

Cristiano Vergani  
Responsabile R & D  
Deparia Engineering S.r.l.

## **La percezione della qualità dell'aria negli ambienti interni**

*Giudicare "a naso" certo non basta per avere un quadro completo del livello di qualità dell'aria di un ambiente, ma può essere un metodo efficace per valutare con buona approssimazione il grado di comfort legato alla percezione degli odori.*

### **Introduzione**

La sensazione di trovarsi a proprio agio in un certo ambiente dipende da numerosi fattori, non ultimo l'odore percepito: un ricambio d'aria insufficiente può rendere invivibile un locale affollato, non solo per l'elevato livello di anidride carbonica, ma anche per l'odore sgradevole dei bioeffluenti. Per bioeffluenti si intendono tutte le molecole chimiche rilasciate nell'aria dell'ambiente da parte dell'organismo: si tratta per lo più di anidride carbonica e sostanze organiche volatili. Come è noto, la qualità dell'aria negli ambienti interni dipende principalmente dalla concentrazione degli inquinanti, ovvero dalla quantità di inquinanti rilasciata nell'aria in rapporto al fattore di diluizione determinato dal ricambio con aria pulita. Alcuni inquinanti non sono immediatamente percepibili ai nostri sensi: in presenza di queste sostanze, non è possibile valutare il livello qualitativo dell'aria se non per mezzo di strumenti di analisi (un tipico esempio di questo genere di inquinante è rappresentato dal gas radioattivo radon, incolore ed inodore). La maggioranza delle molecole inquinanti è però percepibile, non solo tramite l'odorato, ma anche per l'azione

irritante o tossica svolta sull'organismo. Ad esempio l'ozono e la formaldeide possiedono un odore pungente caratteristico ed in più sono fortemente irritanti per le mucose; l'anidride carbonica è del tutto inodore, ma a concentrazioni crescenti provoca sensazioni via via più intense di aria viziata e soffocante.

In condizioni normali, è impossibile discriminare l'azione dei singoli inquinanti; ciò che percepiamo è solo un livello più o meno elevato di accettabilità, che possiamo tradurre in una sensazione di "comfort" respiratorio più o meno elevato.

### **La percezione della qualità dell'aria**

Le sensazioni provocate dagli inquinanti possono essere di diversa entità da persona a persona, quindi i livelli di accettabilità dell'aria ambientale sono soggettivi e difficili da quantificare. Per di più, allo stato attuale, non è ancora disponibile un sensore in grado di valutare la qualità dell'aria come farebbe un naso umano (anche se la ricerca in questo campo promette novità a breve termine). Tuttavia, studi molto approfonditi hanno permesso di stabilire una serie di regole che permettono di utilizzare la sensazione soggettiva di comfort per quantificare il livello di qualità dell'aria degli ambienti interni. Dal 1987 è attivo un team di ricercatori europei, finalizzato al tema Indoor Air Quality (ex COST project 613/1), che vede partecipi 15 nazioni diverse sotto il coordinamento dell'Environment Institute del Joint Research Center di Ispra. Tra i vari gruppi di lavoro coinvolti, uno in particolare, guidato dal danese Ole Fanger, si è occupato della percezione sensoriale della qualità dell'aria. Come è noto, il lavoro di Fanger ha avuto notevole risonanza in ambito scientifico, anche per il fatto di avere introdotto delle unità di misura: l'**olf**, dal latino *olfactus*, che rappresenta la quantità di inquinanti percepibili aerodispersi da parte di una persona adulta con attività sedentaria; e il **decipol**, dal latino *pollutio*, che quantifica invece la qualità percepibile dell'aria e corrisponde alla sensazione avvertita respirando in uno spazio chiuso inquinato da un olf e sottoposto all'immissione di

10 l/s di aria pulita. Anche gli inquinanti percepibili dispersi nell'ambiente da fonti come il mobilio, i rivestimenti, gli impianti di trattamento dell'aria ecc., possono essere indicati in olf. Altro punto fondamentale della teoria di Fanger è la correlazione tra il livello di qualità dell'aria in decipol e la percentuale delle persone insoddisfatte in un determinato ambiente.

### **La teoria di Fanger**

I lavori del gruppo di Fanger hanno dato origine alla fine degli anni '80 ad una serie di pubblicazioni e nel 1992 alle raccomandazioni EUR 14449 EN (Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings). Nel 1994 una descrizione del metodo di dimensionamento della ventilazione secondo Fanger compare nel capitolo IAQ del prestandard CEN/TC 156 (Ventilation for Buildings), sollevando accesi dibattiti tra gli addetti alla ricerca del settore. E' bene specificare che, a fronte di molti aspetti positivi, la teoria di Fanger presta il fianco ad alcune critiche: in particolare, le si rimprovera una eccessiva tendenza alla semplificazione, specialmente per quanto riguarda il calcolo dell'indice di efficienza della ventilazione (vedi più avanti). Tuttavia, il metodo suggerito da Fanger per dimensionare il fabbisogno del ricambio in base alla qualità percepibile dell'aria si è dimostrato in molti casi uno strumento efficace e di facile impiego.

### **Percepire la qualità dell'aria**

Gli esseri umani possono percepire la qualità dell'aria attraverso due vie principali: la prima è costituita dal senso dell'olfatto, attraverso i recettori olfattivi presenti al termine della cavità nasale, sensibili a centinaia di migliaia di molecole differenti; la seconda consiste nei recettori sensoriali presenti sulle mucose delle prime vie respiratorie e dell'occhio, estremamente sensibili all'azione irritante di molte sostanze. La combinazione delle sensazioni raccolte attraverso queste due vie produce le sensazioni di aria piacevole

e leggera, oppure stantia e soffocante. Esistono anche altri meccanismi di reazione che possono influenzare la sensazione complessiva, come ad esempio gli effetti tossici degli inquinanti inalati: elevate concentrazioni di anidride carbonica provocano sensazioni di soffocamento ed affanno, modeste quantità di monossido di carbonio sono sufficienti a indurre stordimento e cefalee, con ovvie conseguenze sulla valutazione del livello qualitativo dell'aria.

