

Climatizzazione

CONDIZIONI DI PROGETTO NEGLI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE



CONDIZIONI DI PROGETTO NEGLI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE

INTRODUZIONE

Secondo una definizione largamente adottata si intende per stato di benessere ambientale l'atteggiamento mentale di completa soddisfazione per l'ambiente entro il quale si opera. Il presupposto del benessere ambientale è che un insieme di grandezze fisiche riferite all'ambiente assumano valori opportuni.

Gli impianti di climatizzazione per il benessere hanno proprio lo scopo di controllare opportunamente i valori di alcune di queste grandezze all'interno dell'ambiente costruito: innanzitutto quelle da cui dipende il benessere termico degli individui (temperatura, eventualmente umidità e velocità dell'aria nella zona occupata, ed almeno in alcuni casi la temperatura radiante); poi possono controllare la ventilazione degli ambienti, dalla quale dipende il mantenimento di condizioni di igiene ambientale oltre che la diluizione di odori molesti (in sostanza la "qualità dell'aria"). Dal funzionamento dell'impianto di climatizzazione non dovrà inoltre conseguire una rumorosità ambientale od esterna che possa costituire disturbo.

Valori opportuni di questi parametri costituiscono dunque condizioni di progetto degli impianti di climatizzazione per il benessere. Sui criteri di scelta di questi valori, anche nella prospettiva di voler contemperare le esigenze di benessere ambientale con quelle di una gestione energeticamente efficiente degli impianti, si tratterà in questa relazione.

BENESSERE TERMICO

L'omeotermia è la caratteristica, propria dell'uomo ed in generale delle specie animali a sangue caldo, di mantenere la temperatura interna (del nucleo) ad un valore pressoché costante (a circa 37°C per l'uomo). Presiede a questa funzione l'ipotalamo attraverso meccanismi complessi che agiscono -sù processi di generazione interna e scambio di flusso esterno di calore, che si compensano nel medio termine.

La generazione interna di calore corrisponde all'energia chimica liberata dall'insieme dei processi (essenzialmente ossidativi) che interessano gli alimenti e le bevande ingerite nonché eventualmente sostanze di riserva, chiamata energia metabolica, diminuita del lavoro meccanico esterno fatto dall'individuo nell'espletamento dell'attività svolta (questo termine può generalmente essere assunto di valore nullo per attività di tipo sedentario).

La potenza metabolica, espressa per unità di area della superficie corporea, si può considerare esclusivamente dipendente dal tipo di attività esplicata dall'individuo: viene chiamata potenza metabolica specifica, o metabolismo energetico specifico, od anche attività metabolica specifica, ed indicata con il simbolo M, esprimibile nelle unità coerenti del sistema SI in [W/m²]; peraltro nelle considerazioni di benessere ambientale è radicato l'impiego dell'unità di misura incoerente "met":

$$1 \text{ met} = 50 \text{ kcal}/(\text{m}^2\text{h}) = 58,2 \text{ W}/\text{m}^2 \quad (1)$$

che corrisponde grosso modo all'attività metabolica specifica di un individuo seduto in riposo.

Si osservi come l'attività metabolica specifica può essere considerata composta di due termini:

- la potenza metabolica specifica basale, aliquota richiesta per l'espletamento delle sole funzioni vitali, e pari a circa 43 W/m²
- un' aliquota aggiuntiva legata al tipo di attività svolta.

Valori tipici del metabolismo energetico specifico sono riportati nella Tabella I.

POTENZA METABOLICA SPECIFICA PER DIFFERENTI TIPI DI ATTIVITA'

Tipo di attività svolta	W/m ²	Potenza metabolica specifica M met
In riposo:		
- dormiente	43	0,7
- coricato	47	0,8
- seduto	58	1,0
- in piedi	70	1,2
Attività sedentaria:		
- abitazione, ufficio, scuola	70	1,2
Attività leggera, in piedi:		
- negozi, grandi magazzini, laboratori, industria leggera	93	1,6
Attività media in piedi		
- macchine utensili, commessi di negozio, lavori domestici	116	2,0
Attività pesante:		
- macchine utensili complesse, riparazioni autovetture, assemblaggio impianti, ginnastica	175	3,0

Per quanto riguarda l'area della superficie corporea A [m²] questa può essere mediamente espressa in funzione della massa m [kg] dell'individuo e della sua altezza h [m] attraverso la relazione dovuta a Du Bois:

$$A = 0,202 m^{0,425} h^{0,725} \quad (2)$$

Risulta quindi che un' individuo di corporatura media (m = 70 kg h = 1,70 m) ha un'area della superficie corporea A = 1,80 m². Con riferimento alla potenza meccanica W scambiata dall'individuo con l'ambiente esterno, si può definire un rendimento meccanico n associato alle diverse attività esplicabili:

$$n = W / (M A) \quad (3)$$

Si è già osservato come per le attività sedentarie o leggere che principalmente interessano queste considerazioni possa essere assunto n = 0; si consideri peraltro, dovendo attribuire a W valore positivo quando è relativo a lavoro fatto dall'individuo sull'ambiente esterno e valore negativo nel caso opposto, come n possa a sua volta assumere valori positivi (quando ad esempio l'attività consiste nel camminare in salita) oppure negativi (camminare in discesa).

In condizioni di equilibrio si ricava dunque che il valore della potenza termica globale q_T che l'individuo deve scambiare con l'ambiente vale:

$$q_T = M A(1-n) \quad (4)$$

Una situazione di non equilibrio porta alla variazione della temperatura del nucleo, e quindi non è compatibile con la sopravvivenza stessa dell'individuo se non per periodi di tempo limitati; il sistema di termoregolazione presiede a realizzare, nelle diverse circostanze individuali ed ambientali, condizioni mediate di equilibrio termico attraverso l'attivazione dei meccanismi di termoregolazione di tipo vasomotorio (vasocostrizione o vasodilatazione che modificano la temperatura superficiale cutanea del corpo) o comportamentale (brividi, sudorazione).

La potenza termica globale q_T viene scambiata con l'ambiente esterno secondo meccanismi differenti, qui di seguito singolarmente analizzati:

Potenza termica scambiata per convezione C_r, a propria volta consistente di due termini c_r e C_s dovuti rispettivamente al meccanismo della respirazione ed al fatto che il corpo umano è lambito da aria atmosferica a valori determinati di temperatura e velocità relativa di movimento. Per calcolare la potenza termica convettiva associata alla respirazione è necessario conoscere la portata d'aria espirata G_{ex}, esprimibile proporzionalmente alla potenza metabolica M A [W] secondo la relazione:

$$G_{ex} = 1,433 \cdot 10^{-6} M A \quad [\text{Kg/s}] \quad (5)$$

Potendosi assumere, anche per il modesto contributo di C_r al flusso termico globale, il valore costante t_{ex} = 34°C per la temperatura dell'aria espirata, risulta in definitiva (esprimendo tutte le quantità nelle unità coerenti del sistema SI):

$$C_r = G_{ex} c_p (t_{ex} - t_a) = 0,00144 M A (34 - t_a) \quad [\text{W}] \quad (6)$$

essendo c_p: calore specifico dell'aria (c_p=1005 J/(kg°C));

t_a: temperatura a bulbo secco dell'aria ambiente taci

Per quanto riguarda il calcolo del termine convettivo C_s vale l'espressione:

$$C_s = A f_{cl} a_c (t_{cl} - t_a) \quad (7)$$

ove i nuovi simboli impiegati hanno il seguente significato:

f_{cl}: coefficiente d'area dell'abbigliamento; è il rapporto adimensionale tra l'area della superficie del corpo abbigliato e l'area della superficie del corpo nudo [-]. Si vedrà nel seguito come può essere calcolato in funzione della resistenza termica dell'abbigliamento;

t_{cl}: temperatura media superficiale del corpo abbigliato [°C]

a_c: coefficiente di convezione tra la superficie esterna del corpo abbigliato e l'aria ambiente (W/(m²°C)); può essere calcolato in

funzione della differenza di temperatura ($t_{ci}-t_a$) [°C] o della velocità media relativa v [m/s] tra individuo e aria ambiente, assumendo il valore maggiore che risulta dalle due relazioni seguenti (moto laminare e moto turbolento):

$$\alpha c = 2,38(t_{ci} - t_a)^{0,25}$$

$$\alpha c = 12,06\sqrt{v} \quad (8)$$

Per quanto riguarda la velocità relativa v , questa si può considerare risultante dalla composizione della velocità di movimento dell'aria nell'ambiente v_a , e della velocità di movimento dell'individuo nell'ambiente v_b :

$$v = v_a + v_b \quad (9)$$

Il termine v_b è spesso correlato con l'entità del metabolismo energetico M [W/m²] secondo la relazione (valida per M 58,2 W/m²):

$$v_b = 0,3 \left[\frac{M}{58,2} - 1 \right] \quad [m/s] \quad (10)$$

Potenza termica scambiata per radiazione R , calcolabile con la classica relazione della radiazione mutua tra un corpo piccolo (individuo) contenuto entro una grande cavità (ambiente):

$$R = A_{eff} \cdot \epsilon \cdot \sigma_n \left[(t_{ci} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right] \quad [W] \quad (11)$$

ove i nuovi simboli impiegati hanno il seguente significato:

