

Impianti di ventilazione controllati da sensori

Introduzione

La soluzione impiantistica più diffusa per ottenere elevati livelli di Indoor Air Quality consiste nell'utilizzo di aria esterna incontaminata per diluire gli inquinanti negli spazi chiusi. Lo standard di riferimento universalmente più considerato in questo campo è l'*ASHRAE Standard 62*, basato su una immissione d'aria esterna proporzionale all'affollamento degli ambienti. Prendendo come riferimento i locali ad uso ufficio, nella prima edizione del 1973, il volume d'aria esterna minimo raccomandato per persona è pari a $27 \text{ m}^3/\text{h}$, nel 1981 questo valore scende a solo $9 \text{ m}^3/\text{h}$, viste le pressanti esigenze di contenimento dei consumi energetici. L'applicazione di valori così contenuti ha portato in seguito alla luce il problema degli inquinanti interni, in modo tale da spingere l'ASHRAE, nel 1989, a consigliare $36 \text{ m}^3/\text{h}$ come valore minimo di ricambio. Più recentemente, si è fatto evidente un approccio più completo al problema, che contempla anche la necessità di diluire gli inquinanti prodotti dall'edificio stesso e non solo dagli occupanti. Per ottenere un soddisfacente livello di IAQ non basta dimensionare l'apporto di aria esterna in base al numero degli occupanti, ma occorre quindi tenere conto anche dell'apporto dell'edificio. Nello *Standard 62-1989-R* compare infatti una equazione che permette di calcolare il fabbisogno di aria esterna in base all'indice di affollamento, corretto da un fattore legato all'influenza dell'ambiente. Inoltre, viene introdotto anche il concetto di "pre-ventilazione", ovvero la necessità di ventilare adeguatamente anche i locali occupati in modo intermittente, in modo da diluire anche i soli inquinanti prodotti dall'edificio in assenza di

persone. Naturalmente, il trattamento dell'aria esterna dal punto di vista termo-igrometrico può comportare costi molto elevati: per questo motivo è necessario evitare volumi di ricambio sovrastimati. Uno dei metodi più comuni per soddisfare questa necessità consiste nell'utilizzo degli impianti di ventilazione a controllo automatico. Tale controllo avviene per mezzo di appositi sensori, in modo da adeguare la portata dell'aria all'effettiva necessità del momento. Sensori di inquinanti, sensori di presenza e sensori di CO_2 sono stati usati, da soli od in combinazione tra loro, per rilevare i parametri necessari alla regolazione del ricambio.

I sistemi automatici di ventilazione

La gestione automatica dell'impianto può determinare notevoli risparmi dal punto di vista energetico, anche se numerosi studi hanno messo in luce problemi relativi a difficoltà di calcolo e di progetto, problemi che nascono da una incompleta conoscenza della fisica e del corretto funzionamento dei sensori. Si tratta di una tecnica realmente in uso solo da una decina d'anni, per certi versi ancora immatura e fortemente dibattuta sulla letteratura tecnica internazionale. Il sistema attualmente più impiegato, secondo un metodo originariamente sviluppato in Giappone nella seconda metà degli anni '70, si basa sull'utilizzo di sensori di anidride carbonica. L'immissione di aria esterna viene regolata in modo da mantenere costante, ad un determinato livello prefissato, la concentrazione di CO_2 nell'aria reflua. Questo gas, un bioeffluente per eccellenza, viene usato come indicatore della presenza e del livello di affollamento nell'ambiente occupato. Nella fig.1 è possibile valutare la relazione che esiste tra la concentrazione di anidride carbonica in ambiente e la percentuale di insoddisfatti della qualità dell'aria. In genere, la soglia di intervento della regolazione viene scelta nell'intervallo tra 600 e 1200 ppm, in modo da

ottenere un buon livello di accettabilità senza ricorrere a portate eccessive. In genere l'impianto di ventilazione viene regolato in modo da mantenere un livello minimo costante di ricambio anche in assenza di occupanti; al crescere del numero delle persone presenti e/o della loro attività fisica, una volta raggiunta la soglia prefissata, l'immissione di aria esterna viene aumentata in modo proporzionale all'incremento della CO_2 , allo scopo di non fare salire ulteriormente la concentrazione. Occorre dire che questo metodo è caratterizzato da un macroscopico difetto: l'attivazione iniziale dell'automatismo è il più delle volte eccessivamente ritardata, poiché numerosi fattori concordano nel provocare una notevole isteresi intorno alla soglia di intervento. Innanzi tutto la concentrazione tende a salire molto lentamente ed inoltre il tempo di risposta dei sensori non è dei più rapidi. Ne consegue che il flusso d'aria esterna viene incrementato in ritardo rispetto al crescere della concentrazione di anidride carbonica, con il risultato di avere inizialmente una qualità dell'aria decisamente scadente, con il raggiungimento del punto di equilibrio a volte dopo ore, magari in coincidenza con l'intervallo di pranzo. In tal caso, l'impianto si trova nella perenne condizione di "inseguire" un punto di equilibrio, con le immaginabili conseguenze. In molti casi, questo effetto negativo può essere minimizzato con un posizionamento molto accurato dei sensori e con scrupolose operazioni di taratura. Nella maggior parte dei casi, i sensori vanno posizionati all'altezza del capo degli occupanti. In caso di dubbio, può venire in aiuto l'impiego di un rivelatore portatile di CO_2 per misurare l'andamento della concentrazione in ambiente nell'arco della giornata a quote diverse. Tali apparecchi, una volta complicati e costosi, sono oggi reperibili sul mercato a prezzi accessibili. Per contenere i costi e la complessità dell'impianto, a volte è possibile ricorrere ad un solo sensore, posto all'interno del collettore centrale delle riprese d'aria di più ambienti. A seconda delle scelte progettuali, il segnale dei sensori può essere impiegato per comandare il posizionamento della serranda di miscelazione tra aria di ricircolo ed aria esterna, oppure per regolare la portata di un impianto completamente ad aria primaria. Più