### **L'olf**

Per quantificare l'inquinamento degli ambienti chiusi frequentati, occorre una fonte di riferimento: l'uomo stesso è una fonte primaria di inquinanti, sia direttamente, a causa delle proprie emissioni di bioeffluenti, che indirettamente, ad esempio con il fumo di tabacco. I bioeffluenti emanati da una persona che svolge una attività sedentaria in un ufficio o in un locale assimilabile, in condizioni di benessere termico, sono pari ad un olf (fig.1); questa persona standard possiede una attività metabolica di 1 met, ovvero 58 watt per m<sup>2</sup> di superficie corporea (cioè 90 kcal/h per una superficie media di 1,8 m<sup>2</sup>) ed un livello di igiene corrispondente a 0,7 docce al giorno. Ogni altra fonte di inquinamento percepibile viene riportata all'olf, quantificata come numero di olf necessari ad evocare la stessa sensazione sensoriale di insoddisfazione (fig.3). L'ammontare degli olf serve quindi a determinare il carico inquinante percepibile globale di un ambiente, causato dagli occupanti oppure emanato da mobili, rivestimenti, suppellettili, materiali di costruzione ecc..

## **Il decipol**

Se l'olf è l'unità di misura degli inquinanti percepibili, il decipol (dp) rappresenta l'unità di misura della qualità percepibile dell'aria ambientale, come risultato dell'interazione tra inquinanti e ventilazione. Più precisamente, una fonte inquinante pari a un olf, posta in un ambiente con una immissione di aria pulita pari a 10 l/s, porta ad un giudizio qualitativo pari a un decipol (fig. 2). Esiste una precisa relazione tra il livello qualitativo percepito in decipol e la percentuale di persone insoddisfatte (al primo impatto con l'ambiente, per evitare fenomeni di adattamento), espressa dalla curva del grafico in figura 5. Le percentuali pari al 15%, 20% e 30% di insoddisfatti, identificano tre categorie di qualità dell'aria (rispettivamente A, B e C), prese come riferimento ai fini di dimensionare adeguatamente gli impianti di ventilazione (tab. 1).

## **Fonti di inquinamento negli edifici**

Le fonti comprendono gli stessi occupanti e le loro attività, ad esempio il fumo di tabacco. Inoltre, i materiali di costruzione e di rivestimento, nonché lo stesso impianto di trattamento dell'aria, possono contribuire sensibilmente all'inquinamento dell'edificio. Alcune fonti sono esterne, contribuendo tramite infiltrazione o immissione con l'aria di ricambio. L'insieme di queste fonti costituisce un carico inquinante totale che grava sull'ambiente: questo carico può essere distinto in una parte analizzabile chimicamente, espressa come emissione dei singoli contaminanti da parte delle fonti, e in una parte sensorialmente percepibile, espressa tramite gli olf. In presenza di un purificatore d'aria, si dovrà tenere conto della frazione di carico inquinante sottratta al totale: non si tratta di un calcolo semplice, ma lo si può approssimare ragionevolmente utilizzando il cosiddetto C.A.D.R. o Clean Air Delivery Rate, un indice di efficacia (secondo il metodo ANSI-AHAM AC-1-1988) che esprime il volume d'aria privo di inquinanti emesso dal purificatore. Tale volume può essere considerato come sostitutivo di un identico volume d'aria esterna pulita di ricambio, quindi da sottrarre al computo del totale di aria esterna necessaria al livello di comfort che si vuole ottenere. Questo ragionamento è valido solo per un computo riferito a classi specifiche di inquinanti, per ognuna delle quali esiste un C.A.D.R. relativo

(particolato, fumo di tabacco, pollini ecc.).

### **Carico inquinante analizzabile chimicamente**

L'apporto di inquinanti di una determinata fonte può essere quantificato in  $\mu\text{g}/\text{s}$  o in  $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  per ogni singola sostanza emessa. La somma delle quantità emesse dall'insieme delle fonti, relativamente a quella singola sostanza, costituisce il carico inquinante specifico totale. Sfortunatamente, le molecole coinvolte possono essere centinaia o migliaia e non sempre sono disponibili dati precisi di riferimento in letteratura. Nella tabella 3 sono riportati ad esempio i carichi inquinanti specifici emessi in ambiente da occupanti fumatori e non fumatori, relativamente a monossido di carbonio ed anidride carbonica.

### **Carico inquinante percepibile**

Il carico inquinante percepibile è causato da quelle fonti che influiscono sul livello di accettabilità sensoriale dell'aria. La tabella 3 indica il valore in olf del carico inquinante percepibile causato dagli occupanti: non fumatori, fumatori, ragazzi e bambini. Per stimare un totale, occorre anche sapere il numero massimo di occupanti per  $\text{m}^2$  del nostro ambiente (tab. 4). Il carico inquinante percepibile indotto dalle strutture si può calcolare con i dati della tabella 2. La somma dei carichi dovuti agli occupanti e all'ambiente rappresenta il carico inquinante percepibile totale.

