

Impianti di Condizionamento

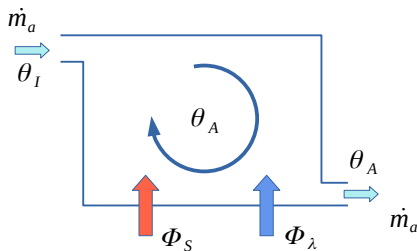
Marco Manzan

Università di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura

ottobre 2025

Impianto tutt'aria

Bilancio Ambiente



bilancio massa e energia

$$(\dot{m}_a)_u = (\dot{m}_a)_e$$

$$(\dot{m}_{av})_u = (\dot{m}_{av})_e + \dot{m}_v$$

$$m_a \cdot x_A = m_a \cdot x_I + \dot{m}_v$$

$$\dot{m}_a \cdot h_u = \dot{m}_a \cdot h_I + \Phi_S + \Phi_\lambda$$

Retta d'esercizio

Pendenza Retta

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

$$\dot{m}_v = \dot{m}_a \cdot (x_A - x_I)$$

$$\frac{\Phi_{tot}}{\dot{m}_v} = \frac{h_A - h_I}{x_A - x_I}$$

Invernale

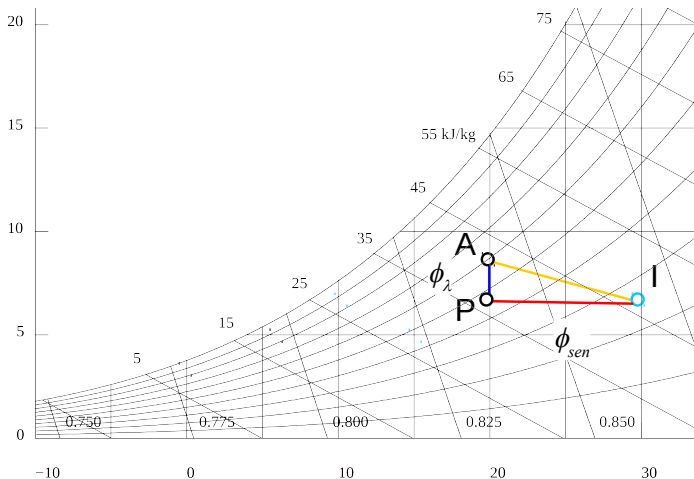
$$\Phi_S < 0; \Phi_\lambda > 0 \implies \Phi_{tot} < 0; \quad \frac{h_A - h_I}{x_A - x_I} = \frac{\Phi_{tot}}{\dot{m}_v} < 0$$