A_{eff} : area radiante efficace del corpo umano abbigliato [m²] (area della più piccola superficie tutta non concava che può avvolgere il corpo umano abbigliato). E' a propria volta esprimibile secondo la relazione:

$$A_{eff} = f_{eff} f_{cl} A \quad (12)$$

nella quale per il fattore di area efficace f_{eff} (rapporto tra l'area radiante efficace A_{eff} e l'area esterna del corpo umano abbigliato ($f_{cl} \cdot A$)) si può assumere il valore medio $f_{eff} = 0,71$;

ϵ : emissività media globale emisferica del corpo umano abbigliato [-]; si può assumere il valore $\epsilon = 0,97$;

σ_n : costante di radiazione del corpo nero (di Stephan-Boltzmann), $= 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)]

t_r : temperatura media radiante nell'ambiente [°C]: è definita come t_r la temperatura di un ambiente fittizio termicamente uniforme entro il quale l'individuo scambierebbe la medesima potenza radiante scambiata nell'ambiente reale. Quando non intervengano campi radianti fortemente disimmetrici, può venire approssimata con la media pesata (secondo i rispettivi fattori di forma) delle temperature superficiali interne dell'ambiente.

La (11) si può quindi scrivere nelle unità coerenti del sistema SI:

$$R = 3,96 \cdot 10^{-8} A f_{cl} \left[(t_{ci} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right] \quad [W] \quad (13)$$

E' noto come si preferisca spesso esprimere un flusso termico radiante nella forma linearizzata:

$$R = \alpha_r A f_{cl} (t_{ci} - t_r) \quad (14)$$

che definisce il coefficiente di radiazione α_r [W/(m²°C)], il cui valore può essere valutato imponendo l'uguaglianza dei secondi membri delle espressioni (11) e (14).

Potenza termica latente dispersa per evaporazione E : si devono considerare a questo proposito tre distinti termini:

E_r : flusso termico latente associato all'attività respiratoria; r

E_d : flusso termico latente associato alla diffusione di vapor d'acqua attraverso la pelle;

E_s : flusso termico latente associato alla sudorazione (evaporazione del sudore sulla superficie corporea).

L'aria espirata, in quanto passa negli alveoli polmonari e sulle mucose dell'apparato respiratorio, ha umidità specifica x maggiore di quella dell'aria ambiente inspirata x_a ; si ha pertanto una cessione netta di vapor d'acqua all'ambiente, con relativo flusso termico latente associato pari a:

$$E_r = G_{ex} r (x_{ex} - x_a) \quad (15)$$

ove i simboli hanno il seguente significato:

r : calore di vaporizzazione dell'acqua [J/kg]; si può assumere per questa grandezza il valore relativo a 35°C $r = 2,41 \cdot 10^6$ J/kg;

x_{ex} , x_a : umidità specifica rispettivamente dell'aria espirata e x_a

dell'aria ambiente (kg/kg_{as}); la differenza ($x_{ex} - x_a$) può essere valutata in funzione della pressione di saturazione dell'acqua alla temperatura dell'aria ambiente P_{as} [Pa] e della umidità relativa dell'aria ambiente f [-] con la relazione:

$$(x_{ex} - x_a) = 0,029 - 4,94 \cdot 10^{-6} \varphi P_{as} \quad [kg_v / kg_{as}] \quad (16)$$

Facendo uso della (5) e della (16) risulta allora (unità SI):

$$E_r = 1,72 \cdot 10^{-5} M (5867 - \varphi P_{as}) A \quad [W] \quad (17)$$

Si osservi esplicitamente come P_{as} sia funzione univoca della temperatura dell'aria ambiente t_a .

il fenomeno della diffusione di vapore attraverso la pelle non sembra controllato dai meccanismi di termoregolazione; il relativo flusso termico associato viene valutato applicando la legge di Fick sulla diffusione nella forma:

$$E_d = r \cdot \mu \cdot A (p_{sk} - \varphi \cdot p_{as}) \quad [W] \quad (18)$$

Il significato dei nuovi simboli utilizzati è il seguente:

μ : coefficiente di permeabilità della pelle [kg/(s m² Pa)], che si può assumere pari a $\mu = 1,27 \cdot 10^{-9}$ kg/(s m² Pa);

P_{sk} : pressione di saturazione dell'acqua alla temperatura (media) t_{sk} della pelle [Pa]; nel campo di temperatura di interesse (27-37°C) si può assumere l'espressione lineare:

$$P_{sk} = 256 t_{sk} - 3373 \quad [Pa] \quad t_{sk} \text{ in } [^\circ C] \quad (19)$$

I Risulta quindi in definitiva (unità SI):

$$E_d = 3,05 \cdot 10^{-3} A (256t_{sk} - 3373 - \varphi P_{as}) [W] \quad (20)$$

Si ricorda come la temperatura superficiale media della pelle t_{sk} sia una variabile sottoposta al controllo del sistema di termoregolazione.

Per quanto riguarda la dispersione di potenza termica per sudorazione E_s , il meccanismo (controllato direttamente dal sistema di termoregolazione) è il seguente: le ghiandole sudoripare stimolate dall'ipotalamo secernono il sudore (che essenzialmente è costituito da soluzione acquosa di NaCl), che giunge esternamente alla pelle spargendosi in film sottile sulla sua superficie da dove (in assenza di gocciolamento) passa per evaporazione nell'aria asportando la potenza termica latente E_s .

Potenza termica dispersa per conduzione. comprende il totale flusso termico scambiato per conduzione con tutti i solidi a contatto con il corpo umano (ad esempio tra i piedi ed il pavimento, etc.). Nelle considerazioni che seguono tale termine verrà ritenuto sempre trascurabile.

Le relazioni considerate più sopra per la valutazione dei vari termini di potenza dispersa dal corpo umano considerano sia la temperatura media della pelle t_{sk} che quella media superficiale del corpo abbigliato t_{cl} . Queste due grandezze possono essere tra loro correlate considerando la resistenza termica specifica dell'abbigliamento I , definita dalla relazione:

$$R + C_s = \frac{A(t_{sk} - t_{cl})}{I} \quad (21)$$

che risulta dalla considerazione che attraverso l'abbigliamento deve trasmettersi l'insieme della potenza termica sensibile scambiata dal corpo umano, con esclusione di quella relativa all'attività respiratoria (si ragiona come se l'intera superficie corporea fosse ricoperta dall'abbigliamento). Nelle unità coerenti del sistema SI la resistenza termica del vestiario I deve essere valutata in ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$), ed in questa unità si intenderà espressa in tutte le relazioni che verranno considerate nel seguito. Bisogna peraltro precisare come per la resistenza specifica del vestiario sia spesso utilizzata una unità di misura incoerente empirica denominata "clo"; risulta $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{C/W}$. Valori tipici dei valori della resistenza termica specifica per differenti tipi di abbigliamento sono riportati nella Tabella II.

RESISTENZA TERMICA SPECIFICA PER DIFFERENTI TIPI DI ABBIGLIAMENTO

Tipo di abbigliamento	$m^2 \text{ K/W}$	Resistenza termica specifica I	clo
Nudo	0		0
Pantaloncini corti	0,016		0,1
Tipica tenuta tropicale: -slip, calzoncini, camicia a collo aperto e maniche corte, calzini e sandali	0,047		0,3
Abbigliamento leggero estivo: -slip, pantaloncini leggeri, camicia a collo aperto e maniche corte, calzini e scarpe	0,047		0,3
Tenuta da lavoro leggera: -biancheria intima leggera, camicia da lavoro in cotone a maniche lunghe, pantaloni da lavoro, calze in lana e scarpe	0,11		0,7
Abbigliamento invernale tipico per interni: -biancheria intima, camicia a maniche lunghe, pantaloni, pull-over a maniche lunghe, calze pesanti e scarpe	0,16		1,0
Tenuta tradizionale europea pesante per lavoro: -biancheria intima a maniche e gambe lunghe, camicia, abito completo con pantaloni, giacca e gilet, calze in lana e scarpe invernali	0,23		1,5
Abbigliamento in uso nei paesi a clima polare	0,46-0,62		3-4

Attraverso il valore della resistenza termica specifica dell'abbigliamento è anche possibile valutare il coefficiente d'area dell'abbigliamento stesso f_{cl} , mediante le relazioni:

$$\begin{aligned} f_{cl} &= 1 + 1,29 I \quad \text{per } I = 0,078 \text{ m}^2\text{C/W} \\ f_{cl} &= 1,05 + 0,645 I \quad \text{per } I > 0,078 \text{ m}^2\text{C/W} \end{aligned} \quad (22)$$

L'equazione generale di bilancio energetico del corpo umano si può quindi scrivere:

$$M A (1 - n) = C_r + C_s + R + E_r + E_d + E_s \quad (23)$$

Dalle relazioni e considerazioni esposte in precedenza risulta in definitiva che l'equazione (23) esprime un legame funzionale del seguente tipo:

$$F \left(M, n, I, t_a, \bar{t}_r, \varphi, v_a, t_{sk}, \frac{E_s}{A} \right) = 0 \quad (24)$$

ove sono coinvolte variabili che possono essere così raggruppate:

variabili soggettive : M metabolismo energetico specifico

n rendimento meccanico (nullo in molti casi)

I resistenza specifica dell'abbigliamento

variabili ambientali : t_a temperatura a bulbo secco dell'aria ambiente

\bar{t}_r temperatura media radiante nell'ambiente

f umidità relativa dell'aria ambiente

v_a velocità di movimento dell'aria nell'ambiente

variabili fisiologiche : t_{sk} temperatura media superficiale della pelle

E_s/A potenza termica specifica dispersa per sudorazione.