### **Qualità dell'aria esterna**

La possibilità del ricambio dipende fortemente dalla accettabilità dell'aria esterna: la tabella 5 riporta dei valori caratteristici di qualità percepita dell'aria esterna, nonché le concentrazioni di alcuni degli inquinanti tipici dell'ambiente esterno. Se i valori riscontrati sono superiori a quelli riportati, la qualità dell'aria dovrà essere migliorata con filtri adeguati prima dell'immissione. Anche il posizionamento della presa esterna di raccolta deve essere curato con attenzione per minimizzare la concentrazione degli inquinanti.

### Efficacia della distribuzione dell'aria nell'ambiente

Negli ambienti interni ventilati da un impianto canalizzato, quello che conta è la qualità dell'aria nella zona occupata dalle persone (zona di respirazione). Una cattiva distribuzione dell'aria potrebbe richiedere volumi di ricambio ben superiori per ottenere un risultato accettabile. L'indice di efficacia della ventilazione in ambiente, secondo quanto riportato da Fanger, è dato dalla seguente:

$$\varepsilon_v = \frac{C_e - C_s}{C_i - C_s} \quad (1)$$

dove:

$\varepsilon_v$  = efficacia della ventilazione

$C_e$  = concentrazione inquinante nell'aria in uscita

$C_s$  = concentrazione inquinante nell'aria in ingresso

$C_i$  = concentrazione inquinante nella zona di respirazione

Nel caso di perfetta miscelazione tra aria ed inquinante il valore sarà pari a 1. Se la concentrazione dell'inquinante è minore nella zona di respirazione rispetto all'aria in uscita, si avrà un valore  $> 1$ , il che significa che si potrà avere il livello di qualità desiderato con un flusso di ricambio relativamente contenuto; se al contrario, la concentrazione dell'inquinante è minore nell'aria in uscita rispetto alla zona di respirazione, occorrerà un ricambio maggiore. Altri fattori possono influire pesantemente nel calcolo, come il gradiente di temperatura nel locale, la forma e la disposizione delle bocchette, ecc..

E' proprio su questo particolare calcolo dell'efficacia della ventilazione che si concentrano le critiche più pesanti al metodo di Fanger: senza voler entrare nel merito, si deve riconoscere che questo aspetto merita probabilmente un approfondimento ed una integrazione con metodi di calcolo assai più complessi, al fine di rappresentare efficacemente una realtà così multiforme. Ad ogni modo, nella figura 7 sono riportati i valori di efficacia della ventilazione rilevati sperimentalmente nelle tre tipologie più diffuse

di ventilazione degli ambienti interni. Come si può vedere, i risultati migliori si possono ottenere con la tecnica del dislocamento, a patto di avere una bassissima differenza di temperatura fra aria immessa e zona di respirazione.

### Calcolo dell'apporto di aria esterna

Il flusso d'aria di ricambio deve essere calcolato sia riferendosi alle esigenze del comfort (in base al carico inquinante percepito) che rispetto alla tutela della salute degli occupanti (in base al carico inquinante misurato analiticamente). Il valore più alto dovrà essere adottato dal progetto.

La seguente equazione permette di calcolare il flusso di aria esterna per soddisfare le esigenze di comfort, in base al carico inquinante percepibile:

$$Q_c = 10 \cdot \frac{G_c}{C_{c,i} - C_{c,o}} \cdot \frac{1}{\epsilon_v} \quad (2)$$

dove:

$Q_c$  = portata aria esterna di ricambio (l/s)

$G_c$  = carico inquinante percepibile totale (olf)

$C_{c,i}$  = qualità percepita dell'aria stabilita di progetto (dp)

$C_{c,o}$  = qualità percepita dell'aria di ricambio (dp)

$\epsilon_v$  = efficacia della ventilazione



Il fabbisogno di ricambio in funzione della tutela della salute è calcolato invece dalla seguente:

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,o}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v} \quad (3)$$

dove:

$Q_h$  = portata aria esterna di ricambio (l/s)

$G_h$  = carico totale di un determinato inquinante ( $\mu\text{g/s}$ )

$C_{h,i}$  = massima concentrazione ammessa di inquinante ( $\mu\text{g/l}$ )

$C_{h,o}$  = concentrazione dell'inquinante nell'aria alla bocchetta di immissione ( $\mu\text{g/l}$ )

$\varepsilon_v$  = efficacia della ventilazione

Queste equazioni sono applicabili in condizioni costanti ed ipotizzando una sufficiente qualità dell'aria esterna. Generalmente il calcolo in base al comfort porta a valori di ricambio nettamente superiori. Il vero punto critico è però la scelta arbitraria del tipo di inquinanti per il calcolo in funzione della tutela della salute: solo in pochi casi è individuabile un ben determinato inquinante di riferimento. Non solo, quale aspetto della salute dobbiamo maggiormente tutelare con la nostra scelta di un inquinante rispetto ad un altro (irritazione, allergia, rischio di tumori)? Quale è la suscettibilità dei nostri occupanti rispetto a questi rischi? Indubbiamente questo metodo di calcolo è valido in rapporto alla qualità percepita, e può senz'altro rappresentare un utile sistema per ottenere risultati garantiti dal punto di vista del comfort respiratorio: ma per quanto riguarda la tutela della salute, il margine di arbitrio ed indeterminazione è ancora troppo elevato.