semplicemente, a volte si comanda unicamente l'apertura o la chiusura automatica di lucernari opportunamente disposti, oppure di aeratori da finestra. Per ovviare ai problemi impliciti nell'uso dei sensori di anidride carbonica (latenza iniziale), in tempi recenti si è andato affermando l'utilizzo dei sensori di presenza, in abbinamento od in sostituzione dei precedenti. Per sensore di presenza si intende un dispositivo in grado di segnalare l'ingresso e la permanenza di persone in uno spazio confinato: in genere viene utilizzata una centralina con microprocessore, programmata in modo da calcolare l'immissione di aria esterna in base non solo alla quantità di persone presenti, ma anche al livello di attività fisica riscontrata. L'attività fisica viene calcolata rilevando gli spostamenti delle persone oppure attraverso i sensori di CO₂, perché l'emissione di anidride carbonica, ad un dato livello di affollamento, è proporzionale al lavoro muscolare / metabolico dell'organismo. Una volta apparsi sul mercato dei sensori di presenza economici ed affidabili, i sensori piroelettrici (capaci di convertire il calore emesso dal corpo umano in un segnale elettrico), si è capito di avere a disposizione un mezzo più rapido e preciso dei sensori di CO₂ per determinare il livello di affollamento: questi ultimi hanno invece trovato il loro ruolo congeniale come rivelatori del livello di attività fisica, permettendo così di mettere a punto dei sistemi di ventilazione automatica molto efficienti. Come si può vedere in tab. 1, altri tipi di sensori (biosensori, radar a microonde, sensori di umidità) sono stati impiegati per il controllo degli impianti di ventilazione; tuttavia, nelle applicazioni correnti vengono attualmente utilizzati i sensori piroelettrici ed i sensori di CO₂ ad assorbimento di infrarossi di tipo NIDR e fotoacustici (vedi box esplicativi).

Esempi concreti di applicazione

Esistono nella letteratura tecnica numerosissimi esempi di applicazione del controllo della ventilazione mediante sensori di CO₂ o di presenza: a chi fosse particolarmente interessato ad una analisi particolareggiata di tali Impianti è consigliata la consultazione dei riferimenti riportati in bibliografia. In questa sede è possibile solo effettuare una analisi per grandi linee. In generale si può affermare che il controllo della ventilazione basato sulla rilevazione della anidride carbonica è particolarmente indicato nei grandi spazi caratterizzati da livelli di occupazione molto variabili, come auditori, cinema, grandi magazzini, sale congressi e simili. Nella tab. 2 sono indicati sommariamente i dati di alcune applicazioni campione. In effetti è possibile ottenere consistenti riduzioni nei costi di gestione, pagando lo scotto di una maggiore percezione degli odori. In qualche caso viene utilizzata una doppia soglia di intervento: alla seconda soglia corrisponde un ulteriore aumento della ventilazione. Negli ambienti residenziali la ventilazione controllata in base alla concentrazione di anidride carbonica è poco o per nulla usata, per i seguenti motivi:

- il livello di affollamento è molto meno variabile;
- la concentrazione di CO₂ non sale quasi mai a valori tali da attivare l'impianto; se anche vi arrivasse, lo farebbe con tempi troppo lunghi per una azione efficace. In questa classe di locali si preferisce utilizzare i sensori di presenza piroelettrici: ad esempio, si vanno sempre più diffondendo gli aeratori "attivi" da installare nei piccoli locali residenziali. Tali aeratori, nella loro forma più semplice, sono costituiti da un ventilatore asservito ad un sensore di presenza ed un timer, in grado di assicurare il ricambio di un volume fisso d'aria ad ogni rilevazione di passaggio (basti pensare all'impiego nei bagni). Nella fig. 2 è visibile un esempio schematico di impianto realizzato in una scuola svedese secondo i dettami più moderni: in ogni singola aula il ricambio d'aria è regolato da griglie automatiche di immissione dotate di sensori di presenza. Il ventilatore centrale è regolato da sensori di pressione sulle linee di mandata e di ripresa, attraverso un inverter.

E' da segnalare la recente comparsa sul mercato di numerosi dispositivi automatici per la ventilazione controllata, concepiti per l'installazione domestica. nell'ultima edizione della fiera ISH di Francoforte sono stati presentati estrattori dotati di sensori di presenza (Clivent), centraline di controllo dotate di sensori (Xpelair), bocchette terminali per impianti canalizzati dotate di sensori di CO₂, di umidità o di presenza (Aides).

