

# Integrazione dei sistemi di ventilazione ibrida negli edifici

MARCO SURRA\* - MARCO SIMONETTI\*\*

\* - *Libero professionista, Rivoli TO*

\*\* - *Libero professionista, Rivoli TO*

## SOMMARIO

Il lavoro si propone di esplorare alcune delle problematiche in cui si articola il percorso di integrazione dei sistemi per la ventilazione ibrida nell'involucro edilizio. Sono illustrati i fondamenti teorici dei principali metodi di ventilazione naturale, commentandone le potenzialità di utilizzo nel contesto italiano.

Una seconda parte descrive una proposta di sistema integrato di condizionamento dotato di ventilazione ibrida. Il sistema ha 3 possibili modalità di funzionamento, adatte a differenti condizioni climatiche dell'anno. Lo sfruttamento dell'effetto camino, del riscaldamento solare (i cosiddetti "camini solari"), del vento e di sistemi meccanici alimentati da un impianto di produzione elettrica a pannelli fotovoltaici influenza la progettazione architettonica in misura complessa. Vengono illustrati casi di differenti adattamenti dello stesso sistema e dell'involucro edilizio per un medesimo tema progettuale. Ne emergono, attraverso lo sviluppo di massima del dimensionamento dei sistemi e della valutazione economica, i differenti modi e gradi con cui il progetto impiantistico si inserisce nella progettazione integrale dell'edificio in funzione della priorità assegnata al disegno energetico.

## 1. INTRODUZIONE

Da quando negli anni '70 la crisi energetica mondiale focalizzò l'attenzione dei responsabili economici e politici nei riguardi delle problematiche connesse al contenimento dei consumi energetici in campo edilizio, l'esplorazione di fonti energetiche rinnovabili nella loro possibile valenza di risorse alternative, principalmente ai fini del riscaldamento, ha determinato la ricerca e lo sviluppo di tecnologie impiantistiche innovative (impianti solari, pompe di calore, microgenerazione, ecc.). All'emergere di soluzioni promettenti non è però corrisposta una diffusione commerciale, per i costi di installazione troppo elevati a fronte dei tempi di ammortamento dell'investimento o ancora per la assoluta mancanza di incentivi sotto l'aspetto legislativo.

Pertanto la riduzione dei consumi fu perseguita quasi esclusivamente con un

approccio di tipo passivo, aumentando la resistenza termica dell'involucro, agendo sulle caratteristiche di conducibilità dei materiali costituenti le strutture e i tamponamenti.

La strategia raggiunse lo scopo prefissato e contribuì ad aumentare la coscienza individuale verso il problema dei consumi, portando in alcuni casi alla scelta di isolanti con prestazioni e spessori ancora più elevati rispetto a quelli richiesti dalla legislazione tecnica.

La contemporanea riduzione della effettiva ventilazione degli ambienti (tendenza peraltro confermata dagli standard americani sui tassi di ricambio d'aria) in conseguenza della migliore tenuta dei serramenti ha determinato in molti casi problemi di formazione di condensa sui ponti termici, nonché in alcuni casi una scarsa qualità dell'aria interna, con conseguenti forme patologiche per gli utenti, individuate come "sick building syndrome".

In questo contesto l'approccio alla progettazione dell'edificio continuava a mantenere rigorosamente separati gli aspetti architettonici da quelli impiantistici, intervenendo il progettista termotecnico su un edificio meno disperdente, ma non energeticamente migliore.

Specialmente dal punto di vista della climatizzazione estiva le cose molto spesso erano peggiorate dal fatto che, a fronte di una ridotta inerzia delle strutture, o della colorazione scura dell'involucro, venivano inserite grandi superfici vetrate (tipica la soluzione delle finestre a nastro per le palazzine uffici) senza alcuna schermatura o con vetrate scarsamente riflettenti, determinando rientrate tali da richiedere elevate potenze frigorifere installate e sistemi impiantistici più complessi e costosi, per far fronte a situazioni limite di contemporaneo riscaldamento e raffrescamento su opposti orientamenti (Est-Ovest).

Solo recentemente, l'esigenza di contenere i consumi energetici e di migliorare il benessere interno agli ambienti, recepita e stimolata da un notevole corpus normativo, ha rivolto l'attenzione dei progettisti a una maggior considerazione del sistema edificio-impianto.

La mutata sensibilità nei confronti delle esigenze di controllo della qualità dell'aria interna ha portato alla determinazione legislativa di tassi di ventilazione considerevolmente più alti rispetto ai primi standard elaborati in risposta alla crisi energetica, unitamente alla definizione dei livelli di filtrazione dell'aria trattata meccanicamente. In tale prospettiva assume importanza non solo l'isolamento termico, la tenuta all'aria dei serramenti e il recupero di calore, ma altresì l'uso di tecnologie sostenibili quali ventilazione naturale, apporti solari e illuminazione naturale.

Le tecnologie, sviluppate o in fase di sviluppo, che formano il nucleo di quella che viene comunemente definita come scelta impiantistica "bioclimatica" sono caratterizzate da una elevata correlazione con l'ambiente esterno all'edificio, intendendo come tale la qualità degli impianti stessi di incrementare la dipendenza funzionale dell'edificio dal contesto ambientale di costruzione.

Sull'onda di questi sviluppi si afferma la necessità di sviluppare un modello di integrazione tra gli iter di definizione del progetto architettonico e impiantistico in cui, pur conservando le aree di propria responsabilità, si crea un terreno di interazione intensa tra l'architetto e il consulente termotecnico già in fase preliminare, sul quale confrontare

e sviluppare le esigenze di linguaggio architettonico, di funzionalità spaziale e di prestazioni dell'edificio nell'area fisico-tecnica.

## 2. VENTILAZIONE NATURALE E IBRIDA

Nel passato i sistemi di ventilazione, utilizzati unicamente per il controllo della IAQ (qualità aria ambiente) erano classificabili principalmente in due categorie: sistemi di ventilazione meccanici a portata costante e sistemi di ventilazione naturale a controllo manuale.

A partire dagli anni '80 si possono osservare interessanti sviluppi per entrambe le categorie.

Per quanto concerne la ventilazione meccanica si sono sviluppati sistemi a portata variabile (VAV) e in particolare sistemi di ventilazione controllata a richiesta (DCV). La diffusione di questi sistemi negli impianti di climatizzazione per la gestione delle portate di aria di rinnovo è stata resa possibile dalla disponibilità di sistemi elettronici di modulazione della velocità di rotazione della girante del ventilatore (regolazione mediante inverter).

Parallelamente si sono diffusi sistemi di recupero termico (prescritti dalla legislazione nel caso in cui siano richieste elevate portate di aria di rinnovo) o di preriscaldamento mediante sistemi naturali dell'aria di ricambio.

Si osserva quindi l'abbandono della netta contrapposizione tra ventilazione naturale e meccanica a favore della tendenza a unire il meglio di entrambe le tecnologie: ventilazione naturale se praticabile e conveniente, ventilazione meccanica nella misura effettivamente richiesta e con un efficace sistema di recupero termico.

I campi in cui le tecnologie sostenibili possono essere utilizzate dipendono dal clima esterno e dalle caratteristiche, ubicazione e utilizzo dell'edificio. La ventilazione naturale può essere considerata una tecnologia sostenibile, energeticamente efficiente e pulita e in grado di soddisfare ai requisiti interni fino a quando si mantengono le condizioni ottimali di funzionamento. I metodi di ventilazione naturale tradizionali offrono tuttavia un controllo molto limitato del flusso d'aria. Questi metodi sono stati negli ultimi anni oggetto di applicazione dei nuovi criteri di calcolo e controllo automatizzato, rendendone possibile una migliore comprensione e utilizzo.