### **Il ruolo dell'anidride carbonica**

Gli esseri umani emettono anidride carbonica con la respirazione, in misura proporzionale al livello del proprio metabolismo. La presenza di anidride carbonica non è avvertibile sensorialmente a bassa concentrazione, ma è un ottimo indicatore della concentrazione complessiva dei bioeffluenti (non può comunque essere indice della qualità dell'aria percepita, ma solo del livello di affollamento). La fig. 6 mostra la correlazione esistente tra la percentuale di insoddisfatti e la concentrazione di CO<sub>2</sub> in ambiente, valida considerando gli occupanti sedentari come unica fonte di inquinamento presente. Assumendo quest'ultima condizione come vera, è possibile individuare il livello di CO<sub>2</sub> corrispondente alle tre categorie di qualità A, B e C (rispettivamente 460 ppm, 660 ppm e 1190 ppm) individuate dal prestandard TC 156. Poiché l'anidride carbonica è rilevabile in modo relativamente semplice per mezzo di appositi sensori (a raggi infrarossi o a semiconduttore), è possibile concepire un impianto automatico di ventilazione dotato di sonde e serrande motorizzate, capace di mantenere l'accettabilità dell'aria entro i limiti della categoria qualitativa prescelta. Su questa tecnica si basano i moderni impianti di condizionamento *on-demand*, che immettono aria esterna di ricambio in misura proporzionale alla concentrazione di CO<sub>2</sub>.

**Descrizione del metodo passo per passo:**

a) Calcolo del flusso di ventilazione richiesto dal livello di comfort desiderato:

1. stima del numero massimo di occupanti (tabella 4) e del carico inquinante percepibile che ne consegue (tabella 3), tenendo conto della percentuale di fumatori, se presenti;
2. stima del carico inquinante percepibile causato dal locale (tabella 2);
3. calcolo del carico inquinante percepibile totale dato dalla somma dei valori trovati ai punti 1. e 2.;
4. selezionare la classe di qualità percepibile dell'aria desiderata A, B o C (tabella 1);
5. stima della qualità percepibile dell'aria esterna utilizzata per il ricambio (tabella 5) e dell'indice di efficacia della ventilazione (equazione 1);
6. calcolare il flusso di ventilazione necessario (equazione 2).

b) Calcolo del flusso di ventilazione richiesto dal punto di vista della tutela della salute:

1. identificare l'inquinante più significativo e stimarne il tasso di emissione in ambiente;
2. trovare la massima concentrazione accettabile in ambiente per l'inquinante prescelto;
3. calcolare il flusso di ventilazione necessario (equazione 3).

c) Scegliere il valore più alto tra i due calcolati ai punti a) 6 e b) 3.

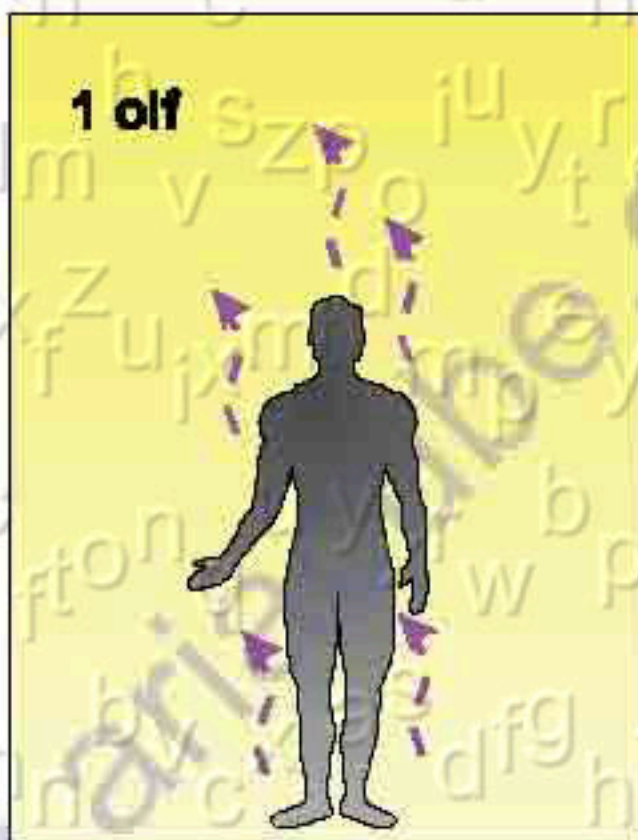
Generalmente il flusso maggiore è quello necessario dal punto di vista del comfort.

### Bibliografia

American National Standard, "Method for measuring performance of portable household electric cord-connected room air cleaners", ANSI-AHAM AC-1-1988, Association of Home Appliances Manufacturers, Chicago, 1988.

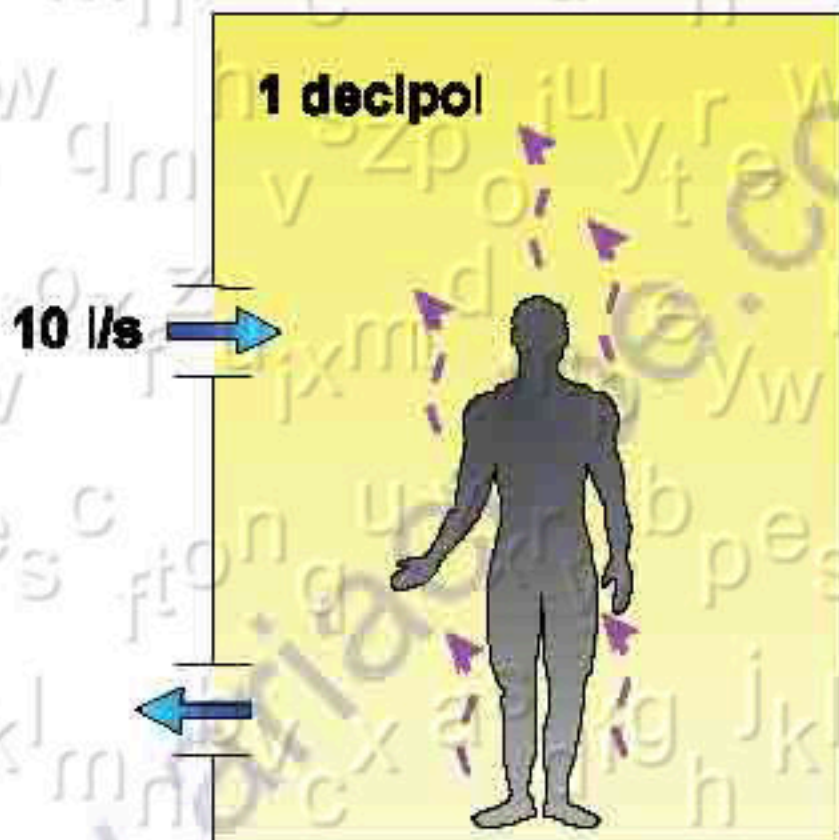
British Standard Institution, "Ventilation for Buildings. Design criteria for indoor environment", CEN/TC 156 / WG 6 Draft Prestandard, London, febbraio 1994.