Estivo

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

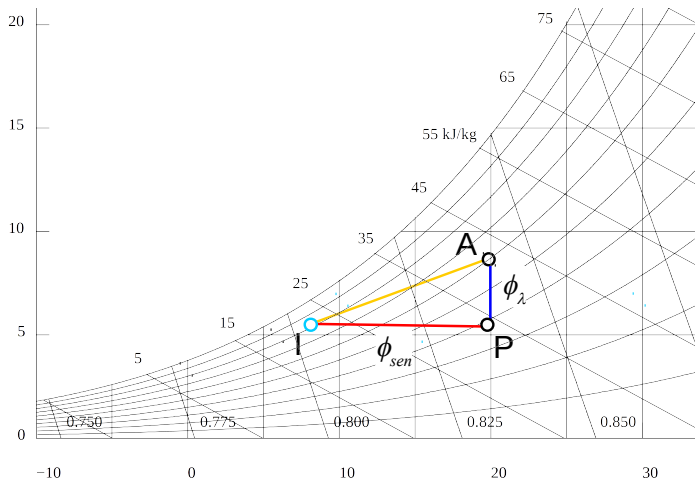
Carico Sensibile e latente

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

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

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

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

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

SHR Sensible heat ratio

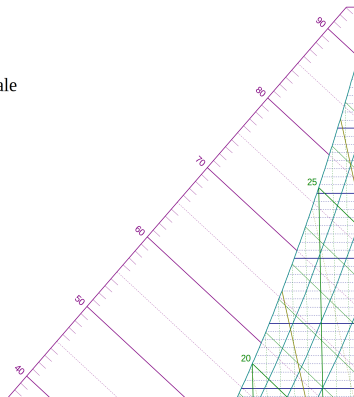
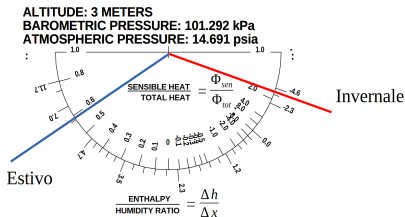
- La pendenza della retta d'esercizio può essere indicata anche dal Sensible Heat Ratio *SHR*, definito come il rapporto tra carico sensibile su carico totale