In alcuni casi si rendono quindi necessari impianti meccanici supplementari. La ventilazione ibrida offre una via per combinare i migliori aspetti della ventilazione naturale e meccanica in maniera appropriata ai vari periodi del giorno e alle varie stagioni dell'anno. Infatti una combinazione di tecnologie può nella maggior parte dei casi rivelarsi ottimale in relazione alle condizioni climatiche esterne caratteristiche del bacino geografico del sito in esame.

Secondo una definizione introdotta recentemente (Heiselberg, 1998) i sistemi di ventilazione ibrida possono essere descritti come sistemi che generano delle condizioni ambientali di comfort utilizzando diverse caratteristiche di entrambi i sistemi naturali e meccanici nel corso della giornata o delle stagioni dell'anno. Essi rappresentano sistemi di ventilazione dove la movimentazione naturale e meccanica dell'aria sono combinate in un sistema integrato. La principale differenza tra i sistemi di ventilazione conven-

zionali e quelli ibridi sta nel fatto che questi ultimi sono sistemi intelligenti con dispositivi di controllo in grado di commutare automaticamente il funzionamento da naturale a meccanico al fine di minimizzare i consumi di energia e mantenere un soddisfacente comfort ambientale.

Vedremo come i concetti di ventilazione ibrida siano applicabili principalmente alla sola estrazione dell'aria ambiente. Infatti nei casi in cui sono richiesti dei tassi minimi prefissati di ventilazione (Norma UNI 10339), e nei sistemi di climatizzazione a tutt'aria o misti con aria primaria, in cui è necessario il trattamento dell'aria di rinnovo (per la filtrazione dell'aria e la correzione del contenuto igrometrico della stessa), per l'immissione dell'aria sono applicabili solamente dei sistemi meccanici, di preferenza a portata variabile in relazione ai carichi termici da asportare con prelievo di aria esterna preferibilmente pretrattata da un sistema di recupero termico o prelevata da uno spazio con minore escursione termica.

L'estrazione può invece avvenire con dei sistemi ibridi, se sono convenientemente realizzabili dei volumi architettonici con funzione di camini. Su tali sistemi è preferibile inserire dei recuperatori termici (qualora le pressioni statiche utili siano sufficienti per il loro attraversamento).

Questo concetto sarà meglio specificato nell'esempio riportato al termine del presente articolo.

### **3. DESCRIZIONE DEI SISTEMI NATURALI E INTEGRAZIONE NEGLI EDIFICI**

#### **3.1. Sistemi di estrazione per effetto camino**

Per camino estrattore si intende qui l'effetto di estrazione legato unicamente al gradiente termico naturale all'interno del condotto. I sistemi che sfruttano questo principio incrementano l'effetto naturale legato alla differenza di altezza tra apertura di immissione e apertura di espulsione.

I sistemi di estrazione per effetto camino generano un flusso di massa (e di calore associato) sfruttando il campo gravitazionale: una quantità di fluido immersa in un fluido a densità maggiore, all'interno del campo gravitazionale, tende a fluire in direzione opposta al vettore accelerazione di gravità (nel caso degli edifici, come è ben noto, la differenza di densità è legata alla differenza di temperatura dell'aria interna rispetto a quella esterna).

#### Configurazione dell'edificio ad atrio interno

La stratificazione termica che attiva la ventilazione viene fatta sviluppare all'interno di un atrio, uno spazio cioè che impegna una porzione di altezza corrispondente a più piani.

Probabilmente non è scorretto pensare che i maggiori vantaggi di una tale configurazione risiedano nelle potenzialità dello spazio interno architettonico. Sotto l'aspetto termodinamico è infatti un elemento piuttosto critico, proprio per via della stessa stratificazione termica che vi si ricerca. Esperienze europee mostrano situazioni di discomfort per gli utenti dei piani alti con affaccio sull'atrio.

Altra considerazione, anche se non legata ad aspetti energetici termici, riguarda la cautela con cui vanno trattati simili ambienti da un punto di vista della qualità acustica.

### Camino passivo

Consiste in un elemento dalle caratteristiche costruttive varie, sviluppato in altezza, il cui scopo è incrementare il ricambio d'aria naturale legato agli effetti di cui si è detto, attraverso la differenza di quota tra la luce di ingresso dell'aria esterna di ricambio e la luce di uscita, sfruttando il gradiente idrostatico verticale all'interno della struttura.

#### *Vantaggi*

- E' un sistema a costo di esercizio nullo, eccetto il costo del sistema di controllo elettronico (raccomandabile) su serranda di intercettazione ed eventuale ventilatore di estrazione integrativo.

#### *Svantaggi*

- Le portate di ricambio realizzabili sono adeguate solo nel caso di differenza di temperatura esterna – interna significativa (almeno 2 – 3 °C). Nei mesi estivi, se non è previsto condizionamento dell'aria, le condizioni del microclima interno risultano all'estremo della zona di accettabilità, ma possono essere migliorate introducendo un sistema di controllo dell'umidità dell'aria in entrata. Nel caso di condizionamento dell'aria (con trattamento dell'aria in ingresso per il controllo di temperatura e umidità), il sistema oltre una certa temperatura esterna non è più in grado di fornire il ricambio igienico richiesto dalla normativa e si può raggiungere un valore limite per il quale il flusso si inverte.
- Risulta altresì delicata l'integrazione con sistemi di recupero del calore. L'applicazione del recuperatore richiede una fornitura supplementare di pressione statica utile rispetto a un flusso libero.

## **3.2. Sistemi di estrazione elio-assistiti**

L'effetto camino è dipendente dalla differenza di temperatura tra l'aria esterna e quella interna. Per ottenere un ricambio d'aria naturale efficace anche quando la temperatura esterna non è significativamente minore di quella interna si possono utilizzare camini-collettori che sfruttano l'apporto eliotermico per incrementare il tiraggio.

Il concetto guida di questi sistemi è lo sfruttamento della radiazione solare per incrementare il tiraggio, attraverso il riscaldamento dell'aria all'interno del condotto di estrazione.

#### *Vantaggi*

- Permettono di incrementare la portata in condizioni di scarsa differenza di temperatura interna – esterna, al limite anche in caso di uguaglianza delle due temperature.
- Rappresentano sistemi “gratuiti”, senza alcun costo di esercizio.

#### *Svantaggi*

- Dipendono in misura diretta dall'andamento dell'irradianza solare.

Il principio è applicabile a molte configurazioni, tra cui si propone:

#### Parete solare

In questa sede, si intende con questo termine un tipo di camino solare a sezione rettangolare in cui una delle due dimensioni è molto maggiore dell'altra (una configurazione simile a un pannello doppio con camera interna). La superficie esposta al sole è realizzata in materiale scuro, o in alternativa trasparente, lasciando la funzione di raccolta della radiazione e riscaldamento alla parete retrostante.

Valgono le considerazioni fatte al paragrafo precedente sui vantaggi e svantaggi generali della soluzione aggiunti ai seguenti commenti specifici:

#### *Vantaggi*

- Permette uno sfruttamento migliore dell'energia solare, data l'ampia superficie di scambio.
- E' facilmente integrabile nella composizione delle facciate tradizionali (può essere "annegato" nella struttura).
- Durante l'inverno, se previsto in fase di progettazione, può essere utilizzato come sistema di integrazione dell'apporto termico di riscaldamento.
- Può essere integrato da una copertura in pannelli fotovoltaici.

#### *Svantaggi*

- Risulta molto dipendente dalla variazione dell'angolo azimutale durante il giorno.
- Impone la penetrazione di energia in forma di radiazione diretta sulla parete a cui è applicato.

## **4. FONDAMENTI TEORICI DEI METODI DI VENTILAZIONE NATURALE**

Vengono richiamati nel seguito i fondamenti teorici alla base dei sistemi di ventilazione naturale che si basano sull'effetto camino.