Conclusioni

Gli impianti di ventilazione controllata da sensori rappresentano per ora una realtà tutto sommato marginale, ma in costante crescita. Concepiuti inizialmente per contenere gli sprechi energetici causati dagli impianti a portata costante negli ambienti ad occupazione fortemente variabile, si vanno ora diffondendo anche come presidio efficace contro i problemi di Indoor air quality nei piccoli ambienti residenziali, attraverso l'impiego di apparecchi tecnicamente sofisticati ma dal costo ragionevole. In ambito ASHRAE è stata particolarmente vivace la discussione nell'aggiornamento dello Standard 62-1989 nella parte relativa alla ventilazione controllata. le novità introdotte riguarderanno l'abbandono della sola concentrazione di CO₂ come variabile di controllo della ventilazione, in quanto dovrà essere tenuto in conto anche l'inquinamento di origine strutturale. Inoltre, si dovrà considerare, nel calcolo delle portate di ricambio, la reale concentrazione di CO₂ nell'aria esterna usata (nell'attuale standard viene assunto un valore fisso pari a 300 ppm). L'impianto allo stato dell'arte, nel futuro prossimo, sarà costituito da una unità centrale di distribuzione di aria di ricambio, la cui portata verrà modulata da un controllo elettronico in base sia alla concentrazione di CO₂ presente nell'aria esterna e nei singoli locali da ventilare, sia al livello di occupazione rilevato con sensori di presenza. L'impianto dovrà comunque assicurare un livello minimo di ventilazione costante, calcolato in base ad un indice proporzionale al livello di inquinanti ambientali provenienti dalle fonti interne ed

esterne all'edificio. Più razionalmente, la quota di ventilazione dovuta a queste fonti potrà essere decisa utilizzando sensori elettronici per indoor air quality.

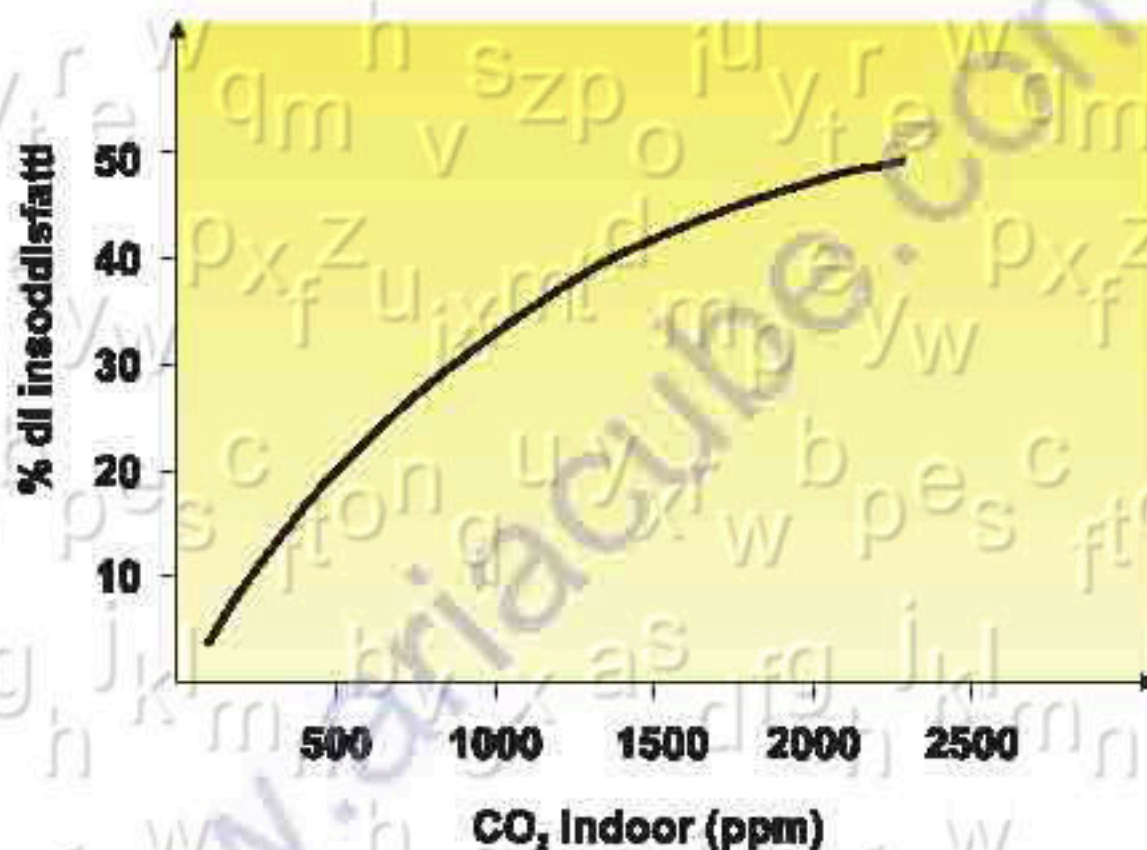


Figura 1

La CO₂ 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.