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

- nel diagramma ASHRAE sono riportate entrambe le pendenze

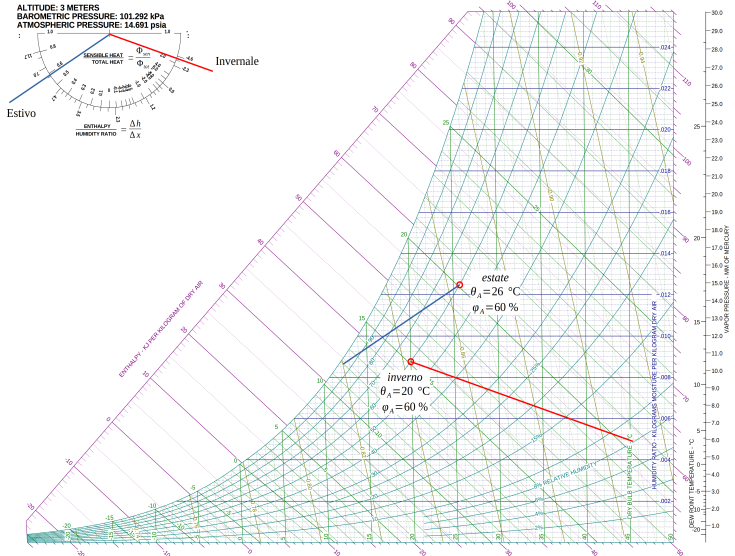
Retta d'esercizio

Cartiglio Retta d'esercizio e SHR su diagramma ASHRAE



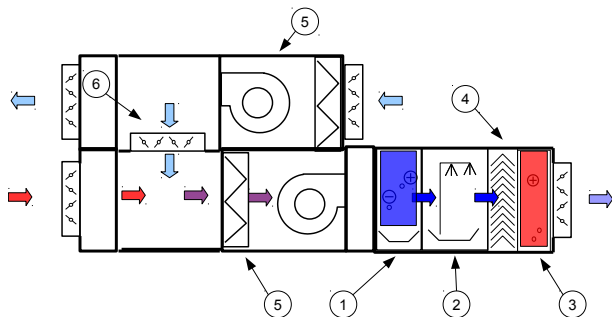
Retta d'esercizio

Retta d'esercizio e SHR su diagramma ASHRAE



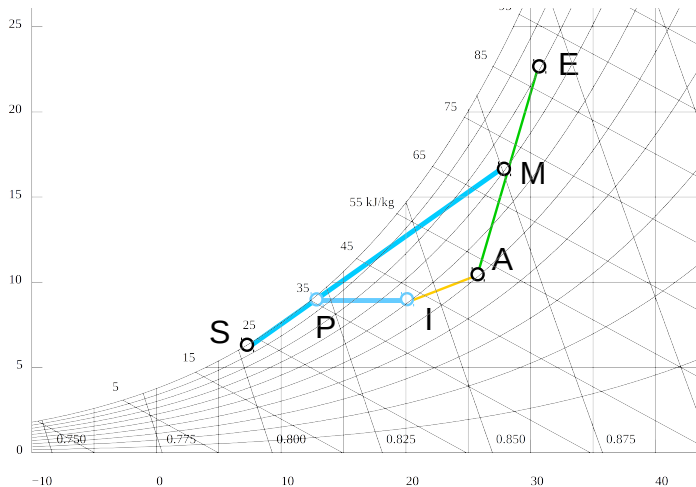
Unità di Trattamento Aria - UTA

Estivo

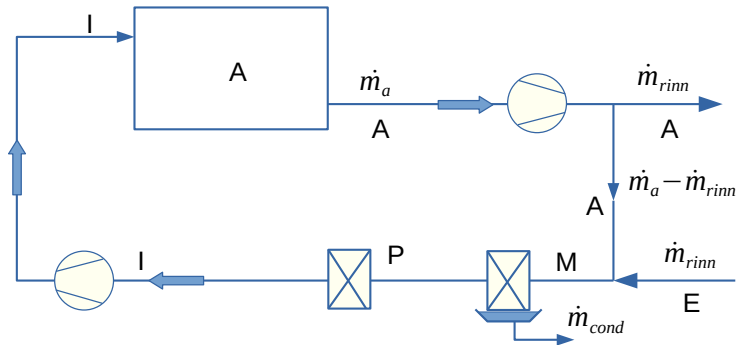


- ❶ Batteria fredda
- ❷ umidificatore (disattivato)
- ❸ Batteria postriscaldamento
- ❹ separatore di gocce
- ❺ filtri
- ❻ ricircolo

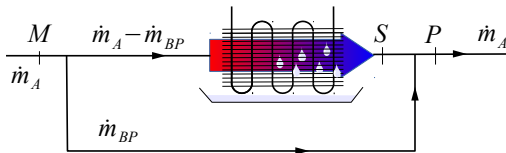
Ciclo Condizionamento Estivo



Schema Funzionamento Estivo



Fattore di Bypass



Miscelamento

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

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

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

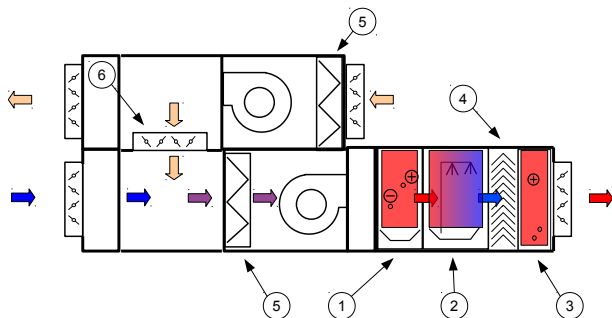
$$BF = \frac{(h_P - h_S)}{(h_M - h_S)} \approx \frac{(\theta_P - \theta_S)}{(\theta_M - \theta_S)}$$

