

Corso di Laurea
in Ingegneria Nucleare e della Sicurezza e Protezione

Elementi di condizionamento dell'aria a.a. 10/11

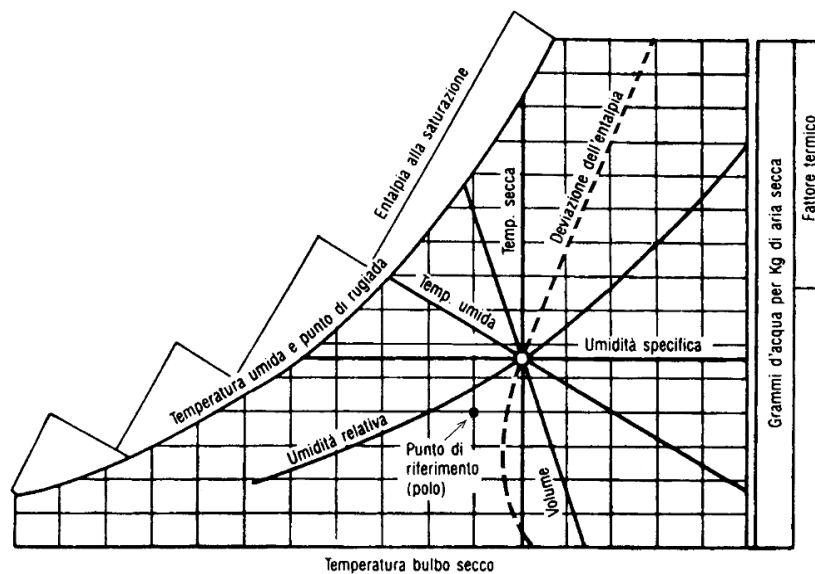
Ing. Nicola Forgiione

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione

E-mail: nicola.forgione@ing.unipi.it; tel. 0502218057

Diagramma psicrometrico (Carrier)

Significato delle linee sul diagramma psicrometrico

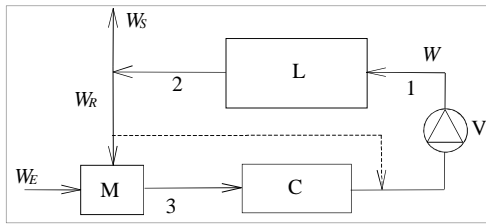


Impianto di condizionamento dell'aria

Il benessere umano dipende principalmente da tre fattori: la temperatura di bulbo secco ($20\div 26\text{ }^{\circ}\text{C}$), l'umidità relativa ($40\div 60\%$) e la ventilazione ($0.05\div 0.3\text{ m/s}$).

Lo scopo di un impianto di condizionamento è quello di mantenere in un locale i parametri ambientali (temperatura, umidità relativa, velocità e purezza dell'aria) a valori ottimali per l'uomo (condizionamento di tipo civile) o per particolari processi tecnologici (condizionamento di tipo industriale). Lo schema base di un impianto di condizionamento dell'aria è quello riportato in figura (condizionamento di un solo locale) dove:

- **L** è il locale condizionato dall'impianto ed all'interno del quale si vogliono mantenere certe condizioni ottimali; le condizioni dell'aria umida in uscita da L (stato 2) si suppongono uguali a quelle dell'ambiente all'interno del locale condizionato (condizioni di progetto).
- in **M** (Miscelatore) l'aria di ricircolo W_R viene miscelata con quella esterna W_E in modo approssimativamente adiabatico;
- in **C** (Centrale di trattamento dell'aria) l'aria è sottoposta ai trattamenti (ad es. refrigerazione con deumidificazione);
- **V** è il ventilatore che permette la circolazione dell'aria attraverso il circuito; dato che esso assorbe una piccola potenza, il suo contributo al bilancio energetico viene generalmente trascurato.



Impianto di condizionamento dell'aria

La progettazione di un impianto di condizionamento, una volta fissate le condizioni di temperatura e umidità relativa ottimali per il locale (condizioni interne di progetto), può dividersi in quattro fasi, descritte più in dettaglio nel seguito.

FASE 1: determinazione dei cosiddetti "carichi termici" ovvero degli scambi energetici tra il locale (sistema) e l'esterno.