Sensori di CO ₂	Sensori di SOV	Biosensori	Sensori di presenza	Sensori di umidità
1) sensore ottico infrarosso non-dispersivo (NDIR)	1) sensore a semiconduttore	1) colture batteriche	1) barriere fotoelettriche	1) sensori capacitivi
2) sensore ottico infrarosso fotoacustico	2) sensori elettrochimici	2) membrane cellulari modificate	2) sensori infrarossi piroelettrici	2) sensori a polimeri igroscopici (poliammide)
3) sensore a semiconduttore			3) radar a microonde	

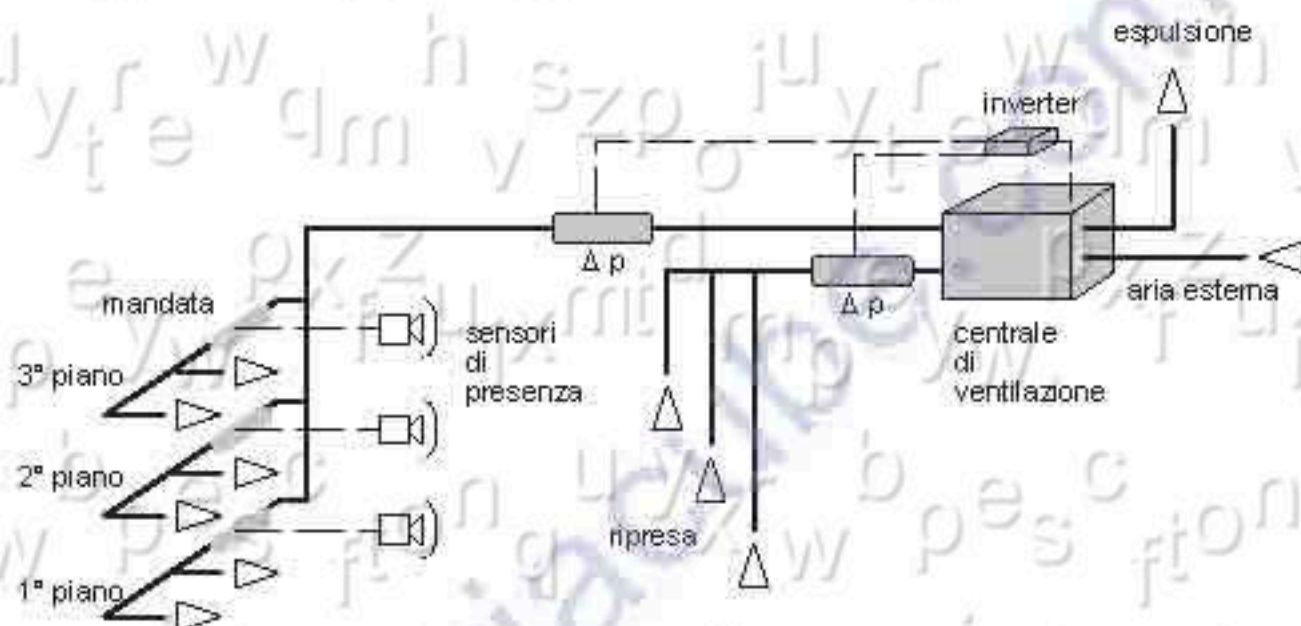
Tabella 1

Tipologia dei sensori attualmente o prossimamente disponibili per l'impiego negli impianti automatici di ventilazione.