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

n numero di ranghi della batteria

Unità di Trattamento Aria - UTA

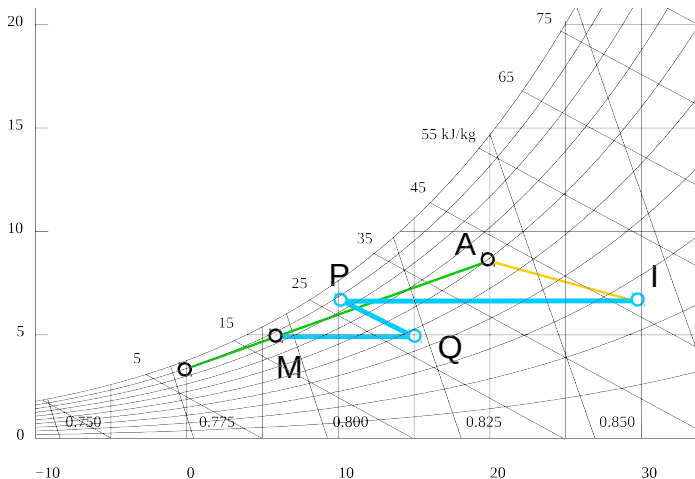
funzionamento invernale



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

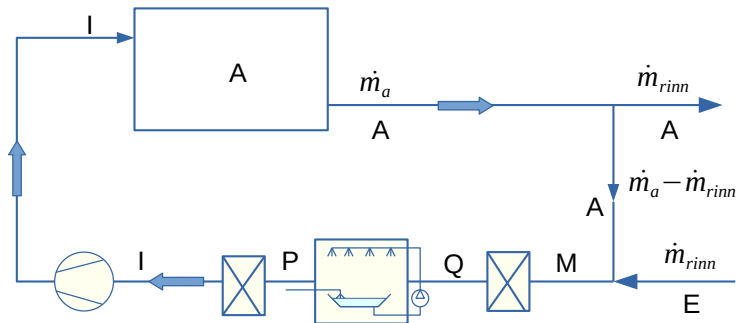
Ciclo Condizionamento Invernale

Condizioni di progetto



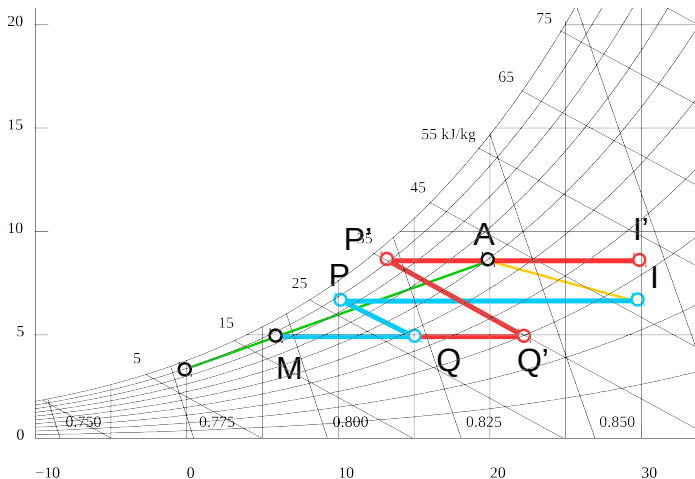
Schema Condizionamento Invernale

Umidificazione Adiabatica



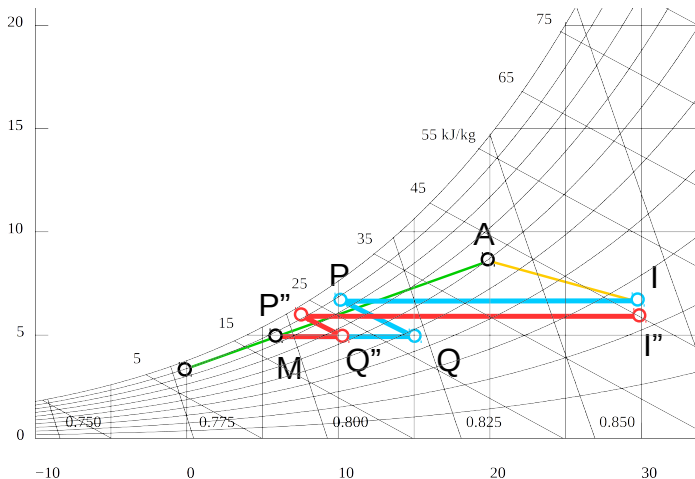
Ciclo Condizionamento Invernale

Carico latente nullo



Ciclo Condizionamento Invernale

Carico latente massimo



Saturatore adiabatico

Air Washer

Caratteristica del Saturatore

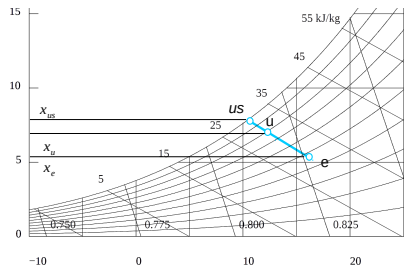
Il saturatore adiabatico è caratterizzato dalla sua efficienza