Entro ampi domini dei valori delle variabili soggettive e ambientali, il sistema di termoregolazione adegua opportunamente il valore delle variabili fisiologiche in modo tale da rendere soddisfatta l'equazione di bilancio energetico (23); peraltro ciò non implica necessariamente la condizione di benessere termico. Il soddisfacimento della relazione di bilancio termico stazionario per un individuo in un determinato ambiente è infatti condizione necessaria ma non sufficiente per il conseguimento del benessere termico. Sulla base di una vasta serie di prove sperimentali in camera climatica, che ha coinvolto un campione di oltre 1300 individui, Fanger ha mostrato che in condizioni di benessere termico, il valore delle variabili fisiologiche (temperatura media cutanea t_{sk} e flusso termico specifico disperso per sudorazione E_s/A) è univocamente correlato al valore del metabolismo termico specifico $M(1-n)$; in questa condizione (benessere termico dichiarato) l'influenza sulle variabili fisiologiche delle variabili ambientali e dell'isolamento del vestiario non risulta significativa.

Dalla regressione dei dati sperimentali, per condizioni di benessere risultano le seguenti relazioni di interpolazione (M espresso in $[W/m^2]$):

$$t_{sk} = 35,7 - 0,0275 M(1-n) \quad [^\circ\text{C}] \quad (25)$$

$$E_s / A = 0,42 \cdot M(1-n) - 58,2 \quad [W] \quad (26)$$

L'equazione generale di bilancio energetico (23) associata alle relazioni (25) e (26) dà luogo all'equazione del benessere di Fanger, espressione analitica del legame di mutua dipendenza tra le quattro variabili ambientali (temperatura dell'aria a bulbo secco, temperatura media radiante, umidità e velocità dell'aria nell'ambiente) e le due soggettive (attività svolta ed isolamento del vestiario indossato) in condizioni ottimali di benessere termico in un ambiente uniforme.

È utile far osservare come risulti talvolta conveniente utilizzare il valore della cosiddetta temperatura operativa t_o quale unico indice razionale di valutazione combinata degli effetti della temperatura a bulbo secco dell'aria t_a e della temperatura media radiante \bar{t}_r sugli scambi termici sensibili convettivi e radiativi uomo-ambiente.

Dalla (7) e (14) risulta infatti:

$$R + C_s = A f_{cl} [\alpha_r (\bar{t}_r - t_a) + \alpha_c (t_a - \bar{t}_r)] \quad (27)$$

Ponendo

$$t_o = \frac{\alpha_r \bar{t}_r + \alpha_c t_a}{\alpha} \quad (28)$$

con $\alpha = \alpha_c + \alpha_r$ (coefficiente di adduzione) risulta anche:

$$R + C_s = A \cdot f_{cl} \cdot \alpha (t_{cl} - t_o) \quad (29)$$

In molti casi d'interesse (va < 0,2 m/s $t_r - t_a < 4^\circ\text{C}$) la temperatura operativa può essere in pratica calcolata semplicemente come media aritmetica dei valori della temperatura a bulbo secco dell'aria e della temperatura media radiante:

$$t_o = (t_a + \bar{t}_r) / 2 \quad (30)$$

La valutazione di una particolare situazione ambientale dal punto di vista termico in rapporto al grado di benessere (e cioè il gradimento di un ambiente da parte degli individui che entro esso operano) può essere formulata come valore medio del voto numerico espresso da un campione di persone che, in definite condizioni d'attività e vestiario, sono assoggettate alla situazione ambientale considerata; tale voto è usualmente espresso secondo la scala ASHRAE di "sensazione termica", così definita:

voto	sensazione termica soggettiva
+3	molto caldo
+2	caldo
+1	leggermente caldo
0	confortevole neutralità termica
-1	leggermente freddo
-2	freddo
-3	molto freddo

Le singole votazioni, nella scala di sensazione termica, di un gruppo di persone assoggettate a determinate condizioni ambientali presentano ovviamente una certa dispersione attorno al valore medio. Per fissati valori dei parametri di benessere termico è importante quindi poter determinare non solo il voto medio previsto nella scala di sensazione termica PMV (Predicted Mean Vote) ma anche l'associata percentuale di persone prevedibilmente non soddisfatte PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), esprimenti cioè un apprezzamento negativo per le condizioni ambientali, corrispondente alle votazioni +3, +2, -2, -3. La Tabella III, basata sulle sperimentazioni di Fanger che hanno coinvolto 1300 individui, mostra la distribuzione dei voti di sensazione termica ed il corrispondente valore dell'indice PPD per differenti valori del voto medio previsto PMV.

I dati riportati nella Tabella III mettono in evidenza come anche nella situazione di benessere termico ottimale (PMV=0) solo 55 persone su cento si dichiarano completamente soddisfatte (esprimono cioè voto 0), 40 si dichiarano abbastanza soddisfatte (voto -1 o +1), mentre 5 si dichiarano insoddisfatte (voto -2 o +2): l'indice PPD vale 5; da rilevare inoltre che quanto riportato si riferisce a condizioni di sperimentazione, e cioè in particolare con valori di attività svolta e isolamento termico del vestiario rigorosamente controllate.

TABELLA III

PMV	PPD	Percentuale di persone presunte esprimere la votazione:		
		0	-1, 0 o +1	-2, -1, 0, +1 o +2
+2	75	5	25	70
+1	25	27	75	95
0	5	55	95	100
-1	25	27	75	95
-2	75	5	25	70

La relazione generale tra gli indici di sensazione termica "voto medio previsto" PMV e "percentuale di persone insoddisfatte" PPD, ancora ricavata da Fanger su basi sperimentali, è riportata in forma grafica nel diagramma di [fig. 1](#). In forma analitica tale relazione è esprimibile nel seguente modo:

$$PPD = 100 - 95 \exp \left[- \left(0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2 \right) \right] \quad (31)$$

Per la valutazione analitica dell'indice di sensazione termica PMV (e quindi anche del corrispondente valore dell'indice PPD) in funzione del valore delle variabili soggettive ed ambientali di benessere in un ambiente uniforme cosiddetto moderatamente termico, possono ancora essere impiegate le relazioni sviluppate in precedenza. Infatti (sempre secondo Fanger) la sensazione termica del corpo, per un dato livello di attività svolta, è proporzionale alla cosiddetta sollecitazione termica L, secondo la relazione:

$$PMW = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028] \cdot L$$

ove la sollecitazione termica L [W/m²] è da intendersi come la differenza tra la produzione interna specifica di calore metabolico e la potenza termica specifica che l'individuo scambierebbe con l'ambiente considerato ai valori di temperatura media cutanea e perdita per sudorazione richiesti dalla condizione di benessere termico riferito al valore effettivo di attività metabolica (i valori cioè dati dalle relazioni (25) e (26)).

Da tutto quanto esposto in precedenza derivano quindi le seguenti relazioni per la valutazione dell'indice PMV:

$$PMW = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028] \cdot \left\{ M(1-n) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99 M(1-n) - \varphi \cdot p_{as}] - 0,42 [M(1-n) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M(5867 - \varphi \cdot p_{as}) - 0,0014 M(34 - t_a) - f_{cl} \alpha_c (t_{cl} - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \right\} \quad (33)$$

ove:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 M(1-n) - I \cdot \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot \alpha_c (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (34)$$

e per il calcolo di a_c e f_{cl} vengono utilizzate rispettivamente le relazioni (8) e (22). Le equazioni scritte valgono con tutte le grandezze espresse nelle unità coerenti dal sistema SI, con le temperature espresse in gradi centigradi.

Con le relazioni riportate si può calcolare l'indice PMV per diverse combinazioni delle variabili soggettive (attività ed abbigliamento) ed ambientali (temperatura dell'aria e media radiante, umidità e velocità dell'aria). Le equazioni per il calcolo di a_c e f_{cl} devono venire risolte per iterazioni successive.

Le stesse relazioni, imponendo $PMV=0$, definiscono le condizioni di benessere termico in un ambiente uniforme.