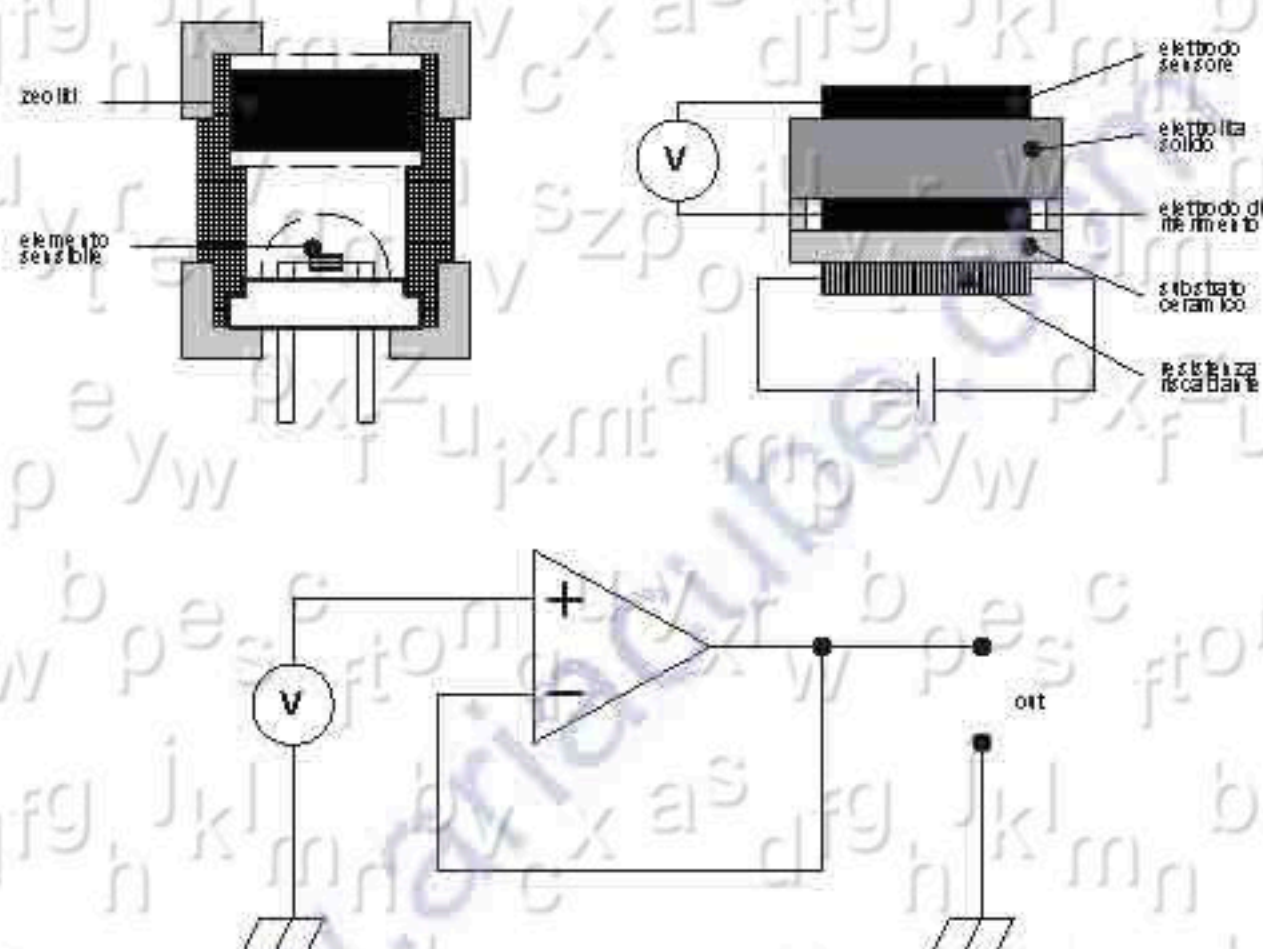
Autori	Tipo di locale	Soglia di controllo CO₂ (ppm)	Risparmio economico (%)	Note
Fehlmann et al. 1993	auditorium	2 soglie: 750 (off a 600) 1300 (off a 1100)	80 (estate) 30 (inverno)	maggiore percezione degli odori rispetto alla ventilazione non controllata
Zamboni et al. 1991	auditorium (Norvegia)	1000	75 (estate) 15 (inverno)	maggiore percezione degli odori in estate
Zamboni et al. 1991	auditorium (Svizzera)	2 soglie: 750 1300	75 (estate) 15 (inverno)	maggiore percezione degli odori in estate
Anon. 1986	cinema	700÷1000	11	

Tabella 2

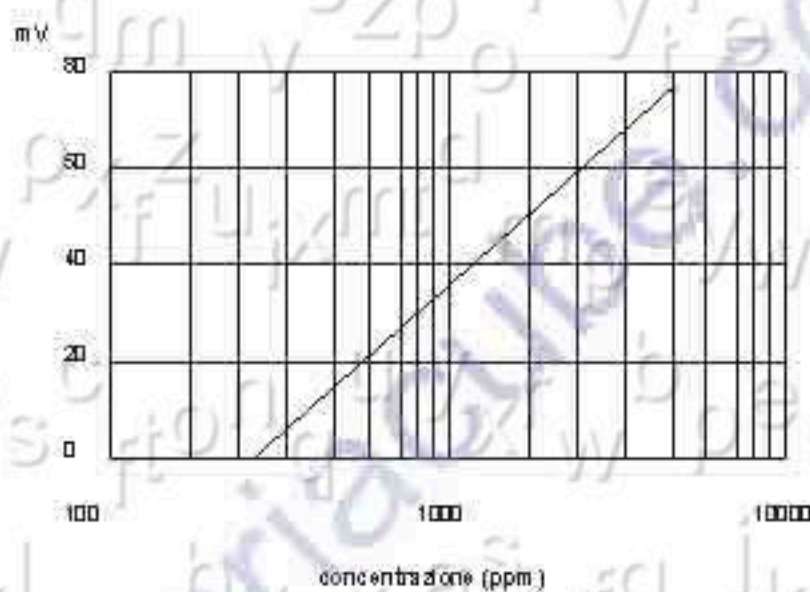
Alcuni esempi di applicazione del controllo della ventilazione mediante sensori di CO₂. Il risparmio energetico indicato è riferito ai medesimi impianti regolati per un tasso di ventilazione secondo lo Standard ASHRAE 62-1989.