European Concerted Action "Indoor air quality and its impact on man" Report n.11: "Guidelines for ventilation requirements in buildings", EUR 14449 EN, Office for publications of the european communities, Luxembourg, 1992.

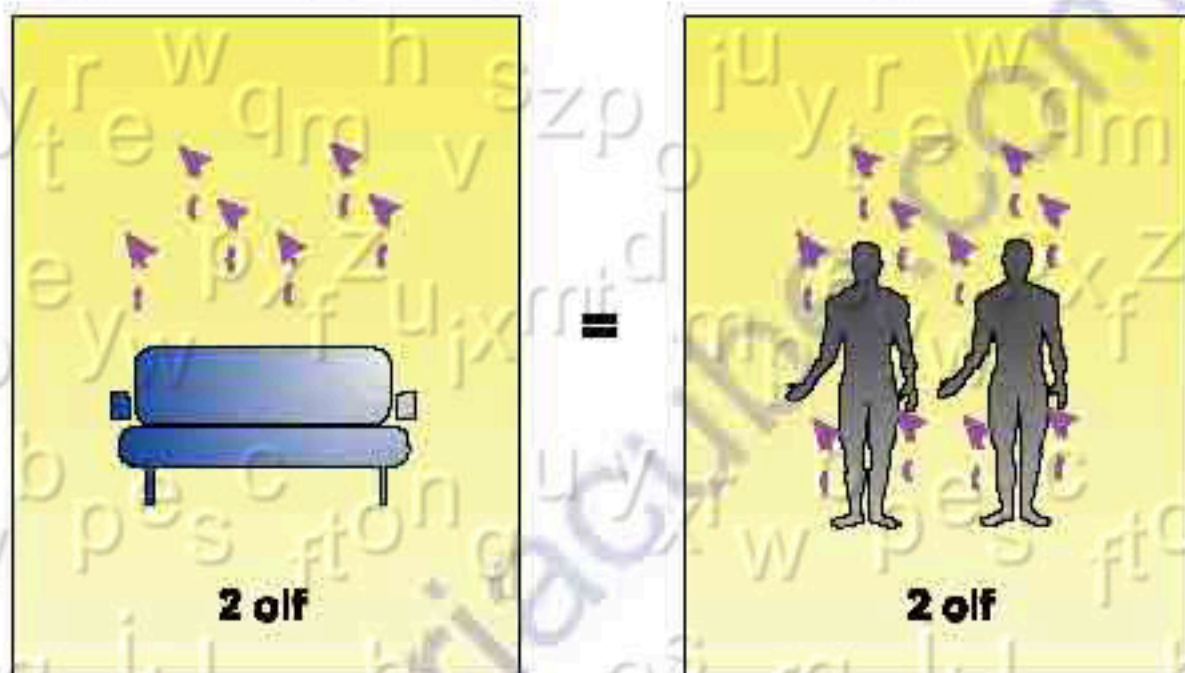


**Figura A**, un olf corrisponde agli inquinanti emanati da una persona standard.

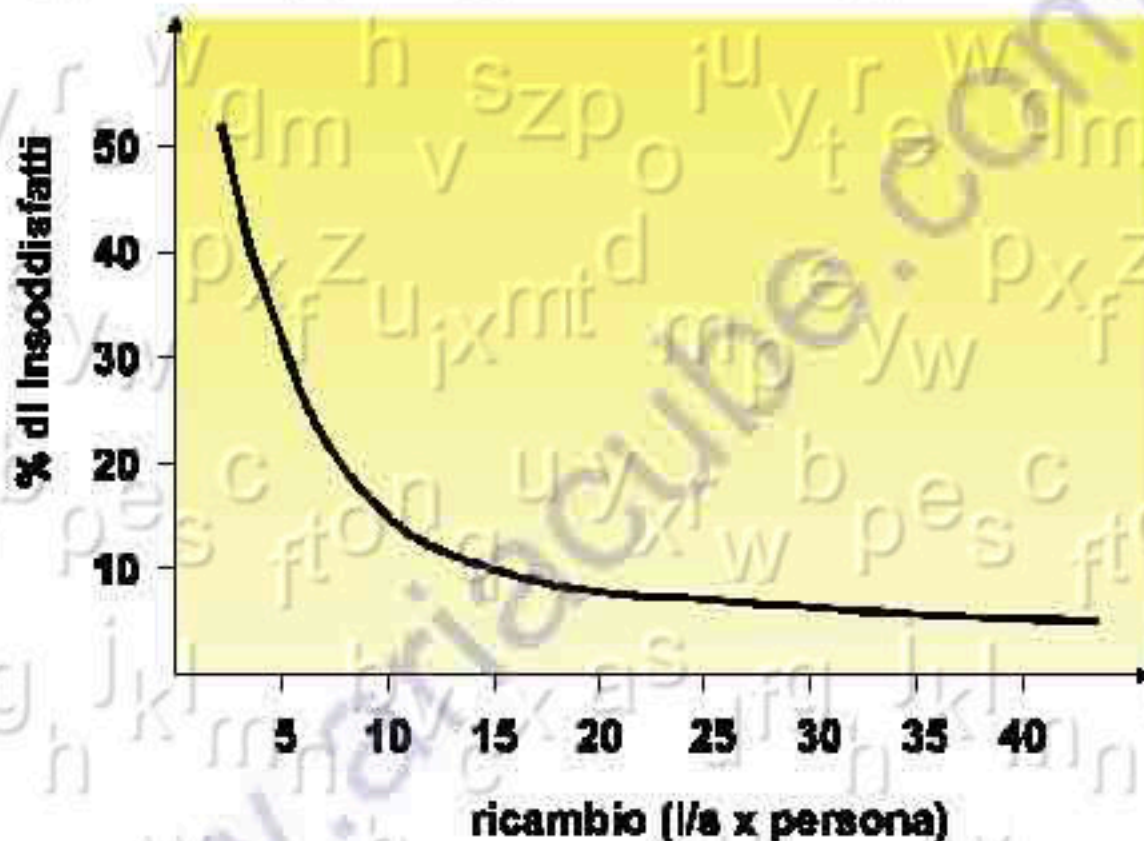
Come persona standard si considera un adulto medio sedentario a riposo, termicamente in una situazione neutra. Gli inquinanti emanati prendono il nome di "bioeffluenti" e sono composti da anidride carbonica e da sostanze organiche volatili. L'olf è riferito ad inquinanti sensorialmente percepibili.