FASE 2: determinazione delle condizioni dell'aria in ingresso al locale (stato 1), cioè determinazione della portata, della temperatura, dell'umidità relativa e della purezza dell'aria da immettere nel locale per mantenere in esso le condizioni di progetto (condizioni ottimali).

FASE 3: individuazione di tutti i processi di trattamento cui deve essere sottoposta l'aria per portarla nelle condizioni precisate nella FASE 2.

FASE 4: dimensionamento della rete dei condotti di distribuzione dell'aria; scelta delle apparecchiature atte a realizzare i processi definiti nella fase 2; scelta dei sistemi di controllo e di regolazione dell'impianto (questa fase esula dagli scopi del corso e non viene trattata nel seguito).

Impianto di condizionamento dell'aria

FASE 1 – Determinazione dei carichi termici

Un locale da sottoporre a condizionamento è un sistema aperto schematizzabile come in figura. Le condizioni dello stato 2 si suppongono uguali a quelle dell'ambiente all'interno del locale condizionato, fissate in precedenza.

Il carico sensibile totale ambiente, \dot{Q}_{sens} , può pensarsi somma di cinque termini:

$$\dot{Q}_{sens} = \dot{Q}_{sens,e} + \dot{Q}_{sens,p} + \dot{Q}_{sens,s} + \dot{Q}_{sens,inf} + \dot{Q}_{sens,irr}$$

i quali hanno il seguente significato:

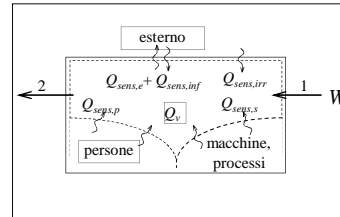
- il primo termine, $Q_{sens,e}$ (>0 nel ciclo estivo e <0 nel ciclo invernale), rappresenta la potenza termica sensibile scambiata dall'ambiente con l'esterno attraverso le pareti opache o trasparenti:

$$\dot{Q}_{sens,e} = \sum_i u_i A_i (t_e - t_2)$$

- il secondo termine, $Q_{sens,p}$ (>0 sempre), rappresenta la potenza termica prodotta dalle persone presenti nel locale:

$$\dot{Q}_{sens,p} = N \dot{q}_p$$

$$\left(\begin{array}{l} (\dot{q}_p)_{min} \cong 60 \text{ W/persona in estate e } (\dot{q}_p)_{min} \cong 80 \text{ W/persona in inverno} \\ (\dot{q}_p)_{max} \cong 200 \text{ W/persona} \end{array} \right)$$



Impianto di condizionamento dell'aria

FASE 1 – Determinazione dei carichi termici

- il terzo termine, $Q_{sens,s}$ (>0 sempre), rappresenta la potenza prodotta da eventuali sorgenti presenti nell'ambiente (impianti di illuminazione, computers, ecc.);
- il quarto termine, $Q_{sens,inf}$ rappresenta la potenza termica sensibile connessa alle infiltrazioni di aria esterna:

$$\dot{Q}_{sens,inf} = W_{inf} c_{p,a} (t_e - t_2)$$

dove W_{inf} è la portata massica di aria che entra nel locale a causa delle infiltrazioni;

- il quinto termine, $Q_{sens,irr}$ (importante solo in estate in cui risulta >0) rappresenta la potenza termica entrante per irraggiamento attraverso i componenti finestrati.

Il carico latente totale ambiente, Q_{lat} , è definito come:

$$\dot{Q}_{lat} = W_v h_v$$

dove h_v è l'entalpia specifica del vapore alla temperatura dell'ambiente ($\cong 2550$ kJ/kg) e W_v rappresenta la portata di vapore immessa nell'ambiente, data dalla somma di tre termini:

$$W_v = N g_v + W_{processi} + W_{inf} (\omega_1 - \omega_2) \quad (g_v \cong 40 + 400 \text{ g/(h persona)})$$

Il carico totale ambiente, somma del carico sensibile e di quello latente è quindi dato da:

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{sens} + \dot{Q}_{lat} = \dot{Q}_{sens} + W_v h_v$$

Impianto di condizionamento dell'aria

FASE 2 – Determinazione della portata e delle condizioni dell'aria in ingresso

Per determinare la portata e le condizioni termoigrometriche dell'aria in ingresso al locale è necessario risolvere le equazioni di bilancio relative al locale condizionato.