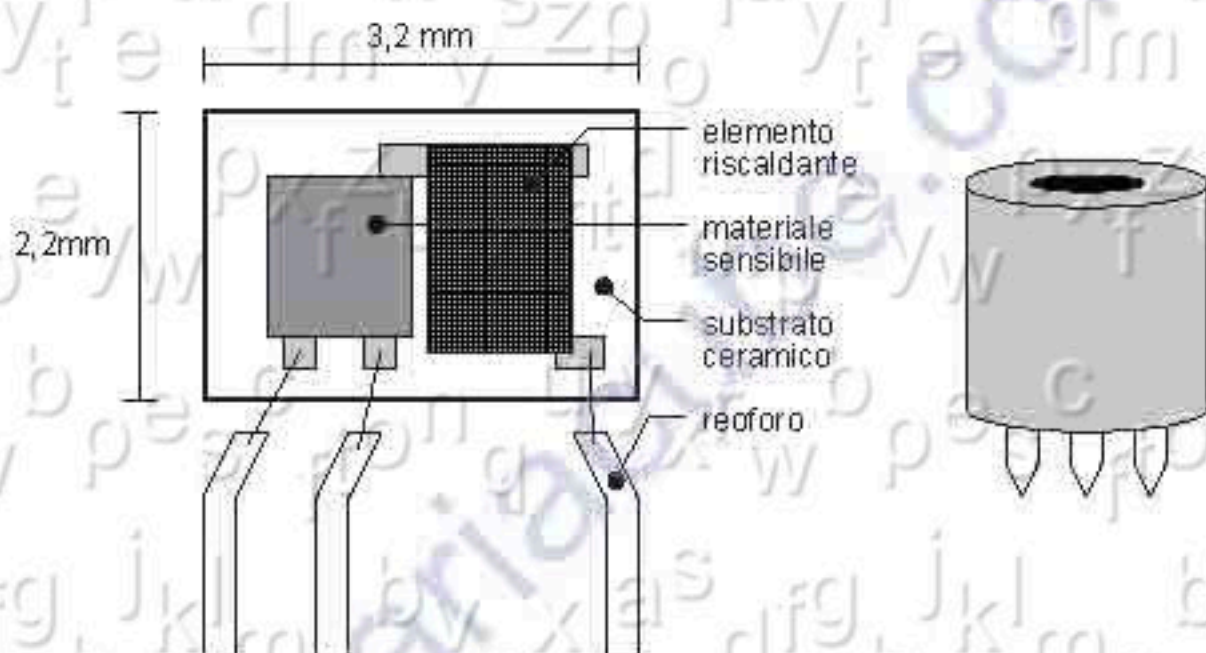
**Figura 2**

Esempio schematico di impianto di ventilazione regolato da sensori di presenza (realizzato in una scuola di Nacka, Svezia). In ogni aula il flusso di base a locale vuoto è pari a 28 l/s, incrementabile fino a 225 l/s (9 l/s per 25 alunni) quando il locale è occupato.

**Figura 3**

Sensore di CO₂ ad elettrolita solido, struttura e circuito di prova.

**Figura 4**Sensibilità sensore CO₂ ad elettrolita solido.

**Figura 5**

Sensore di gas inquinanti a semiconduttore

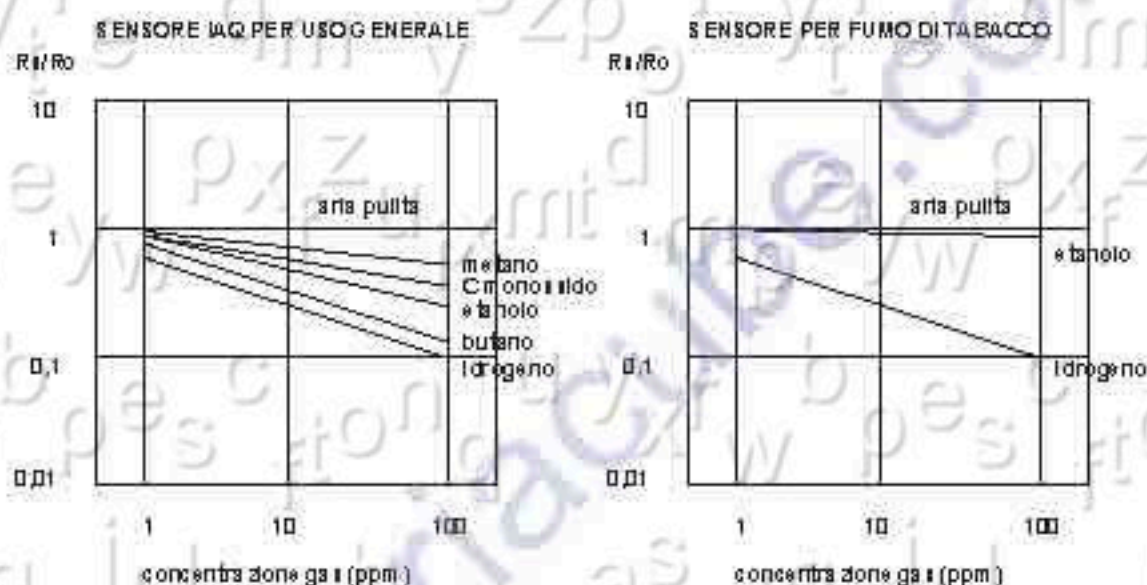
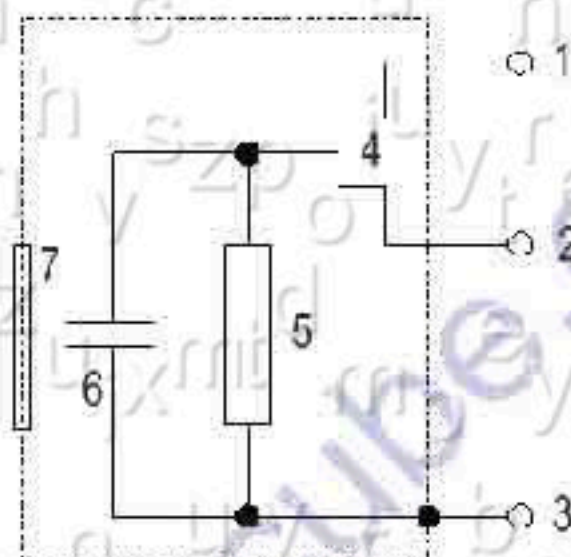


