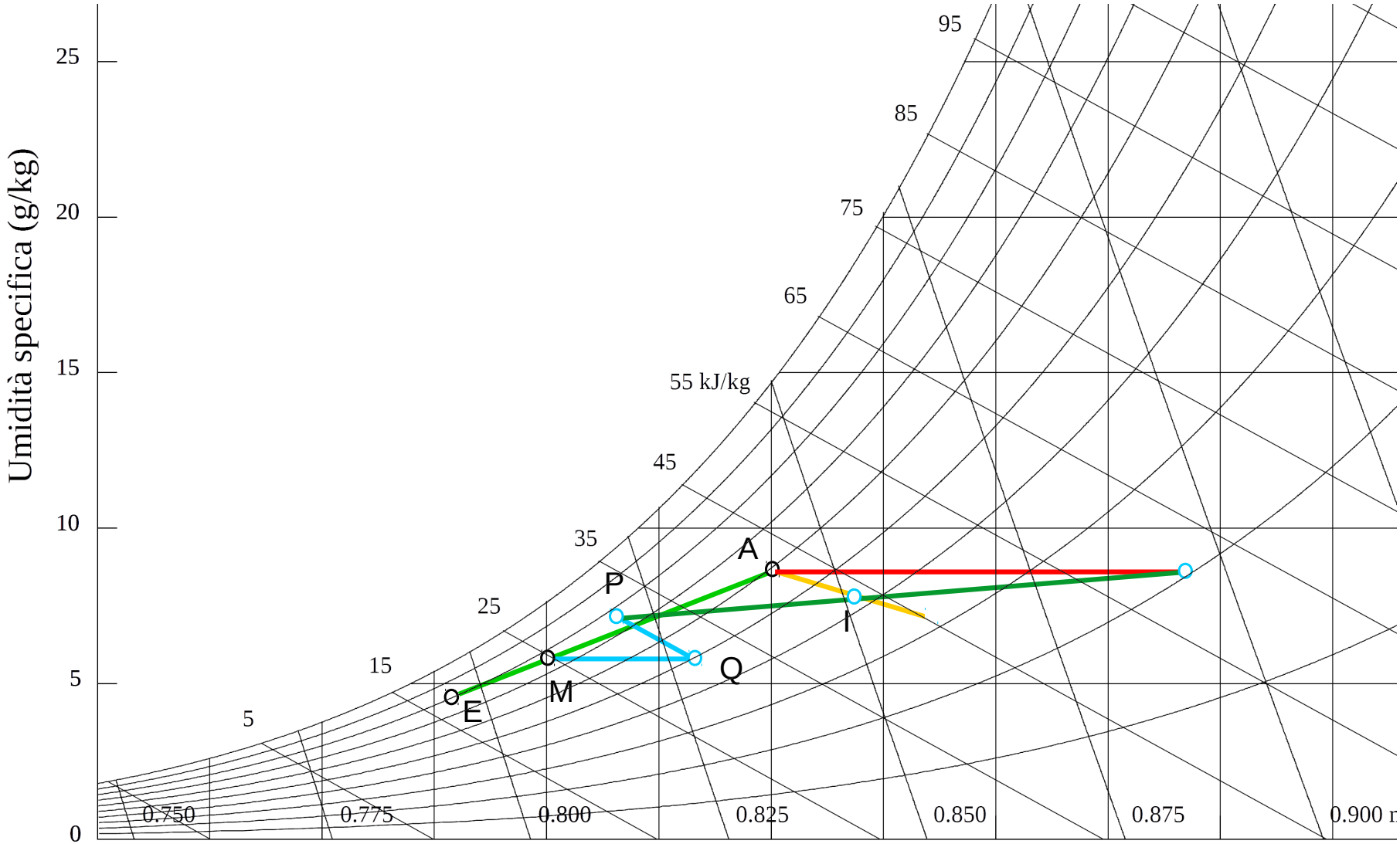
funzionamento invernale



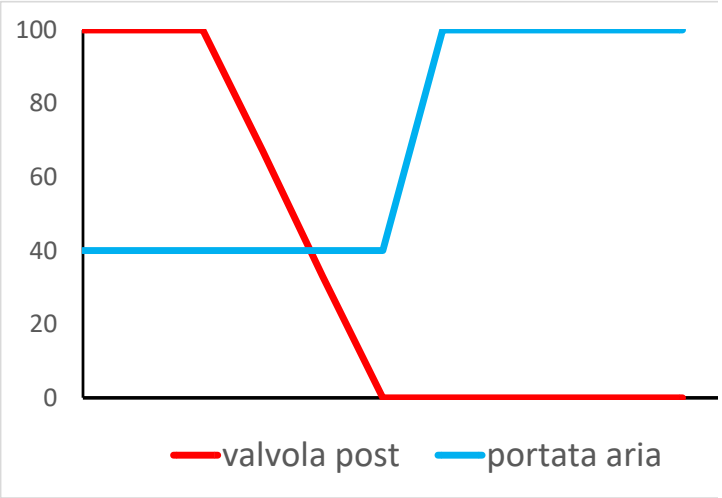
1. Batteria di preriscaldamento
2. saturatore adiabatico
3. Batteria postriscaldamento
4. separatore di gocce
5. filtri
6. batteria fredda

Impianti a zone

impianti a due condotte



Impianti VAV



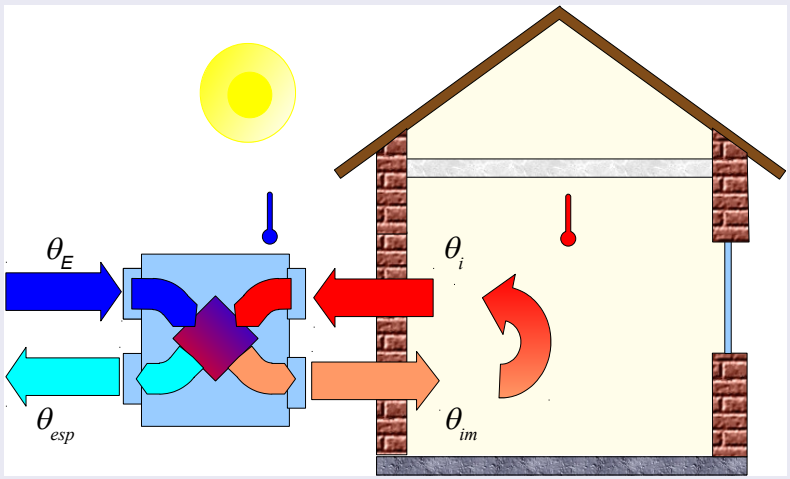
- faccio variare la portata con il carico
- se il carico diminuisce diminuisco la portata
- utilizzo ventilatori con inverter e serrande
- la portata diminuisce sino circa al 40
- non dimunuisco ulteriormente per garantire il funzionamento delle bocchette
- dopo apro la valvola della batteria di postriscaldamento