### **4.1. Effetto camino**

La differenza di temperatura tra esterno e interno in un ambiente determina un differenziale di densità dell'aria, e un conseguente differenziale di pressione, che genera un movimento verticale dell'aria stessa. Tale fenomeno è indicato come effetto camino quando la temperatura interna è maggiore di quella esterna, ma il flusso può verificarsi anche in senso opposto.

Immaginiamo una grande capacità termica contenente fluido a temperatura  $t_e$  e a pressione  $p_1$  uguale alla pressione atmosferica. Essa comunichi direttamente con un condotto ad asse rettilineo e verticale di sezione costante liberamente aperto all'atmosfera.

L'esperienza insegna che il condotto diventa sede di una corrente ascendente del fluido caldo.

Ipotizzando inoltre che:

- il flusso ascendente sia in condizioni di regime permanente;
- la temperatura del fluido rimanga costante (si trascurano le dispersioni termiche attraverso le pareti);

- le variazioni di volume specifico siano trascurabili (esse non possono essere nulle perché la pressione nella sezione di sbocco  $p_2$  è minore della pressione nell'ambiente A, tuttavia data l'altezza non rilevante del condotto la differenza  $p_2 - p_1$  è piccola rispetto a  $p_1$  e quindi è trascurabile il suo effetto sul volume specifico);
- la velocità del fluido sia costante nel condotto (conseguenza delle due ipotesi precedenti) salvo le perturbazioni sulla sezione di ingresso;
- la temperatura esterna  $t_e$  sia costante al pari del suo volume specifico  $v_e$ .

L'equazione generale del moto dei fluidi (equazione di Bernoulli generalizzata per deflusso stazionario, monodimensionale, senza lavoro utile, per unità di massa):

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + v_1(p_2 - p_1) = L_{1,2} - R_{1,2}$$

essendo

$c_1$  = velocità iniziale [m/s] = 0

$c_2$  = velocità allo sbocco [m/s]

$p_2 - p_1 = -g \rho_e (z_2 - z_1)$

$L_{1,2}$  = lavoro forze esterne agenti =  $-g (z_2 - z_1) = -g H$

$R_{1,2}$  = lavoro delle forze resistenti (distribuite e concentrate) =  
 $= \lambda l/d c_2^2/2 + \beta c_2^2/2 = \lambda' c_2^2/2$

$z_2 - z_1 = H$  = altezza del condotto [m]

diventa con le ipotesi fatte

Definendo  $K = (1 + \lambda')^{-0,5}$  e considerando trascurabili le influenze di pressione su

$$c_2 = \sqrt{\frac{2gH}{(1 + \lambda')} \frac{(\rho_e - \rho_i)}{\rho_i}}$$

$v_1$  e  $v_2$  si ha (trasformazione a pressione costante per un gas perfetto):  $v_i/v_e = T_i/T_e = \rho_e/\rho_i$  da cui:

$$c_2 = K [ 2 g H (T_i - T_e)/ T_e ]^{0,5}$$

e chiamando  $\Omega$  la sezione libera di condotto [m<sup>2</sup>] si ottiene la portata di aria  $Q$  [m<sup>3</sup>/s]:

$$Q = K \Omega [ 2 g H (T_i - T_e)/ T_e ]^{0,5} \quad (1)$$

dove  $K$  (coefficiente di resistenza)  $\cong 0,40 + 0,0045 |T_i - T_e|$ .

La (1) fornisce la portata d'aria in un condotto verticale in funzione delle temperature dell'aria e delle caratteristiche geometriche del condotto.

Per una situazione progettuale architettonica in cui sia nota la geometria del condotto (altezza e sezione) la (1) consente di calcolare in funzione delle temperature interna e esterna la massima portata che può essere estratta per ventilazione naturale.

Tale valore dovrà essere confrontato con i valori minimi di aria di rinnovo richiesti dalle normative igienico sanitarie (UNI 10339) al fine di valutare se la ventilazione naturale (NV) sia sufficiente o necessiti di essere integrata da un sistema meccanico (ventilazione ibrida HV).

La verifica può essere condotta in condizioni invernali ed estive con le temperature di progetto per la località considerata.

Esempio:

Aula universitaria da 250 posti con camino di ventilazione naturale di sezione 1 m<sup>2</sup> alto 15 m.

Situazione invernale:  $t_i = 20 \text{ °C}$  ;  $t_e = - 5 \text{ °C}$

→ Portata aria 2,56 m<sup>3</sup>/s =9200 m<sup>3</sup>/h

Situazione estiva (no condizionamento):  $t_i = 32 \text{ °C}$  ;  $t_e = 30 \text{ °C}$

→ Portata aria 0,57 m<sup>3</sup>/s =2050 m<sup>3</sup>/h

Confrontando con il valore richiesto dalla UNI 10339 (prospetto III) pari a 25,2 m<sup>3</sup>/h persona, necessita una portata di rinnovo totale di 6300 m<sup>3</sup>/h. Pertanto la ventilazione naturale (NV) dovrà essere integrata con un sistema meccanico (MV) per far fronte alla situazione estiva. Conoscendo l'andamento delle temperature medie stagionali sarà possibile diagrammare le portate nell'arco dell'anno individuando la durata del periodo in cui il sistema dovrà essere integrato.

La soluzione considerata è volutamente schematica in quanto l'immissione dell'aria esterna (primaria) in condizioni invernali dovrà generalmente (a meno di carichi ambiente elevatissimi) avvenire in condizioni neutre di temperatura (20 °C). In questo caso sono possibili due soluzioni che prevedono:

- l'installazione di batterie alettate percorse da acqua calda (dotate di sistema di regolazione con valvola miscelatrice a tre vie) poste sulle aperture naturali inferiori (in tal caso si manifestano perdite di carico concentrate addizionali di cui occorre tener conto nella valutazione del valore di K);
- l'installazione di una centrale di trattamento dell'aria in grado di controllare temperatura, umidità relativa e qualità (mediante sistema di filtrazione) dell'aria che viene immessa tramite gruppo ventilante. La pressione totale del ventilatore può essere tale da vincere solo le perdite di carico nel passaggio della centrale, ma più convenientemente può garantire una pressione statica utile in grado di distribuire l'aria tramite un sistema di condotti di mandata con opportuni diffusori. In tal caso il sistema naturale è limitato all'estrazione, favorita dal fatto che l'ambiente è pressurizzato dal sistema di immissione.

#### **4.2. Effetto camino generalizzato (applicato ad un condotto o una intercapedine)**

Si è valutata la possibilità di migliorare la ventilazione esponendo i condotti ai raggi solari, in modo da sfruttarne il contenuto energetico termico, realizzando cioè dei camini solari. Si è adottato per lo studio di questa soluzione il modello esposto da Sandberg, valido sotto le ipotesi di flusso turbolento completamente sviluppato.

Il tiraggio è generato dalla potenza termica totale incidente  $q$  [W]. La potenza termica incidente verrà espressa in termini di "effetto camino specifico":



$$B = \frac{g\beta q}{\rho C} \quad [\text{m}^4/\text{s}^3]$$

essendo  $\beta$  il coefficiente di espansione termica dell'aria e  $C$  il calore specifico.

In un camino solare di altezza  $H$  [m], larghezza  $D$  [m] e sezione  $A$  [m<sup>2</sup>] la pressione disponibile per generare un flusso è fornita dalla differenza in massa  $\Delta m$  tra l'aria nell'intercapedine e un corrispondente volume di aria ambiente:

$$\Delta p = \frac{g \cdot \Delta m}{A} = \frac{\alpha \beta}{M/\rho} \rho H$$

dove  $\alpha$  è il fattore di configurazione che considera la localizzazione del flusso termico all'intercapedine e  $M$  è la portata in massa.

Le forze che contrastano il tiraggio sono l'attrito e le resistenze di imbocco e di uscita.