Gli indici PMV e PPD, calcolati secondo le procedure sviluppate da Fanger, vengono attualmente adottati per la valutazione delle condizioni termoigrometriche ambientali nei riflessi del benessere da numerose norme o raccomandazioni sull'argomento, in particolare dalla norma ISO-7730 (Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort). Questa norma fissa i seguenti limiti di applicabilità della procedura esposta:

$$0,8 = M = 4 \text{ met}$$

$$0 = I = 2 \text{ clo}$$

$$10 = t_a = 30 \text{ °C}$$

$$10 = t_r = 40 \text{ °C}$$

$$0 = v = 1 \text{ m/s}$$

$$-2 = PMV = 2$$

A quanto è dato sapere anche il progetto di norma nazionale concernente il benessere termico nei locali, in corso di elaborazione presso il Sottocomitato n. 9 del C.T.I., fa riferimento alle relazioni di Fanger.

Il diagramma di [fig. 2](#) riporta, in funzione della resistenza termica del vestiario e del livello di attività svolta, il valore della temperatura operativa (curve a tratto continuo) corrispondente a condizioni di benessere ottimale, calcolato a mezzo dell'equazione del benessere di Fanger. Il diagramma si riferisce ad umidità relativa costantemente al valore $f = 0,5$ ed a valori della velocità relativa aria-individuo v quali precisati nello stesso diagramma in funzione dell'attività metabolica specifica M (cfr. la relazione (10)); in pratica il diagramma è applicabile per velocità assolute dell'aria in ambiente inferiori a 0,15 m/s.

Per tenere conto delle disuniformità locali nella zona occupata degli spazi climatizzati, ma anche in considerazione dei risparmi energetici che si possono conseguire nella gestione degli impianti di climatizzazione, le normative sul benessere ambientale oltre che definire le condizioni ottimali (che comunque, come già visto, non soddisfano la totalità degli individui) specificano quelle che possono essere considerate condizioni accettabili per il benessere termico ambientale. La recente norma ASHRAE (ANSI-ASHRAE 55-1981: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy) definisce come condizioni ambientali accettabili per il benessere quelle che si prevede possano essere dichiarate tali da almeno 80% degli individui. Questa situazione è invece individuata nella ISO 7730 con la seguente condizione per l'indice PMV:

$$-0,5 = PMV = +0,5$$

cui corrisponde PPD = 10%. Gli scostamenti massimi di temperatura operativa attorno al valore ottimale di benessere per rimanere entro il criterio di accettabilità prima definito (a valori degli altri parametri di benessere immutati) sono rappresentati dalle curve tratteggiate nel diagramma di [fig. 2](#). Tenendo conto del modesto effetto dell'umidità dell'aria sul benessere termico in prossimità delle condizioni di benessere ottimale, il diagramma di [fig. 2](#) può essere utilmente impiegato per individuare, in funzione del grado di attività svolta e dell'isolamento termico del vestiario, la zona di condizioni accettabili di benessere in termini di temperatura operativa in ambienti ove la velocità dell'aria è inferiore a 0,15 m/s.

Nel successivo diagramma di [fig. 3](#) vengono individuati gli intervalli di temperatura operativa ambientale che definiscono, in relazione agli abbigliamenti tipici dei periodi estivo ed invernale, le zone accettabili di benessere termico con umidità relativa attorno al 50% e velocità di movimento dell'aria nella zona occupata degli ambienti inferiore a 0,15 m/s: ci si riferisce qui ad attività tipica sedentaria (M=1,2 met), quale esplicitata negli uffici, scuole, abitazioni.

Si è già osservato più sopra come, in prossimità delle condizioni di benessere ottimale, l'umidità relativa dell'aria abbia un effetto modesto sul benessere termico ambientale. A questo proposito si può osservare la successiva Tabella IV, ove per il valore di umidità relativa $f = 0,5$ (50%) vengono individuate le condizioni di benessere (PMV=0) per tipica situazione di lavoro sedentario nella stagione estiva ($1=0,5$ do) ed invernale ($1=1$ do); per gli stessi valori dei parametri individuali e dei rimanenti ambientali, vengono indicati i valori degli indici di benessere PMV e PPD con l'umidità variata ai valori $f = 0,2$ e $f = 0,8$; si veda come i valori di questi indici si discostino in misura assai modesta dai valori di benessere ottimale.

TABELLA IV

Metabolismo M = 1,2 met - velocità dell'aria v = 0,1 m/s n = 0

Estate: I = 0,5 clo; $t_a = t_r = 24,7$ °C			Inverno: I = 1 clo $t_a = t_r = 21,5$ °C		
f = 0,50	0,20	0,80	f = 0,50	0,20	0,80
PMV = 0,00	-0,21	0,21	PMV = 0,00	-0,18	0,17
PPD = 5,00	5,91	5,88	PPD = 5,00	5,65	5,57

Risulta comunque opportuno che l'umidità relativa sia mantenuta entro l'intervallo 40%-60%, non tanto per considerazioni di benessere, ma soprattutto perché entro questo intervallo vengono minimizzati processi biologici (proliferazione di microrganismi patogeni) o chimici nocivi e possibilità di contrarre affezioni all'apparato respiratorio, come messo in evidenza in forma schematica nel diagramma di [fig. 4](#).

Nel diagramma psicrometrico di [fig. 5](#) (ove la scala delle ascisse è interpretata come temperatura operativa) sono invece rappresentate le zone delle condizioni accettabili per il benessere, per la stagione invernale e per quella estiva, suggerite nel già citato ASHRAE Standard 55-1981: le zone rappresentate si riferiscono ad attività svolta di tipo sedentario (M = 1,2 met), per tipici abbigliamenti nordamericani all'interno di locali (inverno: ~0,9 clo; estate: ~ 0,5 clo) e per velocità relativa dell'aria < 0,15 m/s. I dati della [fig. 5](#) sono in sostanziale accordo con quelli di [fig. 2](#).

Nel diagramma di [fig. 5](#) l'umidità è descritta in termini di temperatura di rugiada dell'aria: secondo lo Standard ASHRAE considerato questa deve essere compresa tra i valori limite 1,7 °C e 16,7 °C. Questi valori appaiono peraltro troppo ampi secondo quanto detto in precedenza. Da notare che il diagramma di [fig. 5](#) giustifica appieno quanto imposto, al fine del contenimento dei consumi energetici negli impianti di climatizzazione con controllo dell'umidità ambientale, dalla normativa ANSI/ASHRAE/IES 90A-1980 (Energy conservation in new buildings design): viene qui stabilito infatti che l'impianto non possa intervenire per aumentare l'umidità relativa ambientale al di sopra del valore 30%, né per diminuire l'umidità relativa al di sotto del valore 60% quando l'intervento stesso richieda il dispendio di energia addizionale. Per le implicazioni che comportano ai fini di una gestione economica degli impianti di climatizzazione, questi limiti dovrebbero essere considerati con maggior attenzione dagli estensori dei capitolati d'appalto (beninteso quando il controllo dell'umidità ha solo finalità di realizzare condizioni di benessere termico).

Ancora tratto dallo Standard ANSI-ASHRAE 55-1981 è il diagramma di [fig. 6](#) che, sostanzialmente in accordo con i dati ricavabili dalla teoria del benessere termico di Fanger, permette di dedurre il valore della temperatura operativa ottimale t_o (di benessere) in funzione del livello di attività svolta e della resistenza termica dell'abbigliamento, per velocità di movimento dell'aria in ambiente $v_a < 0,15$ m/s ed umidità relativa attorno a $f = 0,50$.

Pur in presenza di neutralità termica complessiva, situazioni di disagio possono derivare per effetto di condizioni ambientali non uniformi o non stazionarie. Sempre con riferimento ad attività sedentaria e vestiario tipico, i presupposti da soddisfare per realizzare condizioni accettabili di benessere termico (in prossimità della neutralità termica complessiva) possono essere così riassunti:

- variazioni ad andamento periodico di temperatura operativa: se eccedenti l'ampiezza di 1,1 K, la velocità di variazione non deve superare 2,2 K/h;
- derivate della temperatura operativa: possono essere tollerate se con velocità di variazione non eccedente 0,6 K/h, e se il valore di temperatura non esce dalla zona del benessere di oltre 0,6 K e per oltre un'ora;
- gradiente di temperatura verticale: la differenza della temperatura dell'aria, misurata tra 1,7 m e 0,1 m dal piano di pavimento, non deve eccedere 3 K.
- dissimetria della temperatura radiante: definita come differenza tra le temperature radianti dell'ambiente sulle facce opposte di un elemento piano. La dissimetria radiante verticale è valutata con riferimento ad un elemento piano orizzontale a 0,6 m dal piano di pavimento; la dissimetria radiante orizzontale è valutata rispetto ad un elemento piano verticale ancora a 0,6

m dal piano di pavimento. Poiché maggiore è la sensibilità agli individui per dissimmetrie radianti conseguenti ad un soffitto riscaldato, per questa situazione il limite massimo ammissibile (dissimmetria radiante verticale) è 5 K. Per la dissimmetria radiante orizzontale il limite massimo ammissibile è invece 10 K.

