



# La progettazione degli impianti di climatizzazione negli edifici

**Anna Magrini**

Uno strumento indispensabile per tutti coloro che devono progettare, realizzare e installare impianti di climatizzazione negli edifici. Non si tratta di un'operazione semplice. Soprattutto se imprese, consulenti, progettisti e installatori devono intervenire su immobili già esistenti o effettuare delle ristrutturazioni. Infatti, mentre la progettazione ex novo risulta relativamente facile, essendo possibile una completa integrazione con il progetto globale, spesso sorgono molte difficoltà quando bisogna fare i conti con i vincoli restrittivi e condizionanti legati ad una distribuzione degli spazi complessa e articolata. In questo caso è fondamentale studiare soluzioni ad hoc e calare i progetti nella realtà pre-esistente.

La guida risponde proprio a questa esigenza, offrendo un esame a tappe dei diversi tipi di impianto a disposizione degli utenti in funzione delle esigenze e delle disponibilità di spazio. Con l'obiettivo di arrivare ad un dimensionamento di massima dell'apparato che permetta anche la definizione degli ingombri e la localizzazione delle diverse apparecchiature.

---

## CAPITOLO 2

# IL CALCOLO DEL FABBISOGNO TERMOIGROMETRICO DEGLI EDIFICI



QUADERNI  
per la progettazione

Un ambiente confinato è in rapporto continuo con il contesto climatico esterno attraverso l'involucro che svolge una funzione di smorzamento e attenuazione delle variazioni esterne. L'impianto di climatizzazione deve garantire che i parametri ambientali rimangano entro certi limiti inalterati nell'ambiente interno, al fine di garantire le condizioni di benessere.

Il dimensionamento dell'impianto deve essere quindi basato sulla valutazione dei carichi termici nelle condizioni più gravose. Per carichi termici si intendono i flussi termici sensibili (corrispondenti ad una differenza di temperatura) e latenti (dovuti ad una differenza di grado igrometrico, per effetto per esempio di produzione di vapore nell'ambiente, non corrispondente ad un'effettiva variazione della temperatura dell'ambiente circostante) a cui l'impianto deve far fronte per assicurare determinate condizioni ambientali.

In sintesi, la progettazione di un impianto di condizionamento, una volta fissate le condizioni di temperatura e umidità relativa ottimali per l'ambiente (condizioni interne di progetto), può essere sviluppata secondo alcune fasi:

1. determinazione dei carichi termoigrometrici (scambi di energia e di vapore tra l'ambiente e l'esterno);
2. determinazione delle condizioni dell'aria in ingresso nell'ambiente (portata, temperatura, umidità relativa e purezza dell'aria da immettere nel locale per mantenere in esso le condizioni di progetto);
3. definizione dei processi cui deve essere sottoposta l'aria di immissione;
4. scelta delle apparecchiature atte a realizzare i processi definiti; dimensionamento della rete dei condotti di distribuzione dell'aria; scelta dei sistemi di controllo e di regolazione dell'impianto.

I primi due punti verranno trattati qui di seguito, il terzo punto verrà sviluppato nel Capitolo 4, mentre nel Capitolo 5 verranno accennate alcune considerazioni in merito all'ultimo punto.

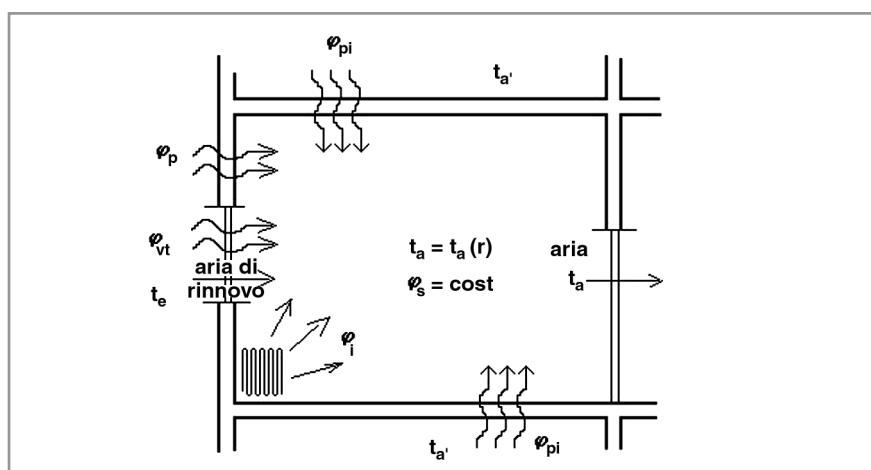
## 2.1 Determinazione dei carichi termoigrometrici

Dalle considerazioni sul benessere termoigrometrico, si possono scegliere i valori di temperatura e umidità relativa più idonei in relazione alle attività che vengono svolte all'interno degli ambienti. Questo costituisce il punto di partenza per la valutazione dei carichi energetici che vengono scambiati attraverso l'involucro edilizio.