A causa del riscaldamento la densità dell'aria diminuisce con l'altezza e la velocità aumenta per la conservazione della massa.

La distribuzione dell'"effetto camino specifico" può essere caratterizzata dal fattore di configurazione geometrica  $\alpha$  che assume valori compresi tra 0 (immissione puntuale alla sommità del camino) e 1 (immissione puntuale alla base del camino) essendo  $\alpha = 0,5$  nel caso di distribuzione termica uniforme (camino esposto per tutta l'altezza).

Le equazioni valide in regime turbolento e con flusso determinato dalle resistenze in ingresso ( $A_{in} \ll A$ ) e in uscita ( $A_{out} \ll A$ ) sono riportate nel seguito.

La velocità media di efflusso può essere descritta da:

$$U = \left( \frac{\alpha B}{\psi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [\text{m/s}]$$

dove

$$\psi = \frac{A}{H} \left\{ \lambda_{fric} \frac{H}{D} + \frac{1}{2} \left[ (1 + k_{in}) \left( \frac{A}{A_{in}} \right)^2 + \left( \frac{A}{A_{out}} \right)^2 \right] \right\} \quad [\text{m}]$$

Le portate di aria in volume e in massa sono date da:

$$Q = (\alpha B/\psi)^{1/3} A \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$M = \rho (\alpha B/\psi)^{1/3} A \quad [\text{kg/s}]$$

L'innalzamento di temperatura  $\Delta T = T_{out} - T_{in}$  è dato da:

$$\Delta T = B/M \quad g \quad \beta = B^{2/3} / (A \quad g \quad \beta \quad (\alpha/\psi)^{1/3})$$

La portata massima teorica si ottiene quando  $\psi$  raggiunge il valore minimo  $\psi_{\min} = A/H$ . Ciò si verifica quando non sussistono perdite e le sezioni di ingresso e uscita hanno la stessa superficie del condotto.

La velocità massima è data da:

$$U_{\max} = (\alpha B H / (W D))^{1/3}$$

essendo  $A = W D$

e la corrispondente differenza di temperatura vale:

$$\Delta T_{\max} = B^{2/3} H^{1/3} / (A^{2/3} g \beta (\alpha)^{1/3})$$

Incrementando l'altezza, mantenendo costanti la sezione dell'intercapedine e la potenza termica incidente, la portata aumenta fino a un valore limite funzione delle resistenze per attrito. Pertanto la velocità massima assoluta è data da:

$$U_{\max, \text{ass}} = (\alpha B / W) / \lambda_{\text{fric}}^{1/3}$$

essendo  $\lambda_{\text{fric}}$  il coefficiente di attrito.

Come si nota la formula fa riferimento a una sezione di condotto rettangolare, la quale permette di presentare una larga superficie alla radiazione e ha il pregio di poter essere semiannegata in una falda di tetto, o in una parete. Nella sezione di sbocco verranno posizionati gli scambiatori del sistema di recupero termico e un ventilatore assiale di assistenza al deflusso attivato da celle fotovoltaiche.

Per una trattazione analitica dei fondamenti teorici alla base della ventilazione per convezione naturale in presenza di scambi termici, si può fare riferimento a: "Karl Terpager Andersen – Design of Natural Ventilation by Thermal Buoyancy with Temperature Stratification – Roomvent – Stockholm – 1998", di cui allegiamo una traduzione in appendice.

## 5. TIPOLOGIE IMPIANTISTICHE CON VENTILAZIONE IBRIDA

La ventilazione ibrida può essere definita come un sistema bimodale (naturale e/o meccanico) controllato al fine di minimizzare i consumi energetici, mantenendo a valori accettabili la qualità dell'aria interna e il comfort termico.

Lo scopo primario dei sistemi ibridi è quello di introdurre aria di rinnovo per il controllo della qualità dell'aria ambiente, ma alcuni provvedono anche al controllo e al benessere termico nel periodo di occupazione degli ambienti.

Lo scopo dei sistemi di controllo è quello di garantire la portata di aria richiesta con i requisiti appropriati e con il minimo consumo energetico.

Il progetto del sistema di ventilazione naturale o ibrido deve essere tale da massimizzare lo sfruttamento dei seguenti vettori energetici:

- prevalenza fornita dall'effetto camino;

- campo di pressioni generato dalle correnti ventose;
- riscaldamento elio-termico per incrementare l'estrazione attraverso i camini;
- pannelli fotovoltaici per alimentare ventilatori integrativi.

L'utilizzo complementare di queste quattro strategie permette la realizzazione di un sistema in larga misura indipendente da forniture energetiche di natura convenzionale.

Esaminiamo ora in dettaglio tre tipologie impiantistiche di tipo ibrido individuate per un complesso edilizio universitario.

Dal punto di vista dei carichi termici, le caratteristiche degli ambienti costituenti il complesso edilizio sono riconducibili a quattro principali casi:

- ambienti con carichi termici endogeni preminenti rispetto ai carichi termici esterni; sono caratterizzati da affollamenti elevati e fortemente variabili. Le portate di aria di rinnovo sono variabili da un valore minimo ad ambiente non utilizzato a valori elevati in funzione dell'affollamento. Sono riconducibili a questa categoria le aule didattiche, gli auditorium e i centri congressi;
- ambienti con carichi termici esterni preminenti rispetto ai carichi termici endogeni; sono caratterizzati da affollamenti medio bassi, limitata incidenza di apparecchi illuminanti e macchinari a fronte delle significative superfici costituenti l'involucro edilizio (pareti e vetrate). Le portate di aria di rinnovo richieste sono limitate e costanti. Sono riconducibili a questa categoria gli studi per docenti e ricercatori, gli uffici e le residenze universitarie;
- ambienti con portate di aria di estrazione fortemente variabili; sono caratterizzati da estrazioni di aria variabili da valori minimi (cappe di estrazione ferme) a valori molto elevati. Le portate di aria di rinnovo variano di conseguenza dovendo compensare l'aria estratta. Sono riconducibili a questa categoria i laboratori di ricerca caratterizzati da elevato numero di cappe aspiranti e limitata presenza di operatori.

Tralasciando l'ultimo caso, in cui, per ovvie ragioni, non è praticabile una ventilazione di tipo ibrido, vengono analizzati in dettaglio gli altri tre casi.

La tipologia impiantistica prevalente individuata è quella di un impianto di condizionamento misto (aria-acqua) a pannelli radianti e aria primaria.

Pertanto le tipologie impiantistiche saranno in generale riconducibili a tre:

- pannelli radianti e aria primaria mediante sistema naturale/ibrido;
- pannelli radianti e aria primaria mediante sistema meccanico a portata costante;
- pannelli radianti e aria primaria mediante sistema meccanico a portata variabile.

In genere il controllo della qualità dell'aria sarà affidato all'introduzione di una adeguata portata di aria esterna, stabilita in base al numero degli occupanti e/o in base all'apporto di inquinanti legato alla destinazione d'uso.

La regolazione dell'umidità relativa verrà effettuata centralmente mediante il controllo del contenuto igrometrico dell'aria primaria.

### 5.1. Sistema con immissione naturale e estrazione ibrida

Tale tipologia è caratteristica di un residence o albergo.

L'aria di rinnovo viene immessa con un sistema naturale (bocchetta autoregolante) con possibilità di intercettazione manuale o servocomandata, mentre la temperatura dell'acqua di alimentazione del sistema radiante è regolata a punto fisso. Il microclima locale è garantito da un regolatore ambiente in grado di intervenire sulla elettrovalvola

di tipo on-off del circuito del pannello radiante.

Occorre prevedere l'installazione di aeratori del tipo autoregolante della portata in funzione della differenza di pressione. Essi realizzano autonomamente una modulazione della portata d'aria immessa, diminuendo l'intensità del flusso nei casi di velocità eccessiva dovuta a raffiche di vento.