- temperatura superficiale del pavimento: deve essere compresa tra 18 °C e 29 °C (riscaldamento a pavimento).

Uno dei più frequenti motivi di insoddisfazione manifestato da persone che stazionano in ambienti climatizzati è dovuto alla presenza di correnti d'aria, che causano raffreddamento indesiderato locale del corpo. Il movimento dell'aria negli ambienti climatizzati è generalmente turbolento, ed in quanto tale definito da un valore medio di velocità v_a (che è quello considerato nelle relazioni di benessere) con rapide fluttuazioni istantanee attorno a questo valore caratterizzabili attraverso il parametro deviazione standard SD_v , il rapporto SD_v/v_a è chiamato "intensità di turbolenza", ed assume valori tipici attorno a 0,30 ~ 0,50 negli spazi climatizzati. Studi preliminari in corso (che proseguono per una definizione più puntuale del fenomeno) hanno permesso di individuare i principali elementi di disagio da correnti d'aria:

- velocità media ed intensità di turbolenza della corrente: il disagio cresce all'aumentare del valore di questi parametri;
- temperatura della corrente: il disagio diminuisce all'aumentare del suo valore;
- differenza tra temperatura media dell'aria ambiente e temperatura della corrente: il disagio aumenta al crescere del valore di questa differenza;
- zona del corpo investita: le zone più sensibili sono testa, collo, spalle e caviglie;
- la sensibilità alle correnti d'aria diminuisce inoltre all'aumentare del livello di attività esplicata, e dipende dal grado di benessere globale.

Il diagramma di [fig. 7](#), basato sui risultati di sperimentazioni che hanno coinvolto un centinaio di soggetti, permette di determinare la percentuale di insoddisfatti in funzione della velocità media di movimento dell'aria v_a e della sua temperatura; il diagramma si applica a soggetti dediti ad attività sedentaria investiti da corrente d'aria alla temperatura media ambientale tra testa e collo, in condizioni di benessere globale; il valore dell'intensità di turbolenza è compreso tra 0,30 e 0,50.

Per quanto riguarda la già citata norma ISO 7730, i limiti massimi per la velocità di movimento dell'aria consigliati per limitare il disagio da corrente nelle zone occupate di ambienti ove viene svolta attività leggera (sedentaria) sono i seguenti:

- nella stagione invernale $v_a = 0,15$ m/s
- nella stagione estiva $v_a = 0,25$ m/s

Sostanzialmente in linea con questi valori sono anche le prescrizioni dello Standard ANSI-ASHRAE 55-1981, che è molto articolato sull'argomento: mentre per la stagione invernale si raccomanda di non superare il valore di 0,15 m/s, viene precisato che nella stagione estiva la temperatura di benessere può essere estesa al di sopra del valore $t_a = 26$ °C qualora la velocità dell'aria venga incrementata di 0,275 m/s (oltre il valore $v_a = 0,25$ m/s) per ogni grado centigrado d'aumento di temperatura, e ciò fino ai valori massimi $t_a = 28$ °C, $v_a = 0,8$ m/s; tutto questo vale al solito con riferimento ad attività sedentaria e valori tipici dell'isolamento del vestiario già considerati.

Alla luce dei più recenti risultati emersi dalle ricerche in corso sull'argomento, tutti questi limiti appaiono peraltro eccessivamente permissivi.

VENTILAZIONE DEGLI AMBIENTI

All'interno degli spazi abitati vincolati a realizzare solo condizioni di benessere per gli occupanti la qualità dell'aria deve essere mantenuta a livello accettabile per quanto riguarda il contenuto di sostanze contaminanti; con ciò in questo caso si intende il verificarsi contemporaneo di due condizioni: a) la concentrazione di contaminanti potenzialmente pericolosi alla salute è mantenuta opportunamente al di sotto dei valori di soglia di nocività; b) una sostanziale maggioranza degli occupanti (usualmente ancora giudica l'ambiente di proprio gradimento rispetto agli effetti che possono derivare dalla presenza dei contaminanti stessi (odori molesti, irritanti, etc.).

Tre sono i metodi comunemente impiegati per il controllo della qualità dell'aria all'interno degli spazi climatizzati nei riguardi delle sorgenti interne di contaminazione:

1. **controllo alla sorgente:** comprende i metodi o le tecniche intese a minimizzare lo sviluppo di inquinanti, o a limitarne la dispersione nello spazio occupato. Esempi sono il semplice divieto di fumare, oppure l'uso di cappe nei laboratori chimici o cucine, o i vari sistemi locali di aspirazione dei fumi da saldatura o la posa in opera di estrattori d'aria nei servizi igienici;
2. **controllo per diluizione:** è il metodo più usuale negli ambienti civili, ed è realizzato mediante il ricambio dell'aria ambiente con aria esterna di rinnovo: tale ricambio può essere naturale (per infiltrazione), meccanico oppure una combinazione dei due; l'applicazione del metodo presuppone ovviamente che la qualità dell'aria esterna sia adeguata allo scopo;
3. **controllo per rimozione:** presuppone l'uso di apparecchi di depurazione dell'aria ambiente, in grado di rimuovere con efficienza adeguata particolari contaminanti. Si tratta usualmente di filtri meccanici o elettrostatici per i contaminanti di tipo particellare, o filtri ad assorbimento (carbone attivo, allumina) oppure lavatori per i contaminanti in forma di gas o vapore. L'uso di questa tecnica è perlomeno sempre associato al controllo per diluizione; gli apparecchi di rimozione possono essere inseriti direttamente in ambiente oppure nei sistemi di trattamento dell'aria a ricircolazione meccanica.

Il controllo della qualità dell'aria all'interno degli ambienti per sola diluizione con aria esterna è indubbiamente il sistema più semplice, ma anche il più gravoso dal punto di vista energetico per gli impianti di climatizzazione in relazione ai carichi termici associati alle portate d'aria di rinnovo; nei sistemi a ventilazione forzata l'uso di recuperatori di calore tra l'aria espulsa e l'aria di rinnovo è ormai prassi comune, imposta anche in molti casi da norme di legge (nel nostro Paese dalla legge 373/76).

In linea di principio le portate d'aria esterna richieste per mantenere per diluizione all'interno degli ambienti condizioni accettabili di igiene e purezza possono essere calcolate fissando opportuni valori soglia per le concentrazioni ammissibili dei contaminanti, una volta che si possano individuare quantitativamente le sorgenti interne di contaminazione. In questo contesto si deve naturalmente tenere nel debito conto la necessità di contemperare le esigenze di accettabile qualità dell'aria con quelle di risparmio energetico nella gestione dell'impianto di climatizzazione.

In molte situazioni (edifici civili, commerciali etc.) la contaminazione all'interno degli ambienti può essere considerata proporzionale al numero di occupanti in relazione all'attività svolta: le necessità di rinnovo d'aria minimo dovranno razionalmente essere espresse in questo caso in termini di portata d'aria esterna per persona presente. Solo in casi particolari altre formulazioni potranno essere più adeguate.

Un riferimento che nel recente passato è stato spesso assunto per la determinazione dei valori raccomandabili per le portate d'aria di rinnovo da prescrivere quale condizione progettuale per gli impianti di climatizzazione è l'ASHRAE Standard 62-1981 (Ventilation for acceptable indoor air quality), elaborato con particolare riferimento alle esigenze di contenimento dei consumi energetici.

Il citato ASHRAE Standard fissa innanzitutto quali sono i requisiti minimi a cui deve soddisfare l'aria esterna per poter essere direttamente utilizzata quale aria di rinnovo per gli spazi interni. Ciò premesso, vengono tabulate le portate di aria esterna di diluizione richieste per mantenere, all'interno di ambienti a più tipiche destinazioni d'uso, condizioni accettabili (qualora non siano presenti sorgenti di contaminazione atipiche): le necessità di rinnovo d'aria vengono quasi sempre espresse come portata richiesta per occupante, con valori distinti a seconda che nell'ambiente considerato sia permesso o meno di fumare; per agevolare i computi vengono forniti anche valori tipici per la densità di occupazione. Quando il numero degli occupanti non può essere previsto con sufficiente accuratezza o può variare considerevolmente, o quando la contaminazione interna prevalente non è legata alla presenza delle persone, il rinnovo d'aria richiesto viene espresso in termini di portata per unità di area di pavimento oppure portata richiesta per singolo ambiente.