Bilancio di massa dell'aria secca

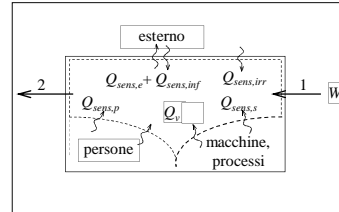
$$W_1 - W_2 = 0 \Rightarrow W_1 = W_2 = W$$

Bilancio di massa dell'acqua

$$W_1 \omega_1 - W_2 \omega_2 + W_v = 0 \Rightarrow W = W_v / (\omega_2 - \omega_1)$$

Bilancio di energia dell'aria umida

$$W_1 h_1 - W_2 h_2 + W_v h_v + \dot{Q}_{sens} = 0 \Rightarrow \frac{h_2 - h_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\dot{Q}_{sens}}{W_v} + h_v = \frac{\dot{Q}_{tot}}{W_v} = m$$



Essendo generalmente $W_v > 0$ ed essendo W sempre positivo, dal bilancio di massa risulta che $\omega_1 < \omega_2$. Dal bilancio dell'energia risulta che in "estate", essendo $\dot{Q}_{tot} > 0$, si ha $h_1 < h_2$, mentre in "inverno" si ha, generalmente, $h_1 > h_2$. Inoltre, in "estate" occorrerà immettere aria nel locale a temperatura di bulbo secco $t_1 < t_2$, mentre in "inverno" si vorrà che avvenga il contrario.

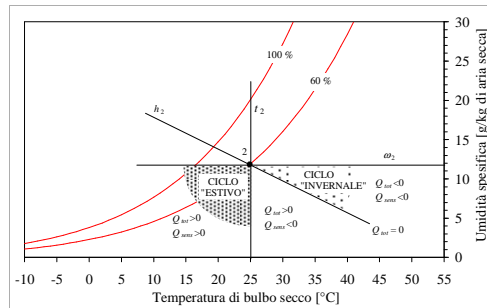
Impianto di condizionamento dell'aria

FASE 2 – Determinazione della portata e delle condizioni dell'aria in ingresso

Da quanto osservato precedentemente risulta che lo stato 1, dell'aria umida in ingresso al locale, si trova sempre al di sotto dello stato 2 nel diagramma psicrometrico. Inoltre esso generalmente va scelto nella regione scura per il ciclo "estivo" o nella regione più chiara per il ciclo "invernale" (vedi figura). La zona intermedia corrisponde ad un caso in cui il locale cede calore sensibile all'esterno ($Q_{sens} < 0$) ma il carico totale risulta positivo ($Q_{tot} > 0$) a causa del carico latente più elevato; tali condizioni sono inusuali, ma possono verificarsi, ad esempio, nella stagione invernale in locali con grande produzione di vapore al loro interno.

La retta passante per i punti 1 e 2 viene detta *retta di lavoro*. La retta di lavoro può essere facilmente disegnata una volta noto il suo *coefficiente angolare*, m , definito precedentemente (rispetto ad un diagramma ad assi obliqui ω - h) o sulla base della conoscenza del *fattore termico ambientale*, R (o *RST*), definito come:

$$R \equiv \frac{\dot{Q}_{sens}}{\dot{Q}_{tot}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{lat}}{\dot{Q}_{tot}} = 1 - \frac{h_v}{m}$$



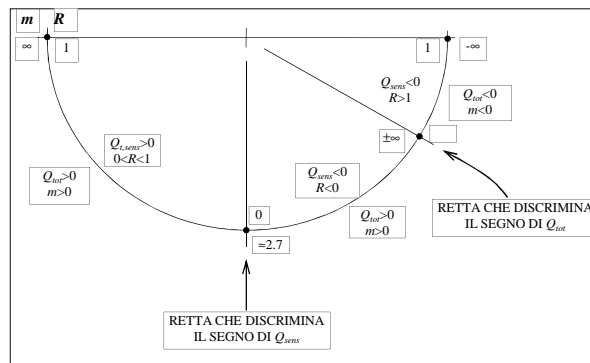
N.B.: Se il fattore termico è, ad esempio, 0,8 si ha che il carico è costituito dall'80 % di calore sensibile e dal 20 % di calore latente. Quando il valore del fattore termico R è 1 la retta di lavoro è orizzontale, cioè il carico termico è dato dal solo calore sensibile. Se $R = \infty$ ($Q_{sens} = -Q_{lat}$) la trasformazione diventa una isentalpica (saturazione adiabatica). Quando $R=0$ il carico termico è costituito dal solo carico latente e la retta di lavoro è quindi verticale.