E' buona norma prevedere, su circuito autonomo miscelato a temperatura più elevata di quella dei pannelli, dei radiatori a piastra in acciaio per l'integrazione invernale nei bagni e per controllare la temperatura di immissione dell'aria di ventilazione naturale (viene introdotta una piastra radiante in acciaio davanti alla bocchetta di introduzione dell'aria esterna).

L'aria di rinnovo, immessa per via naturale viene estratta tramite bocchette poste nella camera sopra il controsoffitto del bagno e convogliata per mezzo di canalizzazioni di ripresa passanti entro la controsoffittatura degli ingressi delle camere e dei bagni collegate ai condotti verticali di estrazione distinti per ciascun piano e sfocianti in copertura.

La ripresa avviene con il sistema ibrido (naturale-meccanico) descritto nel seguito.

I condotti di estrazione convoglieranno l'aria estratta a dei torrini di estrazione posti sul colmo del tetto, dotati di ventilatore assiale in grado di presentare limitata resistenza al passaggio dell'aria a motore fermo.

Il sistema prevede due regimi di funzionamento:

- mandata ed estrazione naturali; si applica nelle stagioni intermedie in cui le condizioni di temperatura e umidità esterna consentono un'immissione diretta dell'aria esterna in ambiente tramite opportune griglie con profilo antivento. L'estrazione dell'aria in regime naturale avverrà per effetto camino (differenza di temperatura);
- mandata naturale ed estrazione meccaniche; si applica quando le differenze tra la temperatura dell'aria interna e quella esterna non consentono l'attivazione del tiraggio naturale dei condotti di estrazione. Si prevede l'immissione di aria naturale e l'estrazione assistita dal ventilatore assiale del torrino.

Qualora il tiraggio sui condotti di estrazione, rilevato da un sensore di pressione differenziale non sia sufficiente, il sistema di regolazione provvederà all'attivazione, con velocità variabile mediante inverter, del ventilatore (funzionamento ibrido) che fornisce la pressione statica utile all'estrazione della portata di rinnovo richiesta. L'energia elettrica per il funzionamento del ventilatore viene assicurata da una fonte rinnovabile quale l'impianto fotovoltaico.

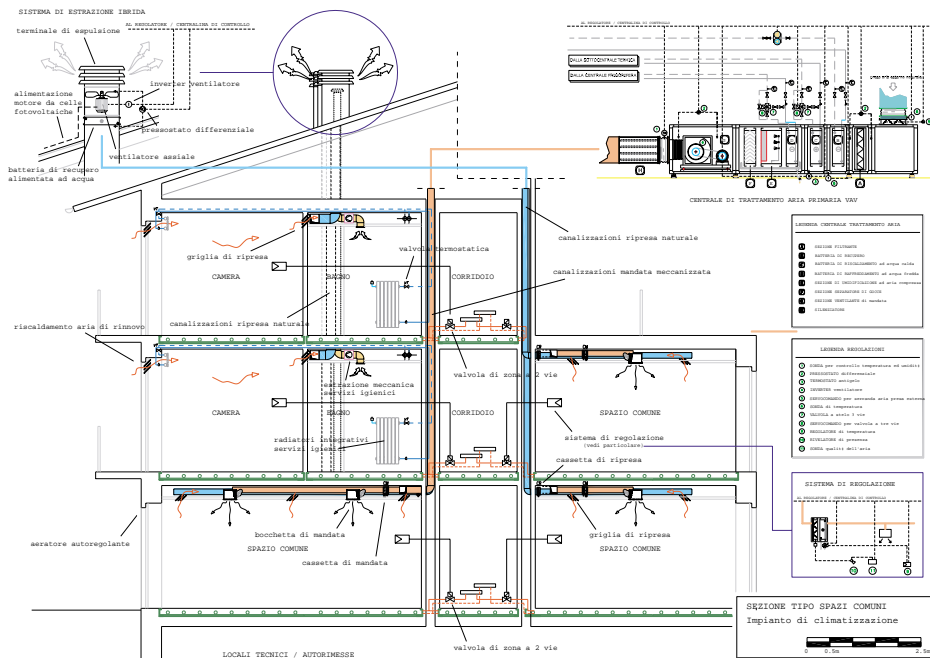


Figura 1

## 5.2. Sistema con immissione ed estrazione ibrida

Questa tipologia è caratteristica di un edificio adibito ad uffici.

L'aria primaria viene distribuita con un sistema monocondotto, a portata costante. La portata minima di aria di rinnovo garantita è funzione delle condizioni di affollamento con un ricambio di base valutato in base alla norma UNI 10339.

Poiché i pannelli radianti in ciclo estivo hanno una bassa resa specifica, si dovrà poter compensare una quota del carico sensibile ambiente riducendo la temperatura di immissione dell'aria primaria.

Analogamente poiché in ciclo invernale la temperatura dell'acqua non può superare determinati valori (40 – 42 °C) per evitare gli effetti fisiologici negativi conseguenti ad una temperatura di pavimento troppo elevata, anche in condizioni invernali l'aria primaria dovrà poter compensare parte del carico sensibile ambiente mediante innalzamento della temperatura di immissione.

Il controllo del microclima per ogni singolo ambiente è garantito da un regolatore ambiente in grado di intervenire sulla elettrovalvola di tipo on-off del circuito del pannello radiante.

Il controllo dell'umidità relativa avviene intervenendo centralmente a livello di unità di trattamento sulle caratteristiche di temperatura e umidità specifica dell'aria di rinnovo, operando se necessario un post-riscaldamento.

La ripresa avviene con il sistema ibrido (naturale-meccanico) descritto nel seguito.

I condotti di estrazione, previsti per gli uffici e per i corridoi convogliano l'aria estratta ai torrini di estrazione posti sul colmo del tetto, dotati di ventilatore assiale in grado di presentare limitata resistenza al passaggio dell'aria a motore fermo.

Il sistema prevede tre regimi di funzionamento:

- mandata ed estrazione naturali; si applica nelle stagioni intermedie in cui le condizioni di temperatura e umidità esterna consentono un'immissione diretta dell'aria esterna in ambiente tramite opportune griglie con profilo antivento. L'estrazione dell'aria in regime naturale avviene per effetto camino (differenza di temperatura) e in conseguenza del riscaldamento dell'aria nel passaggio entro l'intercapedine del tetto ventilato;
- mandata meccanica ed estrazione naturale; si applica quando è necessario un controllo della umidità ambiente e prevede l'immissione di aria trattata e l'estrazione naturale come descritto al punto precedente;
- mandata ed estrazione meccaniche; si applica quando le differenze tra la temperatura dell'aria interna e quella esterna non consentono l'attivazione del tiraggio naturale dei condotti di estrazione. Si prevede l'immissione di aria trattata e l'estrazione assistita dal ventilatore assiale del torrino.

Questo sistema è praticabile per gli studi in quanto non vi è la necessità di effettuare un recupero termico a motivo delle portate contenute di aria di rinnovo.

Qualora il tiraggio sui condotti di estrazione, rilevato da un sensore di pressione differenziale non sia sufficiente, il sistema di regolazione provvede all'attivazione, con velocità variabile mediante inverter, del ventilatore (funzionamento ibrido) che fornisce la pressione statica utile all'estrazione della portata di rinnovo richiesta. L'energia elettrica per il funzionamento del ventilatore viene assicurata da una fonte rinnovabile quale l'impianto fotovoltaico.