In questo Standard la portata minima di aria esterna di rinnovo è stata attribuita ad un individuo in attività sedentaria ($M = 1,2$ met) in un ambiente di non fumatori, sulla base della necessità di diluire la concentrazione di CO_2 generata dall'attività respiratoria (questa funzione risulta infatti prevalente sulla necessità di reintegro dell'ossigeno consumato). È stato assunto come limite massimo interno di CO_2 un valore di concentrazione volumetrica pari a 0,25% che, essendo la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera esterna pari a 0,03%, determina una portata minima di aria esterna di rinnovo di 8,5 m^3/h (2,4 l/s; 5 cfm) per persona. Questo valore innovava in senso fortemente limitativo quanto in precedenza accettato. L'applicazione dei ridotti tassi di ventilazione suggeriti dallo Standard ASHRAE 62-1981 si è peraltro dimostrata assolutamente inadeguata ad assicurare una accettabile qualità dell'aria all'interno degli spazi climatizzati; risulta che di recenti ricerche hanno evidenziato come per ridurre a livello accettato dall'ottanta per cento degli individui (visitatori che accedono in un locale) la sensazione olfattiva in condizioni equivalenti a quelle considerate più sopra, siano necessari tassi di rinnovo d'aria pari a tre volte quelli minimi considerati nello Standard ASHRAE -1981; in questa ipotesi inoltre si mantiene la concentrazione di CO_2 negli ambienti entro lo 0,1%, valore ritenuto rispondente alle raccomandazioni correnti dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, ed in linea con quanto fissato da molte nazioni europee e dal Giappone.

Sulla base delle considerazioni esposte l'ASHRAE ha provveduto alla stesura della revisione dello Standard sulla ventilazione minima per assicurare un livello accettabile della qualità dell'aria, che sarà disponibile nella forma definitiva nell'autunno 1989; le portate di aria esterna raccomandate per tipiche destinazioni d'uso di locali climatizzati sono riportate nella Tabella V.

PORTATE CONSIGLIATE DI ARIA DI RINNOVO (ASHRAE 62-81 R)

Ambiente	Affollamento massimo persone/100 m ²	Portata aria rinnovo m ³ /(h persona)
Sale di spettacolo	50	27
Bar, sale da cocktails	100	54
Ristoranti	70	36
Camere d'albergo	-	27
Uffici	7	36
Aule scolastiche	50	27
Foyers	70	105 ⁽¹⁾
Sale d'aspetto	100	27 ⁽¹⁾
Residenze	-	0,35 vol/h (min.27 m ³ /(h persona))

⁽¹⁾ sono raccomandate estrazioni localizzate

Un punto notevole recepito negli Standards ASHRAE è relativo agli spazi ad occupazione variabile, per i quali vengono suggerite strategie operative per la ventilazione. Per esempio negli ambienti ad occupazione discontinua (aule scolastiche, teatri, uffici etc.), ed ove la contaminazione interna è generata principalmente dalla presenza delle persone, l'attivazione dell'immissione dell'aria di rinnovo può essere ritardata rispetto all'inizio del periodo d'occupazione in dipendenza della portata d'aria necessaria a regime e del volume totale d'ambiente. Per contro quando la contaminazione determinante è generata nello spazio indipendentemente dalla presenza degli occupanti, l'attivazione dell'immissione dell'aria di rinnovo dovrà anticipare l'inizio del periodo d'occupazione. I criteri per la determinazione dei periodi di anticipo o ritardo tra attivazione della ventilazione e inizio dell'occupazione sono suggeriti nel documento originale. Da citare ancora che lo Standard ASHRAE 62, oltre al metodo indiretto di cui si è detto più sopra, contempla in alternativa un metodo cosiddetto diretto per il controllo della qualità dell'aria negli ambienti; tale metodologia si limita a fissare (mediante misure oggettive e valutazioni soggettive) l'obiettivo da conseguire in termini di qualità dell'aria ambiente, nulla specificando sui sistemi da adottare per conseguire questo obiettivo: viene incoraggiata l'adozione di soluzioni innovative. Si vuole infine osservare come dipenda sostanzialmente da inadeguata ventilazione l'insorgere della sindrome da edifici insalubri. Una ventilazione inadeguata può derivare non solo da portate insufficienti di aria di rinnovo previste in sede progettuale ma anche:

- da insufficiente efficacia della ventilazione nel diluire i contaminanti ambientali, ad esempio per effetto della corto circuitazione tra le bocchette di mandata e le griglie di ripresa negli ambienti climatizzati (inadeguato sistema di distribuzione dell'aria);
- da mancata considerazione in sede progettuale di sorgenti di contaminazione ambientale (quali ad esempio lo sviluppo di formaldeide da laminati plastici utilizzati per gli arredi);
- da inadeguata manutenzione dell'impianto, che rende attive nuove fonti di contaminazione non prevedibili in sede progettuale.

IL RUMORE AMBIENTALE

Il problema del controllo del rumore negli impianti di climatizzazione ha già formato oggetto specifico di precedenti Incontri, e l'argomento è diffusamente trattato in altra pubblicazione Aermec; si riprende qui, con opportune integrazioni, quanto riguarda l'individuazione delle più opportune condizioni progettuali.

Attualmente i criteri utilizzati per caratterizzare in maniera sintetizzata da un solo parametro il rumore ambientale di tipo stazionario sono i tre seguenti:

- livello sonoro ponderato A, espresso in dBA;
- indice NR (Noise Rating), o similari criteri NC (Noise Criterion) e PNC (Preferred Noise Criterion);
- criterio RC (Room Criterion).

Per quanto riguarda il criterio RC, questo risulta tuttora assai raramente utilizzato nella prassi europea, e non verrà quindi ulteriormente considerato in questa sede.

In termini di livello sonoro ponderato A, o valore dei criteri NR, oppure NC o PNC, vengono usualmente specificati i limiti massimi accettabili per la rumorosità indotta dagli impianti di climatizzazione sia negli spazi interni che nell'ambiente esterno in funzione delle specifiche destinazioni d'uso. Gli stessi limiti, tenuto eventualmente conto di un opportuno margine di sicurezza, costituiscono quindi anche adeguati riferimenti progettuali.

E' noto come il livello sonoro ponderato A sia un descrittore del rumore a banda larga correlabile col suo effetto di disturbo (ed anche con la possibilità di procurare danno uditivo); si determina con una misura strumentale diretta, quando nel circuito di misura dello strumento (fonometro) viene inserito il filtro normalizzato A, di caratteristiche di risposta in funzione della frequenza normalizzate in sede internazionale (I.S.O. R226-1961). Nella catena di misura dello strumento l'inserimento del filtro A realizza fondamentalmente un'attenuazione del contributo energetico delle componenti di bassa frequenza di un rumore, una lieve amplificazione alle frequenze medie, ed ancora una attenuazione alle frequenze più elevate, riproducendo in tal modo la caratteristica qualitativa generale di sensibilità dell'orecchio umano.

Il livello sonoro ponderato A, espresso in decibel A, è quindi definito dalla relazione:

$$L_{pA} = 20 \log_{10}(p_A/p_R) \quad [dBA] \quad (35)$$

ove p_A è il valore efficace della pressione sonora ponderata "A", mentre p_R è il solito valore di riferimento per la pressione sonora $p_R = 20 \mu Pa$).

Quando si è in presenza di un campo sonoro con caratteristiche non stazionarie nel tempo, l'impiego di un fonometro integratore permette ancora di determinare un descrittore sintetico dell'effetto di disturbo; tale grandezza è il "livello sonoro continuo equivalente" (ponderato A), definito in termini analitici come segue:

$$L_{pAeq,T} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left[p_A(t) / p_R \right]^2 dt \right] \quad [dBA] \quad (36)$$

ove $p_A(t)$ è il valore istantaneo della pressione sonora pesata "A", T è l'intervallo di tempo della misura, mentre è il solito valore di riferimento per la pressione sonora.

Il valore del livello sonoro continuo equivalente può essere interpretato come quel valore del livello sonoro (ponderato A), che agendo con continuità in modo stazionario nell'intervallo di tempo T, causerebbe la ricezione della medesima energia sonora (ponderato A) dell'effettivo campo sonoro non stazionario.

Il livello sonoro ponderato A, misurato negli ambienti in condizioni di arredamento medio, è la grandezza fonometrica a cui fa riferimento la norma nazionale UNI 8199-1981 ("Misura in opera e valutazione del rumore prodotto negli ambienti dagli impianti di riscaldamento, condizionamento e ventilazione"), che ha appunto per scopo la definizione dei criteri di misura e dei limiti di accettabilità della rumorosità indotta all'interno degli ambienti dagli impianti di climatizzazione. Il limite accettabile per il livello sonoro ponderato A negli ambienti serviti da impianti di climatizzazione è fissato in funzione del livello (ponderato A) del rumore di fondo (e cioè quando l'impianto non è in funzione; più appropriata è in questo caso la dizione "rumore residuo"), quest'ultimo valore dovendo essere preventivamente stabilito dal committente dell'impianto in base alla destinazione degli ambienti interessati, alle caratteristiche costruttive ed all'ubicazione dell'edificio ed eventualmente a dati di misura; la stessa norma riporta comunque, a titolo indicativo, valori del livello sonoro di fondo coerenti con tipiche destinazioni d'uso d'ambienti. Il criterio adottato dalla norma UNI 8199 per legare il valore massimo ammissibile per il livello sonoro ambientale al livello del rumore di fondo è il seguente: per livelli sonori di fondo molto bassi, inferiori a 20 dBA, il livello sonoro ambientale massimo ammissibile è comunque di 30 dBA; per livelli di rumore di fondo molto elevati, 65 dBA od oltre, il funzionamento dell'impianto di climatizzazione non deve contribuire ad incrementare il livello sonoro dell'ambiente al di sopra dei livelli di fondo stabiliti; per valori intermedi dei livelli del rumore di fondo (fra 20 dBA e 65 dBA), il funzionamento dell'impianto può comportare un contenuto aumento del livello sonoro ambientale, come specificato nel diagramma di [figura 8](#).