L'ambiente risulta in generale interessato ai seguenti scambi termici variabili in funzione del tempo ( $\tau$ ):

1. scambio termico  $\varphi_p = f(\tau)$  per trasmissione attraverso la parete perimetrale con l'ambiente esterno a temperatura  $t_e$  variabile nel tempo. Si dovrà tenere in debito conto l'effetto dell'eventuale irraggiamento solare sulla superficie esterna della parete, variabile nel tempo;
  2. scambio termico  $\varphi_{pi} = f(\tau)$  per trasmissione attraverso le pareti che separano gli ambienti adiacenti, quando esistano tra loro differenze di temperatura;
  3. scambio termico  $\varphi_{vt} = f(\tau)$  per trasmissione diretta della radiazione solare attraverso la superficie vetrata;
  4. scambio termico  $\varphi_v = f(\tau)$  tra aria interna ed esterna in seguito al rinnovo d'aria naturale, dovuto per esempio ad infiltrazioni di aria esterna attraverso gli infissi;
  5. scambio termico  $\varphi_s = f(\tau)$  dovuto alla presenza di sorgenti termiche all'interno dell'ambiente (persone, sorgenti luminose, etc.);
  6. scambio termico  $\varphi_i = f(\tau)$  dovuto all'impianto.

## Figura 2.1 Bilancio termico dell'ambiente



L'azione dell'impianto (al fine di mantenere costante la temperatura  $t_a$ ) deve essere quella di compensare tutti i flussi interessanti il sistema:

$$\varphi_i = f(\tau) = \varphi_p + \varphi_{vt} + \varphi_s + \varphi_v + \varphi_{pi}$$

Nel calcolo in regime invernale è possibile trascurare qualche contributo (sorgenti termiche interne, radiazione solare), che in estate invece diventa significativo.

Inoltre in inverno la temperatura dell'aria esterna può assumersi costante (anche perché molto differente da quella interna), mentre in estate diventano più importanti le variazioni di temperatura che si hanno nell'arco della giornata.

Per valutare quindi i flussi sensibili in regime estivo sono disponibili diversi metodi semplificati (metodo dei fattori di accumulo, delle funzioni di trasferimento, etc) che permettono il calcolo della potenza necessaria nelle varie ore della giornata. L'impianto di condizionamento andrà dimensionato in base ai carichi massimi individuati.

Una volta calcolato il flusso totale (latente e sensibile) richiesto dall'ambiente, questo corrisponderà al flusso  $\varphi_i$  che deve essere fornito dall'impianto.

## 2.2 Determinazione delle condizioni dell'aria in ingresso nell'ambiente

Il controllo delle condizioni termoigometriche dell'aria viene ottenuto introducendo nell'ambiente una portata d'aria caratterizzata da un adeguato stato termodinamico (che corrisponde per esempio a coppie di valori del tipo  $x_i, t_i$ ), che permette quindi di mantenere nell'ambiente uno stato di progetto ben definito, individuato per esempio da  $t_a$  e  $x_a$  (oppure  $t_a$  e  $i_a$ ).

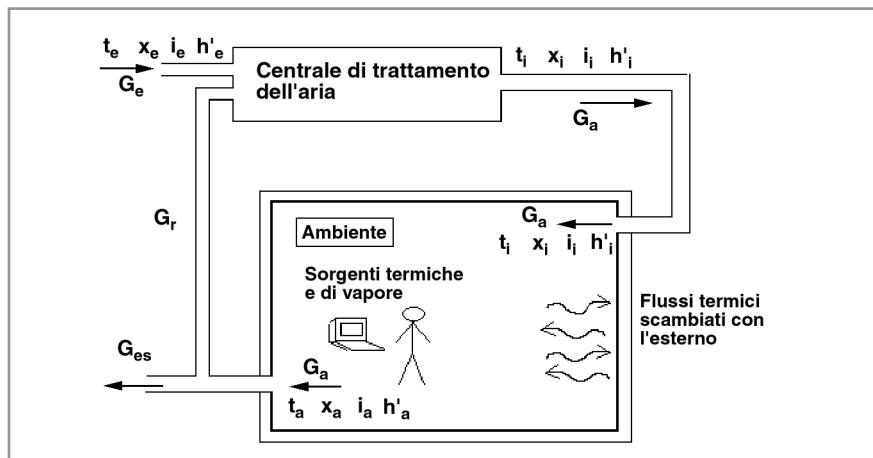
La portata d'aria  $G_a$  immessa nell'ambiente (stato termodinamico  $t_i$  e  $x_i$ ) è il risultato di due contributi:

- la portata di aria (esterna) di rinnovo  $G_e$  (stato  $t_e$  e  $x_e$ );
- l'aria di ricircolo  $G_r$  che rappresenta parte della portata ripresa dagli ambienti (stato  $t_a$  e  $x_a$ ).