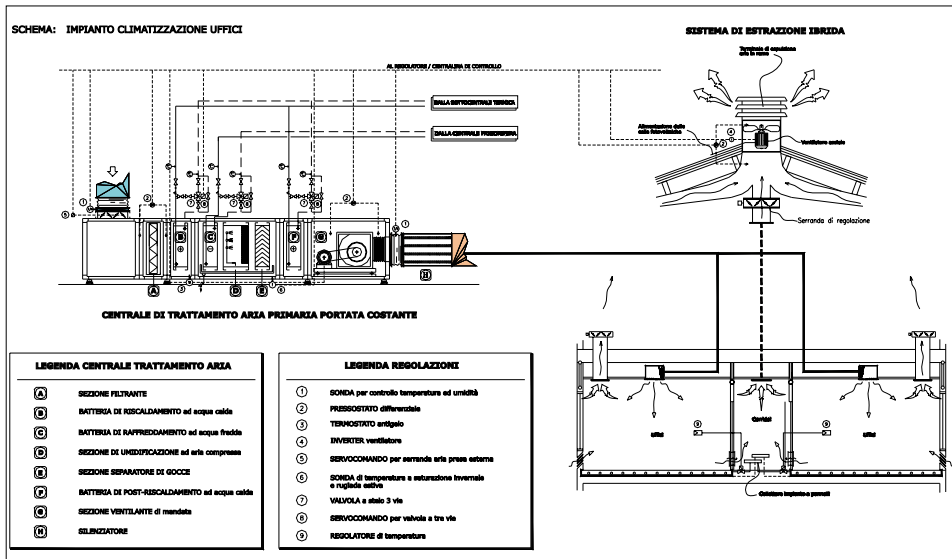


Figura 2

### 5.3. Sistema con immissione meccanica ed estrazione ibrida

La tipologia è caratteristica di ambienti ad elevato affollamento, quali ad esempio aule o sale congressi.

L'aria primaria viene distribuita con un sistema monocondotto a portata variabile (VAV) in funzione dell'affollamento.

Poiché i pannelli radianti in ciclo estivo hanno una bassa resa specifica, l'aria primaria deve essere in grado di compensare una quota del carico sensibile ambiente. Ciò è reso possibile agendo sull'aria di immissione, riducendone la temperatura, intervento possibile entro certi limiti, e aumentandone la portata. Quest'ultima operazione è consentita poiché l'impianto di rinnovo aria viene dimensionato per una portata massima sufficiente a compensare la condizione di affollamento massimo di tutte le aule (situazione limite di fattore di contemporaneità pari a 1).

Analogamente, poiché in ciclo invernale la temperatura dell'acqua non può superare determinati valori (40 – 42 °C), per evitare gli effetti fisiologici negativi conseguenti ad una temperatura di pavimento troppo elevata anche in condizioni invernali l'aria primaria deve poter compensare parte del carico sensibile ambiente mediante innalzamento della temperatura di immissione.

L'aria viene immessa in ambiente mediante diffusori del tipo a dislocazione posti direttamente entro le aule. La ripresa avviene attraverso l'atrio centrale per le aule ai piani bassi e attraverso il tetto ventilato all'ultimo piano.

La ripresa avviene con il sistema ibrido (naturale-meccanico) descritto nel seguito.

L'intercapedine del tetto e l'atrio centrale convogliano l'aria estratta ad alcuni torrini di estrazione posti sul colmo del tetto, dotati di ventilatore assiale in grado di presentare limitata resistenza al passaggio dell'aria a motore fermo.

Qualora necessario (funzionamento ibrido) l'attivazione del ventilatore fornisce la pressione statica utile all'estrazione della portata di rinnovo richiesta. L'energia elettrica per il funzionamento del ventilatore viene assicurata da una fonte rinnovabile quale l'impianto fotovoltaico.

Il sistema prevede due regimi di funzionamento:

- mandata meccanica ed estrazione naturale; si applica normalmente e prevede l'immissione di aria trattata e l'estrazione dell'aria in regime naturale per effetto camino (differenza di temperatura);
- mandata ed estrazione meccaniche; si applica quando le differenze tra la temperatura dell'aria interna e quella esterna non consentono l'attivazione del tiraggio naturale dei condotti di estrazione. Si prevede l'immissione di aria trattata e l'estrazione assistita dal ventilatore assiale del torrino.

L'estrazione naturale è praticabile fintantoché le perdite di carico sul sistema di estrazione, in particolare dovute alla batteria di recupero termico, lo consentono.

Il controllo di base della temperatura ambiente avviene mediante la regolazione centralizzata di tipo climatico della temperatura dell'acqua nei pannelli, in funzione della temperatura esterna sia in regime invernale che in regime estivo.

L'attivazione del sistema ad aria primaria per l'ambiente considerato, mediante apertura della serranda sulla cassetta terminale VAV, è subordinato a una sonda di presenza.

La regolazione della portata di aria di rinnovo è legata a una sonda di qualità dell'aria interna in grado di monitorare l'effettivo affollamento degli ambienti.

Il controllo locale della temperatura è ottenuto da regolatori ambiente di tipo modulante con caratteristiche PID in grado di intervenire su portata e temperatura dell'aria, sulla base di un valore di temperatura rilevato da sonde ambiente. I regolatori agiscono sui terminali a portata variabile (cassette VAV) inseriti sia nel condotto di mandata che in quello di ripresa modulando le portate di aria e sulle batterie di post-riscaldamento sulle cassette di mandata.

Il controllo dell'umidità relativa avviene intervenendo sulle caratteristiche di temperatura e umidità specifiche dell'aria di rinnovo, operando se necessario un post-riscaldamento locale.

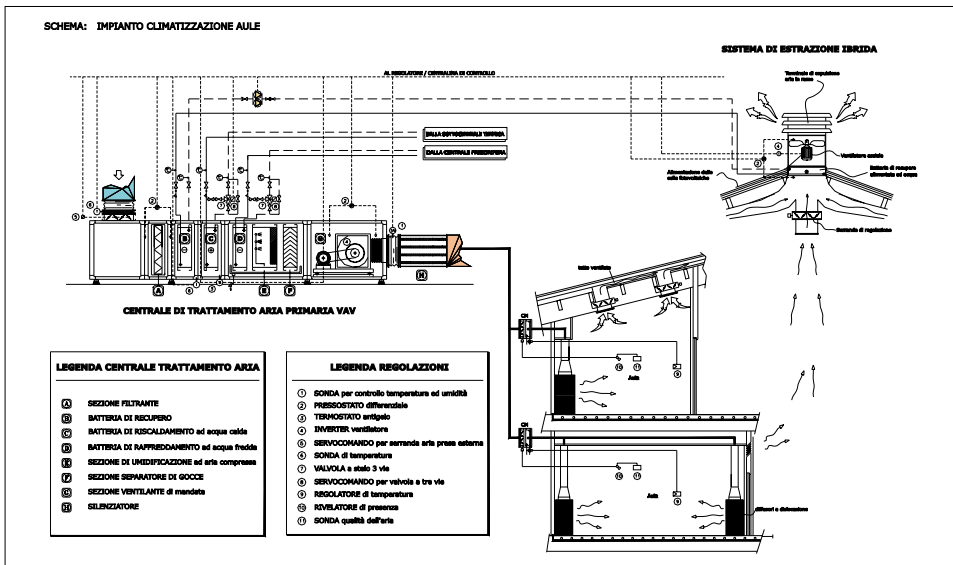


Figura 3

## 6. CASO STUDIO

### 6.1. Introduzione

I sistemi di controllo del clima interno di cui abbiamo sin qui delineato alcune caratteristiche influiscono in elevata misura sulla progettazione dell'edificio in quanto devono essere integrati nella struttura stessa.

E' fondamentale quindi, a livello di ristrutturazione ma specialmente nelle nuove realizzazioni, uno stretto coordinamento fin dalle prime fasi progettuali tra gli architetti e i consulenti impiantistici, stante la necessità che la tipologia architettonica sia in grado di supportare sistemi di ventilazione ibrida (condotti verticali, pareti ventilate, ecc.).