La citata norma UNI stabilisce infine che nel caso di rumore ambientale di tipo variabile il parametro fonometrico da valutare e da confrontare col valore limite ammesso è il livello sonoro equivalente (ponderato A) determinato per un tempo di osservazione significativo, mentre in presenza di toni puri i limiti massimi ammissibili sono ridotti di 5 dBA; non sono inoltre ammessi rumori dalle caratteristiche impulsive. La metodologia di caratterizzazione del rumore (di tipo stazionario, variabile, con toni puri o impulsivo) è stabilita dalla norma stessa.

L'adozione del livello sonoro ponderato W per esprimere i limiti massimi ammessi per la rumorosità ambientale, vantaggiosa in quanto questo parametro è direttamente valutato attraverso una misura strumentale, presenta quale principale elemento di critica il fatto di non correlare sufficientemente il diverso effetto di disturbo che differenti rumori mostrano in funzione della loro distribuzione in frequenza. Si è d'altra parte già visto come la stessa norma UNI 8199 penalizzi a questo proposito i rumori con caratteristica tonale. La valutazione di un rumore di tipo stazionario in termini di indice NR presuppone la misura del livello di pressione sonora del rumore stesso, effettuata per bande d'ottava normalizzate di frequenza nominale tra 31,5 e 8000 Hz. I livelli di pressione sonora per banda d'ottava sono riportati in un diagramma come quello rappresentato nella [fig. 9](#) ove la presenza delle curve di riferimento NR permette di attribuire, per ogni banda d'ottava normalizzata, il relativo valore numerico NR; globalmente il rumore viene caratterizzato dal valore NR della banda più disturbante, e cioè dal valore maggiore tra quelli relativi alle diverse bande d'ottava, il valore numerico delle curve di riferimento NR coincide con il valore dell'ordinata a i kHz; i dati intermedi alle curve di riferimento vengono usualmente interpolati a valori interi.

La valutazione di un rumore in termini di criterio NC o PNC, d'uso molto diffuso in Nordamerica, avviene in maniera del tutto analoga a quanto riportato più sopra relativamente all'indice NR; ci si riferisce solo a curve di riferimento differenti. Tali curve sono meno permissive rispetto alle omologhe curve NR, in corrispondenza alle bande di bassa frequenza (sotto 125 Hz); il criterio PNC è meno permissivo rispetto all'indice NR, a parità di valore numerico, anche in corrispondenza alle bande di più alta frequenza (4 kHz e 8 kHz) del campo acustico.

La Tabella VI indica, quale utile riferimento da adottare nella progettazione degli impianti di climatizzazione, i valori raccomandati per la rumorosità ambientale (espressi secondo gli indici più sopra considerati) in ambienti a diverse destinazioni d'uso.

LIVELLI DI RUMOROSITA' AMBIENTALE ACCETTABILI PER DIFFERENTI LOCALI

LOCALE	LIVELLI ACCETTABILI DI RUMORE	
	PNC, NC, NR	dBA
Studi radiofonici, televisivi e di registrazione	20	25
Sale da concerto; Teatri d'opera	20-25	25-30
Cinematografi; Sale per conferenze	25-30	30-35
Residenze: camere da letto soggiorni	25-30 30-35	30-35 35-40
Uffici: a occupazione singola a pianta aperta	25-35 35-40	30-40 40-45
Aule scolastiche	25-35	30-40
Biblioteche (sale di lettura)	30-35	35-40
Ospedali: camere di degenza laboratori	25-30 30-35	30-35 35-40
Centri meccanografici	40-45	45-50
Piscine; Palestre	35-45	40-50
Grandi magazzini	35-45	40-50

All'esame di criteri di accettabilità del rumore generato dagli impianti di climatizzazione negli ambienti serviti, è opportuno aggiungere quello relativo al rumore generato verso l'esterno; spesso infatti apparecchiature componenti di impianti di climatizzazione (ad esempio torri evaporative o refrigeratori d'acqua condensati ad aria installati sulla copertura di un edificio) possono indurre livelli di rumorosità ritenuti non tollerabili in corrispondenza di circostanti edifici o spazi utilizzati da persone.

Una norma a carattere nazionale cogente sui limiti di rumorosità non esiste ancora nel nostro Paese; a tale proposito si è tuttora in attesa del relativo decreto che dovrebbe essere emanato, su proposta del Ministro della Sanità, in attuazione di quanto disposto dall'art. 4, ultimo comma, della legge n. 833 del Dicembre 1978 (istitutiva del Servizio Sanitario Nazionale). Poiché di tale decreto è ora disponibile uno schema che sembra vicino alla forma definitiva, se ne riportano nel seguito i punti salienti, iniziando con la parte relativa al rumore in ambiente esterno.

Nell'ambito dell'intero arco della giornata vengono innanzitutto distinti i periodi diurno e notturno: il periodo diurno e quello relativo all'intervallo di tempo tra le ore 06:00 e le ore 22:00; il periodo notturno è quello relativo all'intervallo di tempo compreso tra le ore 22:00 e le ore 06:00.

Il descrittore di rumore da misurare è il livello sonoro continuo equivalente (ponderato A) per un tempo di misura sufficiente ad ottenere una valutazione significativa del fenomeno sonoro, con microfono (munito di schermo antivento) collocato all'esterno degli edifici, a m i dalla facciata (per edifici con facciata a filo della sede stradale o di spazi liberi) o dalla perimetrazione esterna delimitante il distacco (per edifici con distacco dalla sede stradale o da spazi liberi); nelle aree esterne non edificate i rilevamenti devono essere effettuati in corrispondenza degli spazi utilizzati da persone o comunità.

Per il rumore devono essere individuate eventuali caratteristiche tonali o impulsive. Si riconosce la presenza di componenti tonali nel rumore effettuandone un'analisi spettrale per bande ad un terzo d'ottava, nel caso il livello di pressione sonora all'interno di una banda superi di almeno 5 dB i livelli di pressione sonora di ambedue le bande adiacenti. Per riconoscere soggettivamente la

presenza di caratteristiche impulsive nel rumore si procede alla misura del livello sonoro massimo (ponderato A) con costanti dinamiche IMPULSE e SLOW nello strumento misuratore; quando le due misure differiscono di più di 3 dBA, il rumore è considerato con componenti impulsive.

Ai fini della determinazione dei limiti massimi ammissibili per i livelli sonori continui equivalenti (ponderati A) di esposizione al rumore in funzione della destinazione d'uso dell'ambiente esterno si individuano nel territorio le classi di destinazione definite nella [Tabella VI](#); tali classi devono essere individuate con provvedimento dell'Autorità competente; in difetto, si dovrà tener conto della situazione di fatto esistente sulla base dei criteri indicati nella stessa Tabella. La successiva Tabella VIII riporta infine i valori dei limiti massimi ammissibili dei livelli sonori continui equivalenti (ponderati A) in relazione ai citati periodi di riferimento e classi di destinazione d'uso del territorio. Nel caso di caratteristiche impulsive o tonali del rumore, tali limiti devono essere diminuiti di 3 dBA (6 dBA per contemporanea presenza di caratteristiche tonali e impulsive).

VALORI DEI LIMITI MASSIMI DEL LIVELLO SONORO EQUIVALENTE (SCHEMA DI DL)

Classi di destinazione ed uso del territorio	Limiti massimi in dBA	
	Periodo diurno	Periodo notturno
I - Aree particolarmente protette	50	40
II- Aree prevalentemente residenziali	55	45
III- Aree di tipo misto	60	50
IV- Aree di intensa attività umana	65	55
V- Aree prevalentemente industriali	70	60
VI- Aree esclusivamente industriali	70	70

Esclusivamente durante il periodo diurno, nel caso che il rumore persista solo per un tempo compreso tra 60 e 15 minuti primi, i limiti riportati in Tabella VIII sono elevati di 3 dBA; sono elevati di 5 dBA, nel caso che il rumore persista per meno di 15 minuti primi (sempre con riferimento esclusivamente al periodo diurno).

Il criterio citato, da utilizzare come detto per la rumorosità nell'ambiente esterno, è di tipo assoluto, in quanto fissa dei valori limite assoluti per il livello sonoro equivalente in funzione del periodo considerato e delle classi di destinazione d'uso del territorio (con correzioni eventualmente dovute a particolari attributi del rumore che ne accentuano il carattere disturbante rispetto al criterio di equivalente energia sonora ponderata A).