**Figura B**, un decipol corrisponde alla qualità percepita dell'aria in un ambiente in cui è presente un carico inquinante di un olf, con un ricambio pari a 10 l/s di aria esterna.



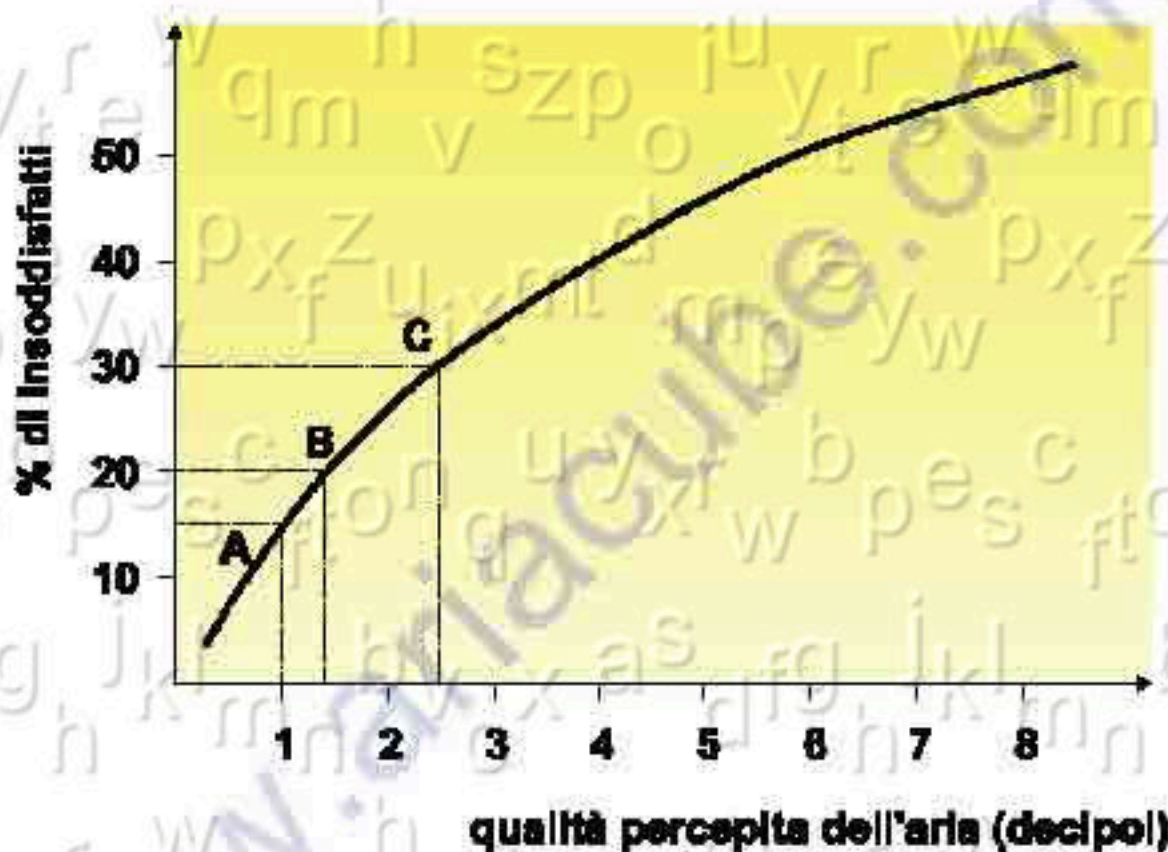
**Figura C**, anche gli inquinanti rilasciati da arredi, suppellettili, rivestimenti e dall'ambiente in generale, possono essere misurati in olf: ad esempio, un divano può contribuire al carico inquinante dell'ambiente per due olf se causa la stessa sensazione di cattiva qualità percepita dell'aria quanto due persone standard.