Impianto di condizionamento dell'aria

FASE 2 – Determinazione della portata e delle condizioni dell'aria in ingresso

Nel caso si disponga del diagramma Carrier la direzione della retta di lavoro può essere individuata facendo passare una retta per il *punto base* del diagramma psicrometrico e per il valore del fattore termico, R , riportato sulla relativa scala a destra del diagramma. Se si dispone, invece, del diagramma ASHRAE la direzione della retta di lavoro può essere individuata servendosi della scala a forma di semicerchio (lo schema e gli intervalli significativi sono mostrati nella figura). In questo caso, per disegnare la retta avente direzione uguale alla retta di lavoro si può utilizzare indifferentemente o il fattore termico, R , o il coefficiente angolare, m .

Il fattore termico offre dunque un'immagine delle condizioni termoigrometriche dell'ambiente e permette di individuare le condizioni da conferire all'aria in ingresso al locale per il mantenimento delle volute condizioni di progetto del locale.



Impianto di condizionamento dell'aria

Schema di calcolo per le fasi 1 e 2

1. Si fissano le condizioni che si vogliono mantenere nel locale da condizionare dette *condizioni di progetto* (in estate si ha tipicamente $t_2 = 26 \text{ °C}$ e $\phi_2 = 50 \%$, mentre in inverno si ha $t_2 = 20 \text{ °C}$ e $\phi_2 = 50 \%$).
2. Si esegue il calcolo dei carichi termici e cioè si trovano le sorgenti termiche e massiche (Q_{sens} , Q_{lat} , W_v).
3. Si traccia la *retta di lavoro* passante per lo stato 2 (noto) la cui inclinazione è individuabile sul diagramma psicrometrico una volta noto m o R .
4. Si fissa lo stato 1 sulla *retta di lavoro* in modo che risulti $t_2 - t_1 \leq 8-12 \text{ °C}$ (estate) o $t_1 - t_2 \leq 12-20 \text{ °C}$ (inverno) e si ricava la portata d'aria $W = W_v / (\omega_2 - \omega_1)$. Lo stato 1 dell'aria umida deve essere scelto tra i punti della *retta di lavoro* che cadono nelle corrette regioni di interesse. Inoltre, il punto 1 non deve essere scelto né troppo vicino al punto 2, perché altrimenti la portata d'aria W risulterebbe troppo grande, né troppo lontana da 2, perché potrebbe aversi un notevole shock termico nella regione nella quale viene immessa la portata d'aria.