Per rumori indotti (da sorgenti esterne) all'interno di ambienti confinati, la legge adotta piuttosto il criterio differenziale, applicato nella situazione di finestre chiuse. Si deve effettuare la misura del rumore ambientale (livello sonoro continuo equivalente con la specifica sorgente disturbante attivata) e del rumore residuo (livello sonoro continuo equivalente con la specifica sorgente disturbante disattivata). La differenza tra rumore ambientale e rumore residuo viene confrontato con i limiti massimi differenziali per classi di destinazione d'uso del territorio (cfr. Tab. VII) e periodo della giornata riportati nella Tabella IX.

VALORI DEI LIMITI MASSIMI DIFFERENZIALI DI LIVELLO SONORO EQUIVALENTE RELATIVI ALLE CLASSI DI DESTINAZIONE ED USO DEL TERRITORIO ED AI TEMPI DI RIFERIMENTO

Classi di destinazione ed uso del territorio	Limiti massimi in dBA	
	Periodo diurno	Periodo notturno
I - Aree particolarmente protette		
II - Aree prevalentemente residenziali		
III - Aree di tipo misto	5	3
IV - Aree di intensa attività umana		
V - Aree prevalentemente industriali		
VI - Aree esclusivamente industriali	7	7

Qualora il livello del rumore ambientale sia inferiore a 40 dBA durante il periodo diurno ed a 30 dBA durante il periodo notturno, ogni effetto di disturbo del rumore è ritenuto trascurabile e quindi il livello del rumore ambientale rilevato deve considerarsi accettabile. Inoltre valori di rumore ambientale superiori a 60 dBA durante il periodo diurno ed intermedio ed a 45 dBA durante il periodo notturno, non devono comunque essere considerati accettabili ai fini della applicabilità del criterio del limite massimo differenziale, restando comunque valida l'applicabilità del criterio stesso per livelli di rumore ambientale inferiori ai valori sopradetti.

Il livello sonoro misurato è ancora penalizzato di 3 dBA qualora vi sia presenza di componenti tonale o impulsiva. Qualora vi sia presenza contemporanea di componenti impulsive e tonali, il valore del livello sonoro equivalente continuo misurato deve essere maggiorato di 6 dBA.

Esclusivamente durante l'intervallo di riferimento diurno la depenalizzazione per la presenza di rumore a tempo parziale si applica esclusivamente se tale tipo di rumore persiste per un tempo totale non superiore a 60 mm. Qualora il rumore a tempo parziale sia compreso fra 15 e 60 mm, il valore del rumore ambientale misurato deve essere diminuito di 3 dBA; qualora sia inferiore a 15 mm., deve essere diminuito di 5 dBA.

Un riferimento sui limiti di rumorosità spesso adottato anche al di fuori dell'ambito territoriale lombardo, è quanto prescritto nel "Regolamento locale tipo di igiene" della Regione Lombardia, del quale si riportano nel seguito i punti principali.

Nel caso il rumore provenga da sorgenti sonore esterne all'insediamento disturbato, questo essendo costituito da ambienti chiusi, la misura deve essere effettuata collocando il microfono nel vano di una finestra aperta e ad un'altezza dal suolo non inferiore a 1,50. I criteri specifici di misura per i differenti tipi di rumore sono i seguenti:

1. **Rumori continui:** viene assunto come continuo un rumore caratterizzato da una cadenza di ripetizione elevata (indicativamente superiore a 10 eventi acustici al secondo).
Si adotta la costante di tempo SLOW e si effettuano le seguenti misure:
- livello sonoro globale in dBA;
- livelli di pressione sonora in dB nelle bande di ottava di frequenza centrale normalizzata comprese tra 31,5 e 8000 Hz.
Si assume che il rumore preso in esame sia caratterizzato dalla presenza di un tono puro quando il livello sonoro misurato in una banda di ottava superiori di almeno 3 dB il livello sonoro misurato in entrambe le bande ad essa adiacenti, oppure quando il livello sonoro misurato in una banda di un terzo di ottava superiori di almeno 5 dB quello misurato in entrambe le bande di un terzo di ottava ad essa adiacenti.
2. **Rumori impulsivi:** viene assunto come impulsivo un rumore caratterizzato da una successione di singoli eventi sonori di breve durata percepibili distintamente (cadenza di ripetizione indicativamente inferiore a 10 eventi acustici al secondo).
Si effettua la misura globale in dBA con costante di tempo IMPULSE.
3. **Rumori sporadici:** sono rumori di durata limitata che si verificano saltuariamente.
Si effettua la misura globale di dBA SLOW e si assume come lettura il valore massimo indicato dallo strumento.
Sono esclusi i rumori di allarme.

Ai fini dell'applicazione di questo regolamento, il territorio viene schematicamente suddiviso nelle seguenti quattro tipologie di zone:

- Zone di tipo 0 = ZONE DI PARTICOLARE TUTELA (per queste zone la quiete rappresenta una condizione indispensabile, ovvero essa può essere tutelata integralmente; tali zone sono individuate e delimitate da appositi atti comunali su proposta del Servizio n. 1 della USSL);
- Zone di tipo A = RESIDENZIALI (nel circondario dell'insediamento disturbato esistono prevalentemente insediamenti abitativi e similari);
- Zone di tipo B = MISTE (nel circondario dell'insediamento disturbato esistono abitazioni e attività industriali, artigianali, agricole ed assimilabili);

- Zone di tipo C = INDUSTRIALI (nel circondario dell'insediamento disturbato esistono prevalentemente insediamenti industriali, artigianali ed assimilabili).

Tale tipo di zonizzazione deve tener conto delle situazioni di fatto esistenti e quindi può non coincidere necessariamente con la zonizzazione prevista dal Piano Regolatore.

Sempre con riferimento a rumore proveniente da sorgenti sonore esterne all'insediamento disturbato, le prescrizioni del regolamento d'igiene tipo della Regione Lombardia, nella versione più recente del 1985, sono qui nel seguito indicate.

Innanzitutto non è ammesso l'esercizio di alcuna attività che alteri la situazione di quiete delle zone protette (zone di tipo 0) indipendentemente dalla localizzazione dell'insediamento rumoroso e dalla circoscrizione amministrativa a cui esso appartiene. Nel caso di nuovi insediamenti di attività rumorose, i limiti indicati vanno rispettati in ogni punto delle zone adiacenti destinate ad insediamenti abitativi ed assimilabili (uffici, alberghi, scuole, ecc.) anche se non ancora edificati, indipendentemente dalle circoscrizioni amministrative. Per quanto riguarda le tipologie di zone A-B-C in funzione del tipo di rumore e del periodo del giorno si assumono come limiti massimi i valori in dBA indicati in Tabella X.

LIMITI MASSIMI CONSENTITI [dBA] - (Regione Lombardia)

Tipo di rumore	Periodo notturno			Periodo diurno		
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
Continuo senza toni puri	40	45	50	55	60	65
Continuo con toni puri	37	42	47	52	57	62
Impulsivo	40	45	50	55	60	65
Sporadico	55	60	65	70	75	80

Per maggiore dettaglio di valutazione, nel caso di rumori di tipo continuo si può far riferimento ai livelli sonori limite nelle diverse bande di ottava riportati in Tabella XI.

I limiti indicati nelle Tabelle X e XI sono relativi ai livelli sonori rilevabili presso l'insediamento disturbato, nel caso che l'attività rumorosa sia preesistente all'entrata in vigore del presente Regolamento.

LIVELLI SONORI MASSIMI CONSENTITI NELLE DIVERSE BANDE DI OTTAVA [dB] - (Regione Lombardia)

Frequenza centrale della banda d'ottava (Hz)	Periodo notturno			Periodo diurno		
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
31,5	64	67	70	74	77	80
63	57	62	67	72	75	78
125	50	55	60	65	69	73
250	43	48	53	58	63	68
500	39	44	49	54	59	64
1000	35	40	45	50	55	60
2000	32	37	42	47	52	57
4000	29	34	39	44	49	54
8000	26	31	36	41	46	51

Qualora l'esercizio delle attività rumorose sia limitato ad una frazione del periodo diurno relativamente ai rumori di tipo continuo o impulsivo vengono ammessi i seguenti incrementi dei limiti indicati nelle Tabelle X e XI.

Durata delle attività nel periodo diurno (minuti primi)

= 120

= 60

= 30

Correzioni dei limiti indicati [dB o dBA]

+3

+6

+9

Per quanto riguarda il periodo notturno, e limitatamente al rumore prodotto per il funzionamento di impianti o apparecchiature in condizioni di emergenza è ammesso un incremento di 10 dBA rispetto ai limiti indicati per i rumori di tipo sporadico.

Nel caso di impianti preesistenti all'entrata in vigore del Regolamento e la cui attività è vincolata a un funzionamento continuo per esigenze tecniche, è ammesso, limitatamente al periodo notturno, un aumento di 5 unità dei limiti corrispondenti nelle Tabelle X e XI.

Si vuole infine ricordare che con l'entrata in vigore del regolamento di esecuzione della legge provinciale 20 novembre 1978 n° 66 "Provvedimenti contro l'inquinamento prodotto da rumore", dall'autunno 1988 è operante nella Provincia di Bolzano una normativa completa ed articolata in tema di difesa dal rumore.