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

x_e, θ_e umidità specifica e temperatura in entrata

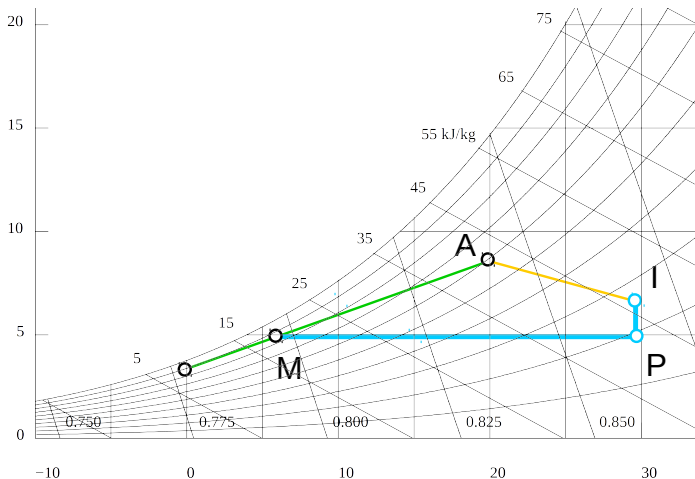
x_u, θ_u umidità specifica e temperatura in uscita

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



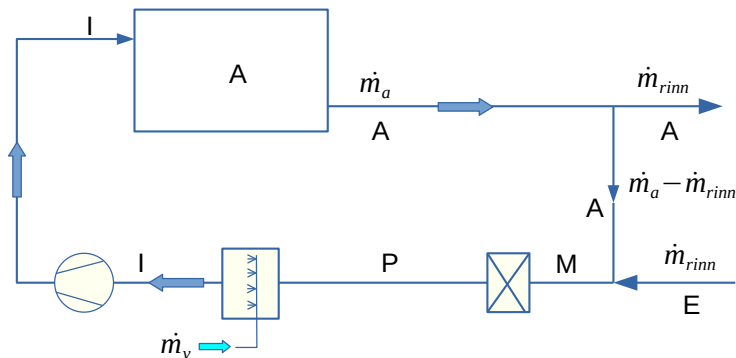
Ciclo Condizionamento Invernale

Umidificazione a vapore



Schema Funzionamento Invernale

Umidificazione a Vapore



Batteria di preriscaldamento

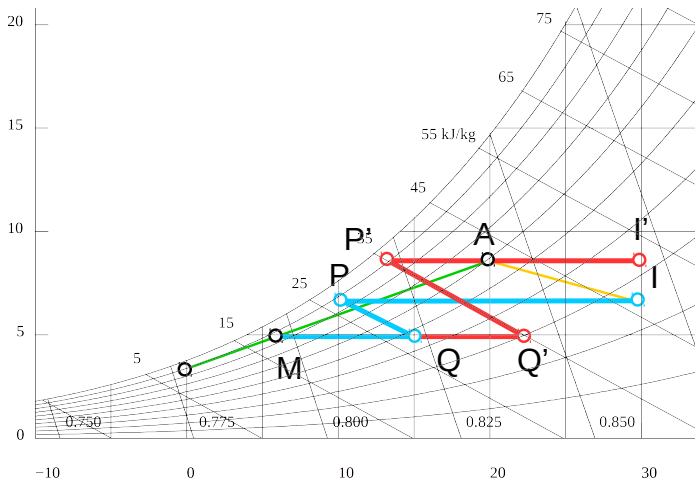
invernale

Caratteristiche

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

Ciclo Condizionamento Invernale

Carico latente nullo



Batteria di preriscaldamento

Invernale carico latente nullo

Lato aria

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

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

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

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

Lato acqua

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

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

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

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

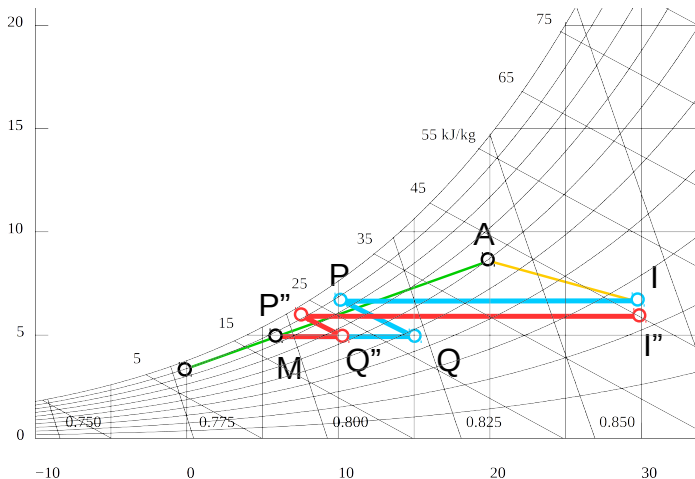
$$\Delta\theta_{H_2O} = |\theta_m - \theta_r| = 5 \text{ K}, \theta_m = 7^\circ\text{C} \theta_r = 12^\circ\text{C}$$

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

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

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