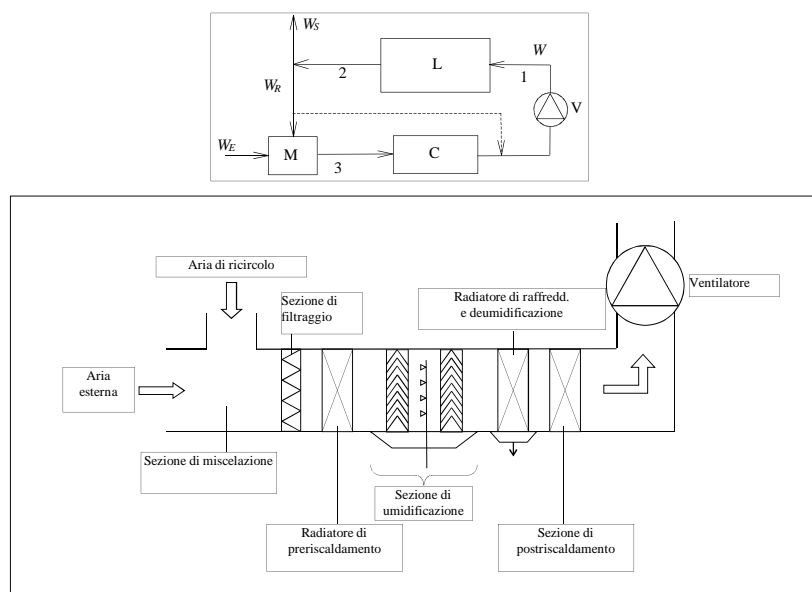
Impianto di condizionamento dell'aria

FASE 3 – Trattamenti dell'aria nel gruppo di condizionamento

1. Si calcola la *portata d'aria esterna* W_E che è necessario rinnovare (circolazioni orarie): per ragioni igieniche è necessario prevedere una portata di reintegro per ogni persona che occupa mediamente il locale cioè $W_E = N g_E$ in cui N è il numero di persone, mentre g_E è la portata esterna di rinnovo per persona (18-60 kg/(h persona)). In tal modo rimane automaticamente determinata la *portata di ricircolo*, $W_R = W - W_E$, e la *portata di scarico*, $W_S = W_E$. In ambienti industriali il valore di W_E può essere stabilito con criteri diversi a seconda dei processi che avvengono (ad es.: essiccazione, rimozione di sostanze pericolose per la salute, ecc.).
2. Si individua sul diagramma psicrometrico il *punto rappresentativo delle condizioni esterne* (punto E) e si determina lo stato 3 in corrispondenza del quale si troverà l'aria umida in uscita dal miscelatore ed in ingresso al gruppo di condizionamento; la posizione di tale punto varia con la stagione.
3. A questo punto rimane da identificare il processo 3-4-1 che, generalmente, corrisponde ad un *raffreddamento con deumidificazione + riscaldamento nel caso "estivo"*, mentre corrisponde ad un *riscaldamento + umidificazione nel caso "invernale"*. La distinzione tra il caso di ciclo "estivo" ed il caso di ciclo "invernale" è comunque convenzionale. Infatti, nella stagione invernale nei locali molto affollati si può avere, a causa del contributo del carico termico delle persone, $Q_{sens} > 0$, ovvero condizioni "estive".

Impianto di condizionamento dell'aria

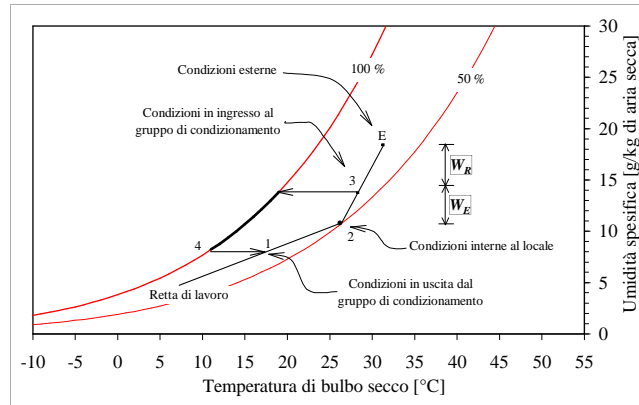
FASE 3 – Trattamenti dell'aria nel gruppo di condizionamento



Impianto di condizionamento dell'aria

- *Calcolo termico "estivo"* ($Q_{tot} > 0$ e $Q_{sens} > 0$)

In questo caso l'aria nel gruppo di condizionamento viene sottoposta prima al processo di raffreddamento con deumidificazione (3-4, per semplicità si è supposto nullo il fattore di bypass dell'aria) e poi a riscaldamento (4-1).