- in inverno lavoro con la portata minima

Il recupero termico

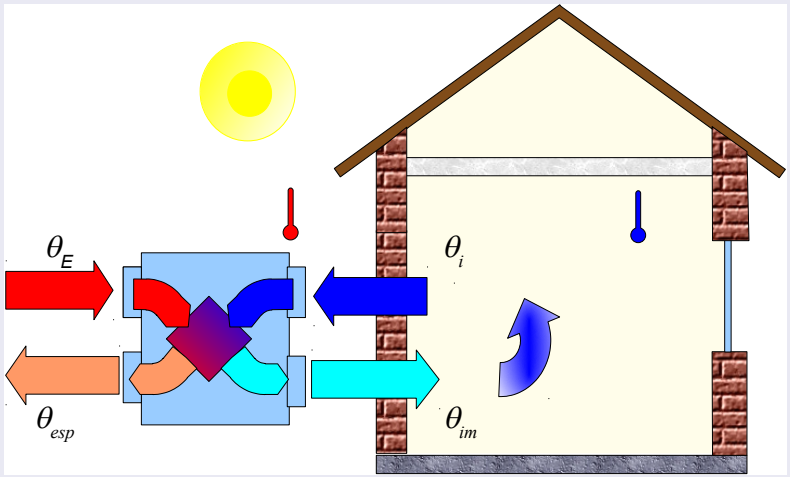
Il recupero termico

- oltre alla miscelazione posso recuperare energia con scambiatori
- permettono di recuperare parte dell'energia che altrimenti sarebbe dispersa nell'ambiente

Invernale



estivo



Recuperatori di calore

efficienza

- i recuperatori sono caratterizzati dall'efficienza
- l'efficienza è il rapporto tra flusso scambiato ed il massimo scambiabile
- sono scambiatori di calore con uguali portate termiche di flusso

$$\eta_V = \frac{\Phi_r}{\Phi_{r,max}} = \frac{c_{psu} \cdot (\theta_{su} - \theta_e)}{c_{pint} \cdot (\theta_{int} - \theta_e)}$$