Attraverso l'impianto di condizionamento passa una portata  $G_a = G_e + G_r$  di aria secca che deve essere portata alle condizioni  $t_i$  e  $x_i$ . Queste condizioni vengono determinate in funzione del carico termico calcolato nella fase precedente.



**Figura 2.2**  
Schema di circolazione dell'aria trattata dall'impianto



### 2.2.1 Bilancio di massa dell'aria nell'ambiente

Ipotizzando condizioni di regime stazionario, almeno in riferimento a periodi di tempo limitati (ad esempio ora per ora), noti gli apporti di vapore nell'ambiente, si può impostare un bilancio tra la portata di vapore che viene immessa nell'ambiente ( $G_{vi}$ ), quella che vi viene prodotta ( $g_v$ ) e quella che viene estratta dall'ambiente (nelle condizioni dell'ambiente,  $G_{va}$ ):

$$G_{va} - G_{vi} = g_v$$

Dalla relazione che esprime il grado igrometrico in funzione del rapporto tra masse di vapore e di aria secca ( $x = G_v / G_a$ ), si può anche scrivere:

$$G_a (x_a - x_i) = g_v$$

### 2.2.2 Bilancio energetico dell'ambiente

Oltre al bilancio di vapore si può impostare un bilancio di energia (sempre ipotizzando condizioni di regime stazionario) con il quale si può esprimere il flusso termico che l'aria scambia nel suo transito attraverso l'ambiente come:

$$\varphi_T = G_a (h'_a - h'_i)$$

Considerando i flussi termici prima indicati, che complessivamente portano alla determinazione del flusso termico totale (sensibile e latente)  $\varphi_i$ , si avrà:

$$\varphi_i = \varphi_T$$

Le due equazioni di bilancio ottenute (bilancio di vapore e di energia) presentano tre grandezze incognite da determinarsi e cioè la portata d'aria  $G_a$  e le condizioni termoigrometriche dell'aria da immettere nell'ambiente  $h'_i, x_i$ . Tutte le altre grandezze e cioè  $\varphi_T, g_v, h'_a, x_a$  risultano note:

$$g_v = G_a (x_a - x_i) \quad \text{e} \quad \varphi_i = \varphi_T = G_a (h'_a - h'_i)$$

Per risolvere il problema, altrimenti indeterminato, occorre fissare una delle variabili e cioè per esempio la portata d'aria secca  $G_a$  oppure una delle due grandezze che consentono di determinare univocamente lo stato termodinamico dell'aria da immettere nell'ambiente  $h'_i, x_i$ .

La soluzione di questo sistema, effettuata in corrispondenza all'ora del giorno più critica perché caratterizzata dai carichi termici ed igrometrici più elevati, consente di determinare la portata  $G_a$  e lo stato dell'aria di immissione  $h'_i, x_i$  in grado di compensare esattamente il flusso sensibile  $\varphi_{sen}$  e latente  $\varphi_{lat}$ , o, in altre parole,  $\varphi_{sen}$  e la produzione di vapore  $g_v$ .

Per i periodi di tempo nei quali i carichi termici risultano minori, opportuni dispositivi di controllo intervengono regolando l'entità degli scambi (termici e di vapore) nell'impianto, al fine di adattare lo stato termodinamico dell'aria immessa nell'ambiente alle diverse condizioni. Nell'ambiente si avranno comunque piccole oscillazioni di  $t_a, x_a$  in genere compensate (con una certa inerzia) dal sistema di regolazione dell'impianto.

Per risolvere il sistema di equazioni prima ottenuto si può prefissare, piuttosto che una delle grandezze  $G_a, h'_i, x_i$ , la temperatura di immissione  $t_i$  indicativamente sulla base dei seguenti criteri:

- stagione invernale:  $t_i \approx t_a + 20^\circ\text{C}$
- stagione estiva:  $t_i \approx t_a - 10^\circ\text{C}$

In ogni caso è necessario verificare che il valore di  $t_i$  stabilito sia tale da non comportare una portata di aria di rinnovo troppo ridotta per poter garantire un'adeguata purezza dell'aria negli ambienti.