In genere al progettista degli impianti tecnologici è richiesta l'individuazione degli



spazi tecnici per ospitare l'impianto di climatizzazione durante la fase di progettazione: sulla base dello stato dell'arte è possibile, con una precisione funzione del grado di sviluppo del progetto, definire le modalità di inserimento e le richieste di spazio da avanzare.

La tipologia del sistema di climatizzazione potrà essere scelta entro una ristretta cerchia di opzioni, determinata da vari fattori, tra cui naturalmente il budget a disposizione. Questa procedura si basa su due presupposti: a) il sistema di climatizzazione verrà inserito all'interno degli spazi predisposti nella struttura; b) è sicuramente possibile progettare un impianto di condizionamento in grado di soddisfare i requisiti termoigrometrici di progetto. Queste considerazioni autorizzano un certo disinteresse da parte del progettista architettonico nei confronti dell'impianto, visto come un mero complemento tecnologico all'edificio.

Ora ipotizziamo che, in armonia alla attuale tendenza europea, un architetto intenda realizzare un edificio dotato di ventilazione naturale. Egli sarà probabilmente a conoscenza che uno dei metodi disponibili consiste nello sfruttare il tiraggio di camini appositamente costruiti e integrati nel disegno del fabbricato. Tuttavia un quesito da definire riguarderà la sezione e la altezza da assegnare a questi condotti verticali.

La ventilazione naturale può essere utilizzata per due differenti finalità: il ricambio d'aria ai fini igienico-sanitari e il raffrescamento estivo. Nel primo caso il flusso deve essere controllato; nel secondo maggiore è il flusso che si riesce a creare, più elevato risulta l'effetto di raffrescamento (free-cooling) generato. Questo vale fino a quando la temperatura esterna non supera un certo livello. Naturalmente non si può raffrescare in estate se la temperatura esterna è maggiore di quella interna. Nei casi in cui la differenza di temperatura interna-esterna è bassa, inoltre, il tiraggio che si ottiene per effetto camino è limitato.

**In generale in Italia non si possono ottenere con metodi naturali le stesse condizioni estive garantite dai sistemi meccanici di climatizzazione.**

Il presupposto b) che avevamo sottolineato nell'esempio precedente, non si può quindi applicare al caso di progetto di un sistema di ventilazione naturale. Un simile sistema va quasi sempre integrato con una componente meccanica, a realizzare così un sistema ibrido. Non è più possibile richiedere semplicemente un progetto di impianto da inserire nell'edificio. E' necessaria una collaborazione per definire fino a che punto spingere le prestazioni del sistema naturale. Se si desidera un edificio ventilato naturalmente tutto l'anno, ad esempio nel Nord Italia, probabilmente si dovranno accettare delle temperature estive interne piuttosto elevate, si dovranno integrare degli ingombranti camini nella composizione architettonica, si dovrà rinunciare a strutture leggere in favore d'involucri dotati di elevata inerzia. A fronte di un impegno progettuale più oneroso si potrebbero ottenere cospicui risparmi in termini di costi energetici.

Ma non sempre la committenza potrebbe considerare vantaggioso il risparmio energetico a fronte delle differenti condizioni di comfort, oppure non sempre si desiderano certi impatti degli impianti sul progetto architettonico.

Inoltre tutte queste considerazioni assumono differente rilievo a seconda del contesto climatico del sito, molto variabile in Italia.

## 6.2. Descrizione del tema

Come esempio delle problematiche cui ci siamo riferiti poco innanzi, proviamo a

realizzare uno studio per un progetto virtuale di un edificio con destinazione d'uso uffici, in cui si richiede attenzione per il risparmio energetico e determinate condizioni di comfort ambientale. Il progetto prevede la realizzazione di uffici, principalmente singoli, in più corpi di fabbrica a tre livelli. Si vuole realizzare il controllo dei carichi sensibili attraverso un sistema radiante a pavimento. E' richiesto lo studio di fattibilità di un sistema di ventilazione naturale.

Un piano di uffici è stato descritto attraverso una rete, in modo da poter simulare i flussi d'aria al suo interno, durante un anno tipo, mediante il programma Comis. Rispetto al modello semplificato analitico l'utilizzo del programma fornisce una migliore approssimazione dei fenomeni in relazione alla configurazione geometrica dell'edificio. In particolar modo gestisce l'effetto del vento utilizzando un set di dati di coefficienti di pressione puntuali della facciata, ricavati per diverse direzioni del vento con il programma CpCalc+. Questo software realizza un'analisi, esclusivamente per forme semplici, approssimando la soluzione attraverso un modello matematico costruito sulla base di una vasta libreria di dati sperimentali e esiti di prove in galleria del vento. Responsabile del suo sviluppo, finanziato dall'Unione Europea, è stato il Prof. Arch. Mario Grosso del Politecnico di Torino.

Una rete possibile per un piano di uffici di un corpo di fabbrica è schematizzata nella figura seguente:

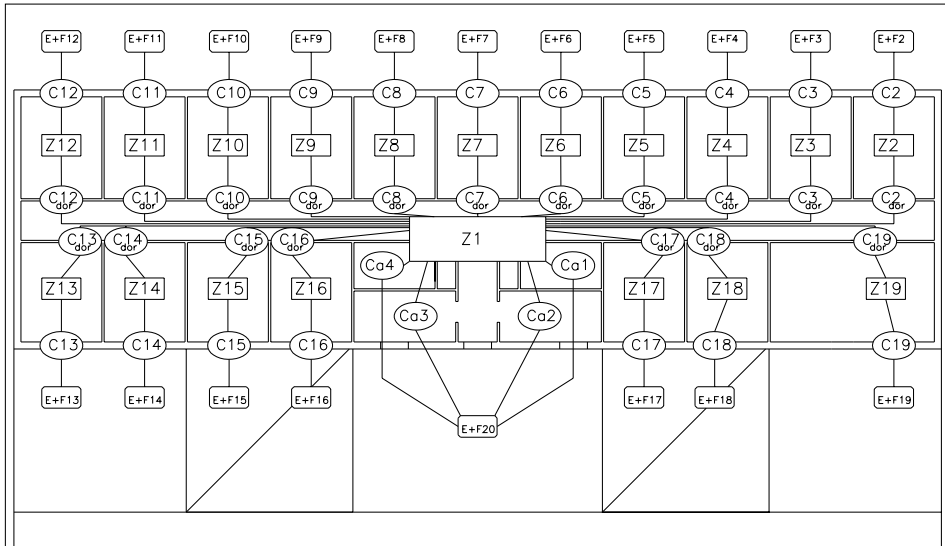


Figura 4 – Schematizzazione della rete per lo studio di un piano di uffici con il programma multi-zona Comis

In essa le lettere Z rappresentano le zone, le C le bocchette per la ventilazione, le E+F i nodi esterni, Ca i camini per l'estrazione.

Gli aeratori esterni utilizzati sono del tipo autoregolante, con passaggio a geometria variabile e controllo sui picchi di flusso, mentre quelli interni sono di tipo isofonico.

Le bocchette autoregolanti esterne presentano maggiori cadute di pressione, ma consentono di limitare, in caso di vento intenso, la velocità del flusso d'aria, che potrebbe assumere valori fastidiosi per gli utilizzatori degli uffici. Il controllo all'interno delle bocchette è effettuato mediante un setto posto alla base della sezione di passaggio, montato su un perno. Essa è in grado di basculare ed è mantenuta, nella posizione che consente il deflusso, da una molla di richiamo. La costante elastica di questa è tale per cui se la pressione nel condotto scende al sotto di un certo valore, associato a una particolare velocità, la parete ruota e occlude il passaggio. Sono possibili le posizioni intermedie, ottenendo una regolazione modulante.