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

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

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_l**
- 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

$$\Phi_{sen} = \dot{m}_{AI} \cdot c_{pau} \cdot (\theta_A - \theta_I)$$

$$\dot{m}_{AI} = \frac{|\Phi_{sen}|}{c_{pau} \cdot \Delta\theta}$$

$$\Delta\theta \leq 20 \text{ K } \textit{inverno}$$

$$\Delta\theta \leq 10 \text{ K } \textit{estate}$$

$$\dot{m}_{AI} \geq \max\{\dot{m}_{AI,\textit{inverno}}, \dot{m}_{AI,\textit{estate}}\}$$

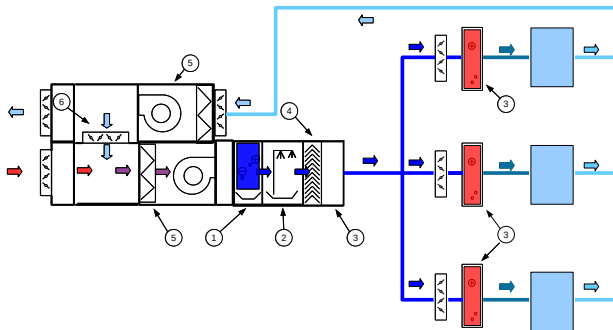
lavaggio

$$n_{lavaggio} \geq 3 \text{ volumi/ora}$$

$$\dot{m}_{AI} \geq 0,34 \cdot 3 \cdot V_{locale}$$

Impianti a zone

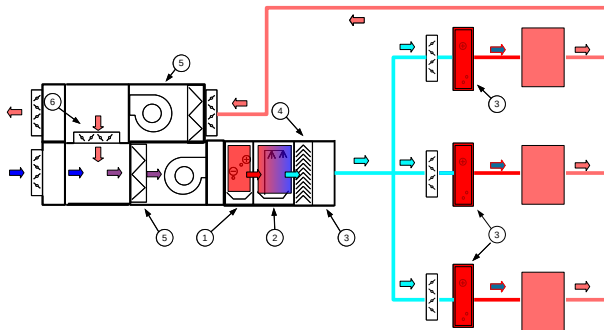
funzionamento estivo



- ❶ Batteria fredda
- ❷ umidificatore (disattivato)
- ❸ Batteria postriscaldamento
- ❹ separatore di gocce
- ❺ filtri
- ❻ ricircolo

Impianti a zone

funzionamento invernale



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

Caratteristiche

- il trattamento dell'aria è centralizzato nell'UTA
- 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

φ_j *aumentase* $\Phi_{\lambda,j} > \Phi_{\lambda,medio}$

φ_j *diminuisce* $\Phi_{\lambda,j} < \Phi_{\lambda,medio}$

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

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

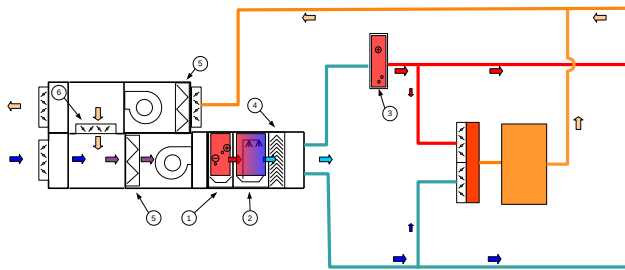
$$R_{j,max} = R_{j,tot} = \frac{\dot{m}_{rinn,tot}}{\dot{m}_{AI}}$$