Poiché la portata oraria  $G_e$  di aria esterna che si deve fornire è proporzionale al numero di persone presenti nell'ambiente dovrà ovviamente risultare:

$$G_a > G_e = \rho_e G'_e / 3600 \quad [\text{kg/s}]$$

dove con  $\rho_e$  si è indicata la densità dell'aria esterna, ottenibile indicativa-



mente, in funzione della temperatura, dalla seguente relazione:

$$\rho_e = 354.2 / T \text{ [kg/m}^3\text{]} \text{ (temperatura } T \text{ in Kelvin)}$$

Se la condizione relativa alla purezza dell'aria non viene soddisfatta, occorre prefissare un diverso valore di  $t_i$ .

Anche se questo problema può essere risolto attraverso le due equazioni considerate, per una rapida verifica si può fare riferimento a soluzioni di tipo grafico sui diagrammi psicrometrici.

A questo scopo si introduce il rapporto  $R$  definito nel modo seguente:

$$R = \varphi_T / g_v = (\varphi_{sen} + \varphi_{lat}) / g_v = G_a (h'_a - h'_i) / G_a (x_a - x_i) = \Delta h' / \Delta x$$

L'aria viene introdotta nell'ambiente nello stato termodinamico  $i$  (definito ad esempio da  $h'_i$ ,  $x_i$ ) e qui si trasforma fino allo stato  $a$  (definito da  $h'_a$ ,  $x_a$ ). La trasformazione dell'aria all'interno del locale, rappresentata sul diagramma dell'aria umida mediante un segmento di retta, ha una pendenza rappresentata proprio dal rapporto  $R = \Delta h' / \Delta x$ . La retta stessa viene definita retta di carico.

Il flusso latente ( $\varphi_{lat}$ ) risulta sempre positivo mentre il flusso sensibile ( $\varphi_{sen}$ ) è tipicamente positivo nel regime estivo e negativo in quello invernale; in genere quest'ultimo risulta numericamente preponderante rispetto al primo per cui è  $R > 0$  nel regime estivo e  $R < 0$  nel regime invernale.

Nei diagrammi solitamente è riportato il valore di  $R$  su un quadrante apposito oppure lungo la cornice del diagramma stesso (Figure 1.7, 1.8, 2.3). Per poter tracciare la retta di carico, nel diagramma ASHRAE, l'inclinazione corrispondente al valore di  $R$  si definisce a partire centro della semicirconferenza fino al valore indicato sul bordo del quadrante: il segmento così tracciato si trasla fino al punto definito nel diagramma per il quale deve passare (punto rappresentativo dello stato dell'ambiente).

Sul diagramma di Mollier la pendenza della retta di carico si individua tracciando la congiungente l'origine degli assi con il segmento sulla cornice, che riporta il valore calcolato di  $R$ ; si trasla quindi il segmento così individuato fino a passare per il punto rappresentativo delle condizioni dell'ambiente.

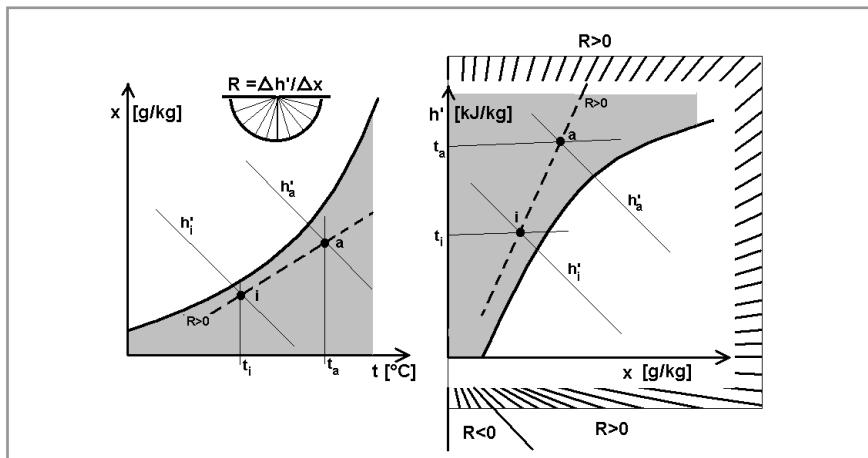
Lo stato  $i$  è individuato sul diagramma come punto di incrocio tra la retta di pendenza  $R > 0$  passante per  $a$  e l'isoterma a  $t_i$ .