**Figura D**, questa curva illustra le percentuali di insoddisfatti in un ambiente inquinato da 1 olf al variare del ricambio d'aria da 5 a 40 l/s per persona standard.

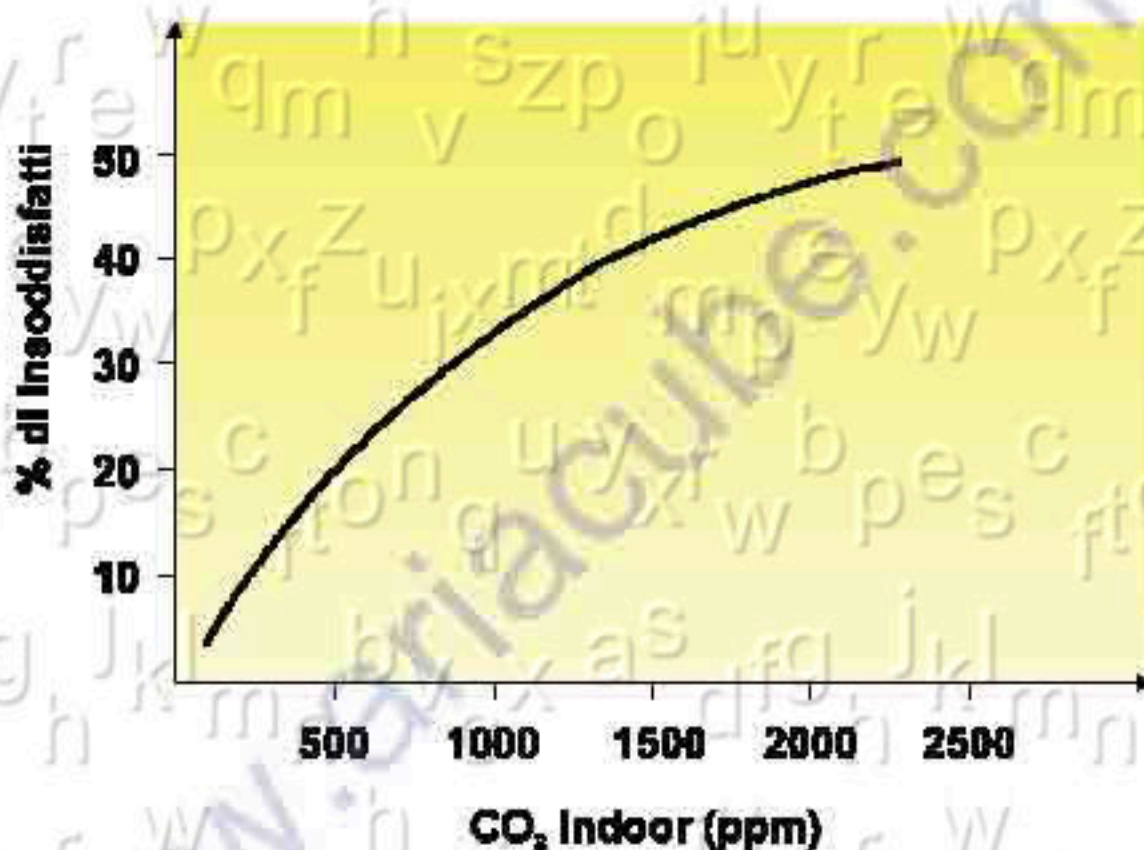
La correlazione proviene dai risultati di una ricerca in cui 168 "annusatori" hanno giudicato l'aria diversamente inquinata dai bioeffluenti di più di un migliaio di uomini e donne sedentarie a riposo.





**Figura E**, la percentuale di insoddisfatti si può tradurre in un livello di qualità percepita espressa in decipol.

Alle tre percentuali del 15%, 20% e 30%, corrispondono le tre categorie di qualità percepita dell'aria A, B e C, usate come riferimento nei dimensionamenti.



**Figura F**, la CO<sub>2</sub> può essere usata come indicatore della concentrazione dei bioeffluenti. Il grafico illustra la correlazione tra la concentrazione di anidride carbonica e la percentuale di insoddisfatti.