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

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

Impianti a zone

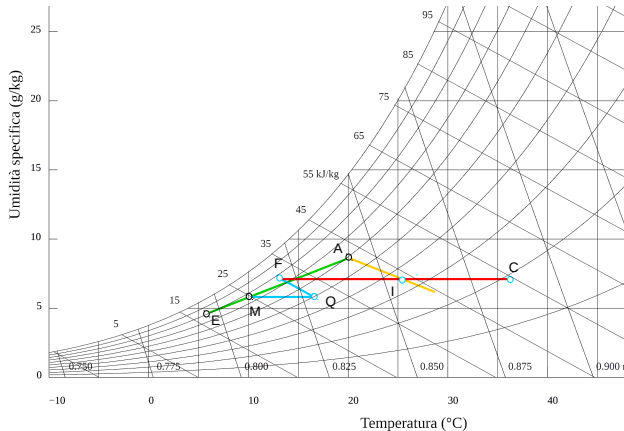
due condotte funzionamento invernale



- ① Batteria di pre riscaldamento
- ② saturatore adiabatico
- ③ Batteria postriscaldamento
- ④ separatore di gocce
- ⑤ filtri

Impianti a zone

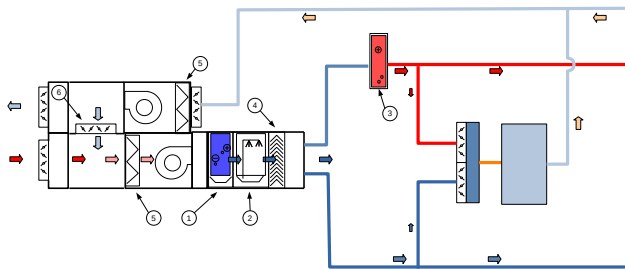
due condotte funzionamento invernale



- 1 Batteria di pre riscaldamento
- 2 saturatore adiabatico
- 3 Batteria postriscaldamento
- 4 separatore di gocce
- 5 filtri

Impianti a zone

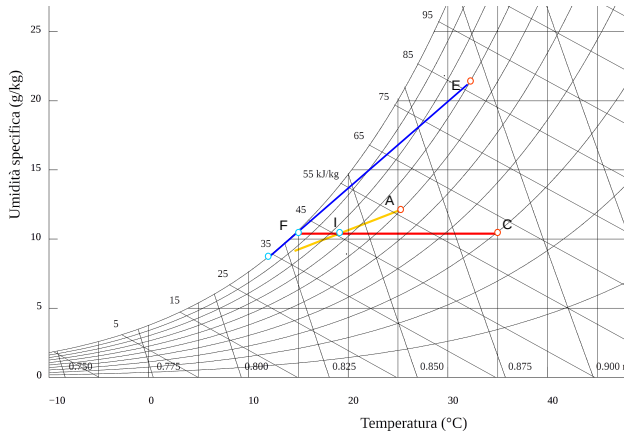
due condotte funzionamento estivo



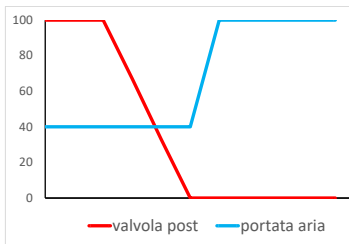
- ① Batteria di raffreddamento
- ② saturatore adiabatico
- ③ Batteria postiscaldamento
- ④ separatore di gocce
- ⑤ filtri

Impianti a zone

due condotte funzionamento estivo



- 1 Batteria di pre riscaldamento
- 2 saturatore adiabatico
- 3 Batteria postriscaldamento
- 4 separatore di gocce
- 5 filtri



- 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 diminuisco ulteriormente per garantire il funzionamento delle bocchette
- dopo apro la valvola della batteria di postriscaldamento
- in inverno lavoro con la portata minima