Nei problemi applicativi si parte solitamente dalla conoscenza o dal presupposto di realizzare un determinato stato dell'aria ambiente e dalla conoscenza del flusso termico, sensibile e latente, che l'impianto deve fornire e quindi della pendenza  $R$  della retta di carico. Il calcolo viene solitamente effettuato prima nelle condizioni estive e poi invernali, in quanto la portata di aria

necessaria per bilanciare il carico termico in estate è in genere maggiore, rispetto a quanto richiesto in inverno: andrà verificato che la portata calcolata sia congruente per le condizioni invernali.



QUADERNI  
per la progettazione



**Figura 2.3**  
Pendenza  
della retta  
di carico  
sui diagrammi  
ASHRAE  
e di Mollier

### 2.3 Condizioni estive

Tracciando la retta con pendenza  $R$  passante per il punto **a**, imponendo una certa  $t_i$  (con le cautele e le verifiche già dette sulla portata dell'aria  $G_a$ ), si può determinare il punto che rappresenta le condizioni di immissione dell'aria nell'ambiente (Figura 2.3 con  $R > 0$ , condizioni estive).

Infatti il segmento di retta **i** → **a** rappresenta la trasformazione subita dall'aria nell'ambiente. Individuato lo stato **i** si possono leggere sul diagramma i valori  $x_i$ ,  $h'_i$  e ricavare quindi la portata d'aria  $G_a$  in base ad una qualsiasi delle due equazioni di bilancio:

$$g_v = G_a (x_a - x_i) \quad \text{e} \quad \varphi_T = G_a (h'_a - h'_i)$$

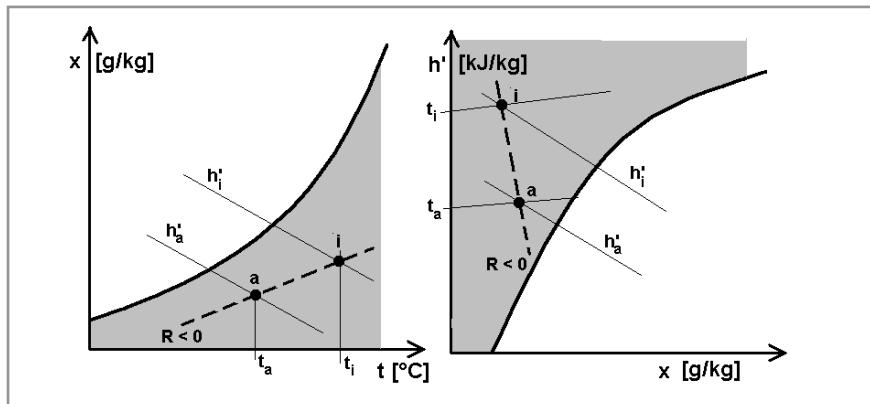
Una volta nota  $G_a$  si può immediatamente trovare la portata d'aria di ricircolo  $G_r$  mediante il bilancio  $G_a = G_e + G_r$  essendo  $G_e$  imposta per mantenere condizioni ottimali di qualità dell'aria.

Ovviamente per garantire anche una sufficiente purezza dell'aria ambiente dovrà essere rispettata la condizione  $G_a > G_e$ . Se ciò non fosse si dovrà prefissare un valore di  $t_i$  più elevato e ripetere il procedimento descritto fino a che tale condizione sia rispettata.

## 2.4 Condizioni invernali

Lo stato **i** è individuato sul diagramma dal punto di incrocio tra la retta di pendenza  $R < 0$  (tratteggiata in Figura 2.4) passante per **a** e l'isoterma  $t_i$  prefissata. Il segmento di retta **i** → **a** (pendenza  $R$ ) rappresenta la trasformazione subita dall'aria nell'ambiente.

**Figura 2.4**  
Individua-  
zione delle  
condizioni di  
immissione (**i**)  
dell'aria  
nell'ambiente  
in condizioni  
invernali



Sia nel caso invernale che estivo, lo stato dell'aria di immissione può essere anche determinato a partire dalla conoscenza della portata di aria che circola nell'impianto piuttosto che dall'imposizione della temperatura di ingresso nell'ambiente. Anche in questo caso, a partire dal punto **a** rappresentativo dello stato dell'aria ambiente, si può tracciare la retta di carico, con pendenza corrispondente a  $R$ .

Dalle due relazioni:

$$g_v = G_a (x_a - x_i) \quad \text{e} \quad \varphi_T = G_a (h'_a - h'_i)$$

questa volta si può determinare  $x_i$  o  $h'_i$  e individuare sul diagramma il punto **i**, posizionato sulla retta di carico. In ordinata si legge allora il valore della temperatura di immissione.