Figura 6

Sensibilità dei sensori a semiconduttore per IAQ (R_s/R_o = rapporto tra resistenza misurata e resistenza in aria pulita)

**Figura 7**

Struttura schematica di un sensore infrarosso piroelettrico:

1- Ingresso alimentazione

2- uscita segnale

3- massa

4- transistor ad effetto di campo (FET)

5- resistore di gate

6- elemento ceramico sensibile

7- filtro ottico

I sensori di gas a semiconduttore:**1- Sensori di CO₂**

I sensori di anidride carbonica a semiconduttore (biossido di Stagno) sono strettamente derivati dai collaudati sensori universalmente impiegati come rivelatori di gas combustibili: questi dispositivi sono caratterizzati da uno spettro di sensibilità molto ampio, che comprende numerose sostanze gassose. Attraverso particolari accorgimenti costruttivi ("drogaggio" con Lantanio e cartuccia di prefiltrazione con gel di silice addizionato di Palladio), è possibile limitare la sensibilità alla sola anidride carbonica. Questo dispositivo, dato il basso costo, sembra destinato ad avere una buona diffusione, una volta disponibile in quantità. La precisione è confrontabile con quella dei sensori NDIR all'infrarosso. Esiste un ulteriore dispositivo che può rappresentare una alternativa confrontabile per prezzo e prestazioni: si tratta del sensore ad elettrolita solido (figg. 3,4), in grado di fornire un segnale in tensione proporzionale alla concentrazione di CO₂ nell'aria. Anche questo tipo di sensore necessita di una cartuccia di prefiltrazione, composta da zeoliti attivate, per eliminare l'interferenza di altri gas.

2- Sensori di sostanze organiche volatili

L'ampia sensibilità del sensore a semiconduttore basato sul biossido di Stagno, a volte effetto indesiderato da limitare, può divenire un vantaggio quando si ha necessità di rilevare la presenza di una miscela di inquinanti generici come quelli che sono abitualmente presenti nei locali confinati (figg. 5,6). Un solo sensore può servire a modulare la ventilazione in base alla presenza di anidride carbonica, fumo di tabacco, monossido di carbonio, solventi, ecc. Questi tipi di sensori sono già usati da tempo nei moderni depuratori d'aria per uso residenziale.

3- Sensori combinati

Nell'ambito della pratica impiantistica dei Paesi più all'avanguardia nel controllo degli impianti di ventilazione, si va ultimamente diffondendo una tipologia di intervento basata sull'impiego contemporaneo di più sensori diversi, i cui segnali vengono interpretati da una centralina dotata di microprocessore. Ad esempio vengono utilizzati sensori di CO₂ e sensori di sostanze organiche volatili, oppure sensori di fumo di tabacco o di particolato. Sulla base di queste esperienze, alcuni grandi costruttori di componentistica stanno per commercializzare delle centraline di controllo avanzatissime, molto compatte, che racchiudono in un solo involucro una particolare combinazione di sensori e l'elettronica necessaria alla gestione degli attuatori presenti nell'impianto di ventilazione. Un modello prevede l'impiego di un sensore di sostanze organiche volatili a semiconduttore e di un sensore di CO₂ di tipo fotoacustico; un secondo modello è equipaggiato invece di un sensore di CO₂ e di un sensore per fumo di tabacco, ambedue del tipo a semiconduttore.

I sensori a luce infrarossa:**1- Sensori di CO₂ di tipo NDIR**

L'anidride carbonica è un gas incolore ed inodore, che provoca effetti tossici sull'organismo quando la sua concentrazione aumenta di circa 25 volte rispetto al valore mediamente riscontrabile in ambiente (≈ 380 ppm). Anche se non è propriamente semplice da misurare, la CO₂ è monitorabile in modo meno indaginoso rispetto alla formaldeide o al monossido di carbonio, la sua concentrazione è quindi spesso usata come indicatore del livello di qualità dell'aria negli ambienti confinati. Elevate concentrazioni di anidride carbonica in ambiente sono indice di ventilazione scadente, che può determinare di conseguenza un incremento degli inquinanti ambientali in generale, favorendo l'insorgere della cosiddetta SBS (Sick Building Syndrome). La concentrazione di anidride carbonica si calcola misurando l'assorbimento della luce infrarossa da parte delle sue molecole (alla lunghezza d'onda di 4,26 μm). Maggiore la concentrazione, maggiore è l'assorbimento di infrarossi: i sensori di CO₂ comprendono una sorgente di luce infrarossa, una camera di irraggiamento, un ricevitore sensibile all'infrarosso, un filtro ottico che permette il passaggio della sola lunghezza d'onda di assorbimento e l'elettronica per amplificare il segnale elettrico rilevato. I sensori che funzionano secondo questo principio sono chiamati NDIR (Non-Dispersive InfraRed). I sensori NDIR a loro volta si distinguono in varie tipologie, che si differenziano per complessità, precisione e stabilità nel tempo: senza voler approfondire troppo l'argomento, basterà dire che il sensore dotato di migliori caratteristiche è quello a doppio raggio e doppio percorso. In pratica si tratta di un doppio sensore, con una cella di lettura vera e propria ed un'altra solo di riferimento, in modo da eliminare per opposizione di fase tutti gli effetti dovuti a grandezze di disturbo come la temperatura, l'umidità e l'invecchiamento dei sensori. Naturalmente si tratta della tipologia più costosa, ma la precisione e l'affidabilità nel tempo sono tali da giustificare ampiamente il costo (i sensori più economici necessitano di fastidiose ricalibrature periodiche).