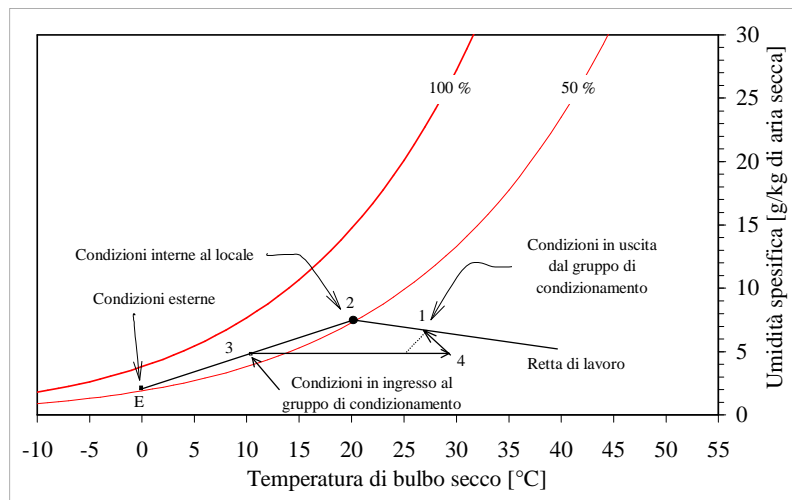


In alcuni casi è possibile evitare il post-riscaldamento (4-1) sfruttando il bypass dell'aria di ricircolo.

Impianto di condizionamento dell'aria

- *Calcolo termico "invernale"* ($Q_{tot} < 0$ e $Q_{sens} < 0$)

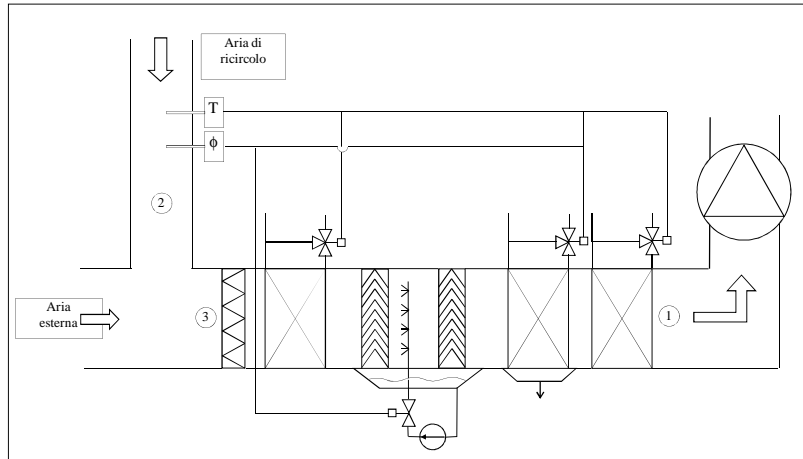
In questo caso l'aria nel gruppo di condizionamento viene sottoposta prima al processo di riscaldamento sensibile (3-4) e poi all'umidificazione (4-1).



Impianto di condizionamento dell'aria

• Regolazione e controllo

Gli impianti di condizionamento devono ovviamente essere regolati automaticamente sia per evitare dannosi sbalzi di temperatura, sia per limitare il consumo energetico. Infatti, essi sono progettati nelle condizioni di carico massimo e quindi devono essere regolati in modo da adeguarsi alle condizioni effettive di carico.



Prestazioni energetiche degli edifici

• Dlgs n. 192 del 19 agosto 2005

1) Fabbisogno di energia primaria

Tabella 1. Valori limite per il fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione invernale per metro quadrato di superficie utile dell'edificio espresso in kWh/m² anno

Rapporto di forma dell'edificio S/V	Zona climatica									
	A	B		C		D		E		F
fino a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	oltre
600	601	900	901	1400	1401	2100	2101	3000	3000	GG
GG	GG	GG	GG	GG	GG	GG	GG	GG	GG	GG
≤0,2	10	10	15	15	25	25	40	40	55	55
≥0,9	45	45	60	60	85	85	110	110	145	145

I valori limite riportati in tabella 1 sono espressi in funzione della zona climatica, così come individuata all'art. 2 del D.P.R. 26/08/1993, n. 412, e del rapporto di forma dell'edificio S/V, dove:

- S, espressa in metri quadrati, è la superficie che delimita verso l'esterno (ovvero verso ambienti non dotati di impianto di riscaldamento) il volume riscaldato V;
- V è il volume lordo, espresso in metri cubi, delle parti di edificio riscaldate, definito dalle superfici che lo delimitano.

Per valori di S/V compresi nell'intervallo 0,2-0,9 e, analogamente, per gradi giorno (GG) intermedi ai limiti delle zone climatiche riportati in tabella si procede mediante interpolazione lineare.