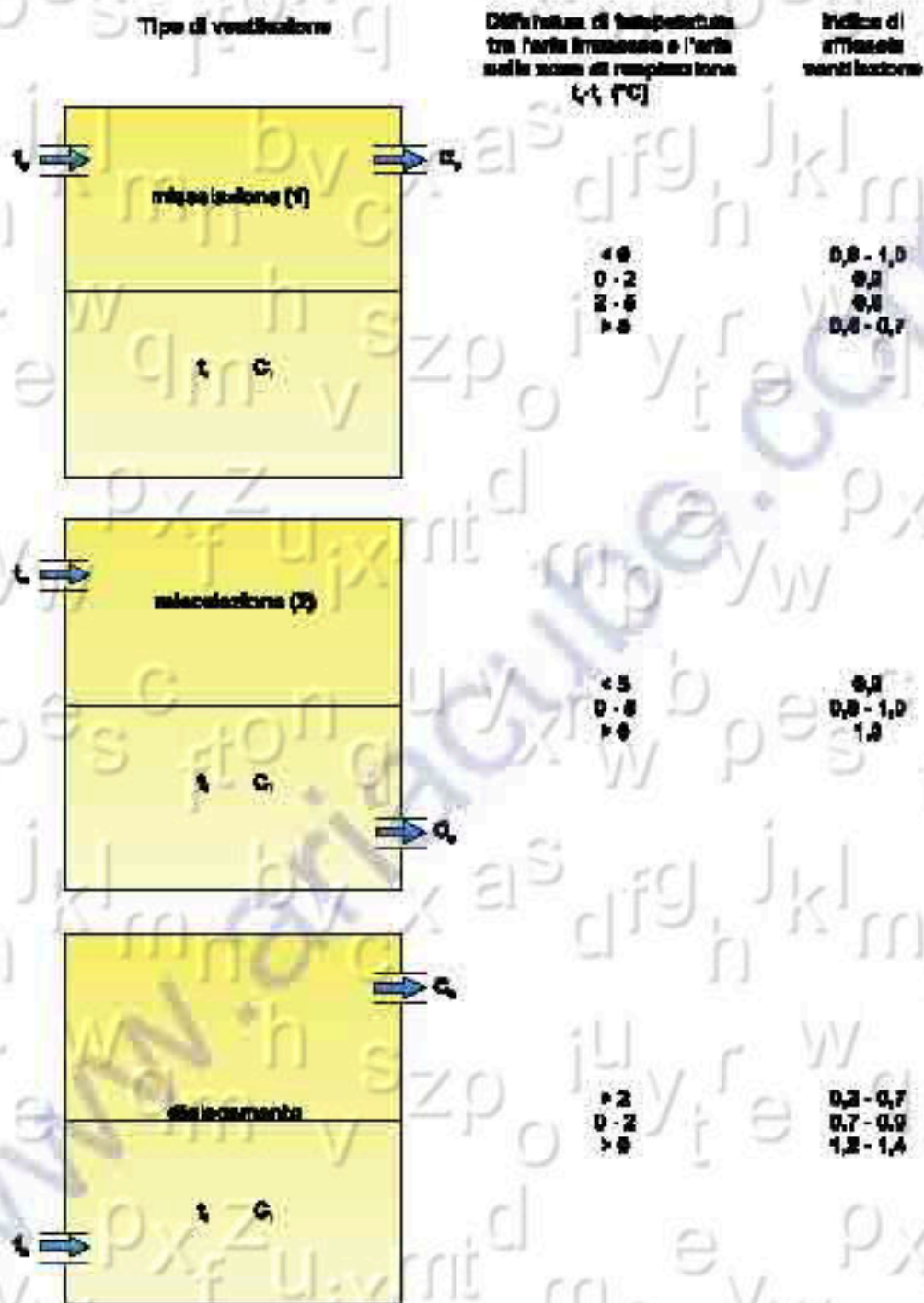


Figura G, Indice di efficienza della ventilazione nelle tre tipologie più comuni.

Categoria di qualità	Qualità percepita dell'aria		Ricambio necessario l/s · ofl
	% di insoddisfatti	decipol	
A	10	0,6	16
B	20	1,4	7
C	30	2,5	4

Tabella A, **categorie di qualità percepita dell'aria (esempio).**

Le percentuali di insoddisfatti sono riferite alla sensazione di "primo impatto" entrando nell'ambiente; l'ammontare del ricambio si intende con aria esterna pulita, presupponendo un indice di efficacia della ventilazione interna pari a 1.

	Sensazione percepita ofl/m <sup>2</sup>	
	media	valori limite
<i>Locali attuali</i>		
uffici	0,3	0,02-0,95
aule scolastiche	0,3	0,12-0,54
asili	0,4	0,20-0,74
sale riunione	0,5	0,13-1,32
<i>Locali ideali</i> (valori auspicabili)		0,05-0,1

Tabella B, carico di inquinanti percepito in ambiente, causato da mobili, tappeti, materiali di rivestimento, impianti di trattamento aria.

Tipologia occupanti	Livello percepito di inquinamento (olf persona)	emissione di anidride carbonica (l/s persona)	emissione di monossido di carbonio da fumo di tabacco (Vh persona)	emissione di vapore acqueo (g/h persona)
<i>Con attività sedentaria (1-1,2 met)</i>				
fumatori 0%	1	19		50
fumatori 20%	2	19	$11 \cdot 10^{-3}$	50
fumatori 40%	3	19	$21 \cdot 10^{-3}$	50
fumatori 100%	6	19	$53 \cdot 10^{-3}$	50
<i>Con esercizio fisico</i>				
basso livello (3 met)	4	50		200
medio livello (6 met)	10	100		430
elevato livello (10 met)	20	170		750
<i>Bambini</i>				
asilo 3-6 anni (2,7 met)	1,2	18		90
scuola 14-16 anni (1-1,2 met)	1,3	19		50

**Tabella C**, carico inquinante prodotto dagli occupanti di un ambiente interno

Un met corrisponde all'attività metabolica di una persona a riposo (1 met = 58 W/m<sup>2</sup> di superficie corporea, approssimativamente 100 W complessivi).

Per i fumatori, vengono considerate 1,2 sigarette/ora, con una emissione di 44 ml di CO per ogni sigaretta.

Tipo di ambiente	Occupanti / m <sup>2</sup>
uffici	0,07
sale riunione	0,5
teatri, auditorium	1,5
aule scolastiche	0,5
asili	0,5
abitazioni	0,05

**Tabella D**, esempi di indici di affollamento per varie tipologie di ambiente

	qualità percepita dell'aria (decipol)	Inquinanti presenti nell'aria			
		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	CO (mg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
ambiente marino	0	680	0-0,2	2	1
ambiente urbano poco inquinato	< 0,1	700	1-2	5-20	5-20
ambiente urbano inquinato	> 0,5	700-800	4-6	50-80	50-100

**Tabella E**, esempi di qualità percepita di aria esterna