2- Sensori di presenza piroelettrici

I sensori piroelettrici (fig. 7) sono costituiti da un elemento sensibile alla radiazione infrarossa, molto simile alla parte ricevente contenuta nei sensori NDIR di CO₂: a differenza di questi ultimi però, invece di essere sensibili alla radiazione assorbita dalle molecole di anidride carbonica, sono capaci di reagire alla radiazione emessa dai corpi caldi in movimento. Questa caratteristica li rende ideali come sensori di presenza, ovvero capaci di accorgersi dell'ingresso di persone nell'ambiente e di registrarne i movimenti. Il sensore vero e proprio è formato da una piastrina ceramica particolare posta nel fuoco di una lente di Fresnel a settori (lente ad interferenza ottica, adatta alla luce infrarossa), che ha la funzione di suddividere otticamente l'ambiente in "spicchi": il sensore è in grado di reagire non tanto al valore assoluto del calore, quanto alla differenza di calore tra uno "spicchio" e l'altro. Uno speciale filtro ottico serve a lasciare passare solo gli infrarossi di lunghezza d'onda corrispondente alla temperatura media del corpo umano. I sensori di questo tipo vengono chiamati passivi, o PIR (Passive InfraRed), per distinguerli dai sensori di tipo attivo, che rilevano la riflessione di una radiazione emessa da essi stessi verso l'ambiente (sensori di presenza ad ultrasuoni o a microonde). Anche in questo caso esistono varie tipologie di sensore, per complessità ed efficienza: i migliori sono formati da più elementi sensibili affiancati, la cui risposta viene interpretata da una speciale elettronica in grado di discriminare la direzionalità e l'intensità delle variazioni di calore in modo da evitare false attivazioni dovute a disturbi o a piccoli animali come topi e pipistrelli.

Bibliografia

Anon. 1986. Ventilation control by measurement of carbon dioxide level in public entertainment buildings. Energy Technology Support Unit, AERE Harwell, Oxfordshire, U.K.

ASHRAE. 1996. BSR/ASHRAE Standard 62-1989R, Ventilation for acceptable indoor air quality. Public review draft. ASHRAE Inc., Atlanta.

Fehlmann, J., Wanner, H., Zamboni, M. 1993. Indoor air quality and energy consumption with demand controlled ventilation in an auditorium. Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 5: 45-50.

Haines, R.H. 1994. Sistemi di regolazione per impianti di riscaldamento, ventilazione e condizionamento d'aria. Tecniche Nuove, Milano.

Hanada, M., Koda, H., 1995. Development of CO₂ sensor using La doped tin-dioxide semiconductor gas sensor. Fis Inc., Osaka.

Ke, Y.-P., Mumma, S.A., 1997. Using Carbon Dioxide Measurements to Determine Occupancy for Ventilation Controls. Symposium BN-97-01, 1997 ASHRAE Technical Program, Boston.

Zamboni, M., Berchtold, O., Filleux, C., Fehlmann, J., Drangsholt, F. 1991. Demand controlled ventilation -An application to auditoria. Proceedings of the 12th AIVC Conference Air Movement & Ventilation Control within Buildings, pp. 143-155. Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, U.K.

Siti di consultazione su Internet

Sensori piroelettrici:

http://www.infosakyu.or.jp/nicera/html_e/sein.htm

<http://www.nicera.co.jp/sd/item/mdl/pyro/index.htm>

<http://www.smarthome.com/secoccupant.html>

<http://www.scitec-inst.demon.co.uk/pyroelectricterms.htm>

<http://www.scitec-inst.demon.co.uk/pyroelectricbrief.htm>

Sensori di presenza

<http://www.measure.com/sensors/sensor-roomocc.html>

<http://www.chalmor.co.uk/cirs.htm>

Sensori di gas negli ambienti confinati:

<http://www.measure.com/sensors/sensor-gasconc.html>

http://www.sensormag.com/feb_sbd.htm

Ventilazione controllata nelle scuole:

<http://www.aivc.org/schlibib.html>

Dispositivi di ventilazione "attivi" e di controllo:

<http://www.hycalnet.com/hvac/aqtech.htm>

<http://www.aivc.org/newprod.html>

<http://www.oikos.com/aldes/grilles.html>