Prestazioni energetiche degli edifici

• *Dlgs n. 192 del 19 agosto 2005*

2) Trasmittanza termica delle strutture verticali opache

Tabella 2. Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture verticali opache espressa in W/m^2K

Zona Climatica	Dall' 1 gennaio 2006 U (W/m^2K)	Dall' 1 gennaio 2009 U (W/m^2K)
A	0,85	0,72
B	0,64	0,54
C	0,57	0,46
D (Pisa)	0,50	0,40
E	0,46	0,37
F	0,44	0,35

3) Trasmittanza termica delle strutture orizzontali opache

Tabella 3. Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture orizzontali opache espressa in W/m^2K

Zona Climatica	Dall' 1 gennaio 2006 U (W/m^2K)	Dall' 1 gennaio 2009 U (W/m^2K)
A	0,80	0,68
B	0,60	0,51
C	0,55	0,44
D (Pisa)	0,46	0,37
E	0,43	0,34
F	0,41	0,33

Prestazioni energetiche degli edifici

• *Dlgs n. 192 del 19 agosto 2005*

4) Trasmittanza termica delle chiusure trasparenti

Tabella 4. Valori limite della trasmittanza termica U delle chiusure trasparenti comprensive degli infissi espressa in W/m^2K

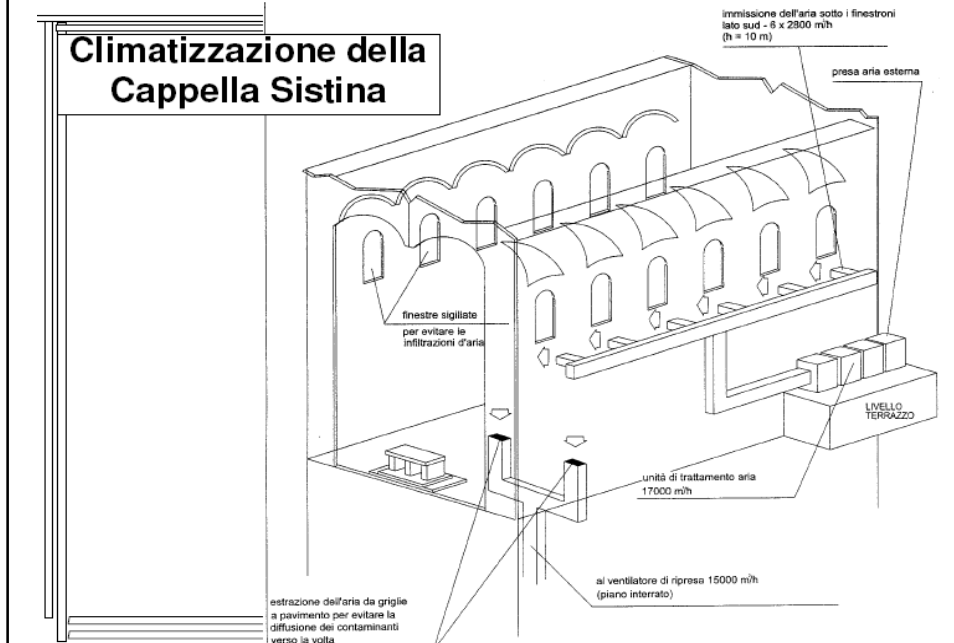
Zona Climatica	Dall' 1 gennaio 2006 U (W/m^2K)	Dall' 1 gennaio 2009 U (W/m^2K)
A	5,5	5,0
B	4,0	3,6
C	3,3	3,0
D (Pisa)	3,1	2,8
E	2,8	2,5
F	2,4	2,2

Tabella 4b. Valori limite della trasmittanza centrale termica U dei vetri espressa in W/m^2K

Zona Climatica	Dall' 1 gennaio 2006 U (W/m^2K)	Dall' 1 gennaio 2009 U (W/m^2K)
A	5,0	5,0
B	4,0	3,0
C	3,0	2,3
D (Pisa)	2,6	2,1
E	2,4	1,9
F	2,3	1,6

Esempi di climatizzazione con impianti a tutt'aria

Climatizzazione della Cappella Sistina



Esempi di climatizzazione con impianti a tutt'aria

Climatizzazione della Cappella Sistina