AERATORE AUTOREGOLANTE

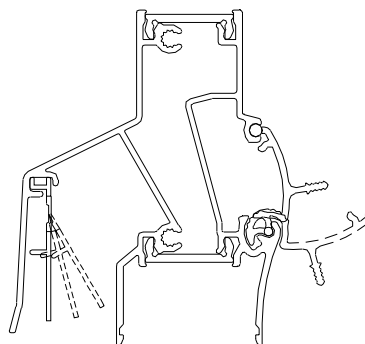


Figura 5

### 6.3. Risultati

I risultati sono stati elaborati in modo statistico e presentati in forma di percentuali orarie di successi, intendendo come tali la realizzazione del ricambio d'aria imposto dalla normativa vigente.

La rapidità di calcolo del modello automatico multi-zona ha permesso lo sviluppo di un approccio parametrico. Alcune grandezze sono state modificate progressivamente per evidenziare l'effetto delle variazioni nel disegno della soluzione sulle prestazioni del sistema di ventilazione.

Sostanzialmente in un sistema simile al nostro è possibile agire su tre principali fattori:

- dimensioni e numero dei camini;
- dimensione degli aeratori;
- disegno aerodinamico del torrino di estrazione e/o della copertura; oltre che, naturalmente, su
- ottimizzazione geometrica dei percorsi dell'aria; intendendo come tale la limitazione delle perdite di carico distribuite e concentrate (es.: smussando spigoli e realizzando adeguati imbrocchi per i condotti).

In figura 6 è rappresentato l'effetto delle variazioni geometriche dei camini nel nostro caso studio. Notiamo che l'incremento di prestazioni è funzione dell'altezza e delle dimensioni del camino.

Immaginiamo ad esempio di desiderare un minore impatto del camino sulla copertura. Soffermiamoci sul livello 70% di successi. Partendo dalla curva più a destra, notiamo che esso è ottenibile integrando camini da 4 m d'altezza e base (0,3x0,3) m. La stessa prestazione è ottenibile incrementando il lato di base di 0,2 m e riducendo di 0,5 m lo sviluppo verticale (linea a sinistra). Ora, spostandoci ancora sulla linea più a sinistra, notiamo che aggiungendo altri 0,2 m al lato di base, sostanzialmente non guadagniamo più nulla in altezza.

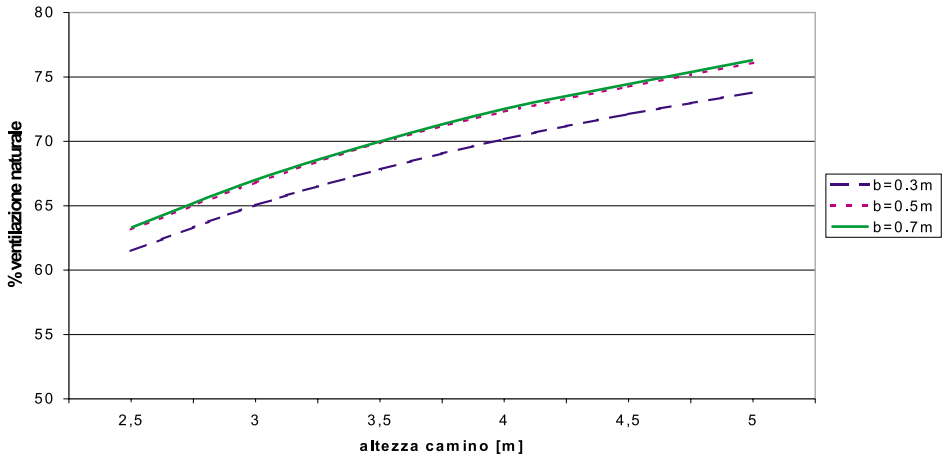


Figura 6 – Percentuali successi; parametro: lato di base camino

Nella figura seguente (Figura 7) si rappresenta l'effetto della variazione di dimensioni degli aeratori, sia quelli perimetrali autoregolanti, sia gli interni sopra porta.

Si può notare, anche in questo caso, come l'effetto delle variazioni di geometria sulle prestazioni vada riducendosi mano a mano che ci si avvicina alla soluzione migliore. Rispetto agli andamenti precedenti, è evidente anche un appiattimento delle curve all'aumentare del parametro lunghezza degli aeratori.

E' possibile abbinare ad ognuna delle configurazioni geometriche una valutazione preliminare dei costi. Si realizza così un set di informazioni a supporto del processo progettuale.

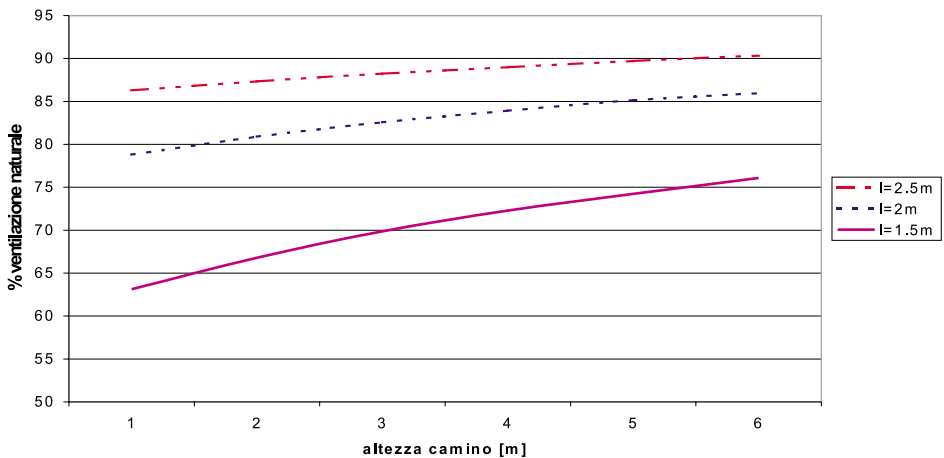


Figura 7 – Percentuali successi; parametro: lunghezza aeratori

Come abbiamo appurato dall'analisi parametrica precedente per incrementare questa percentuale si deve accettare un aumento dei volumi dei sistemi di ventilazione naturale. Qualora si ritenga di limitarli, una soluzione sostenibile alternativa è l'integrazione di un sistema di generazione elettrica a pannelli fotovoltaici. L'idea è di realizzare la ventilazione meccanica nelle ore in cui il sistema naturale non è sufficiente, alimentando i motori dei ventilatori con l'energia prodotta. Un simile disegno si adatta molto bene a un sistema naturale, per il fatto che tutti gli elementi sono stati necessariamente progettati per bassissime velocità di flusso (0,5 m/s) e resistenze, e, quindi, altrettanto basse cadute di pressione. In effetti, nel caso in esame, isolando un singolo piano, un motore della classe di limitata potenza accoppiato ad un ventilatore in ogni camino potrebbe essere sufficiente per integrare il sistema naturale e raggiungere il 100% dei successi. Ovviamente simili motori potrebbero essere alimentati anche direttamente dalla rete.

## 7. CONCLUSIONI

Le tematiche progettuali portate a nuova attualità dalle recenti realizzazioni di architettura eco-compatibile costituiscono un importante filone nel dibattito sulla ventilazione degli edifici.

La ventilazione naturale rappresenta al tempo stesso la tradizione storica e la novità. Come strategia tradizionale è stata sostituita nella seconda metà del secolo scorso dallo sviluppo dei più efficaci sistemi meccanici, dotati di potenzialità di utilizzo molto maggiori, di adattabilità e di qualità di controllo semplice. Come innovazione è stata rivalutata soprattutto sull'onda degli sviluppi di pensiero seguiti alla grande crisi energetica degli anni 70. Il rinnovato interesse è giustificato dalla riuscita applicazione di sistemi di regolazione a gestione elettronica ai principi di ventilazione naturale, permettendo lo sviluppo di sistemi affidabili e dotati di qualità di controllo soddisfacenti.

Le prestazioni dei sistemi naturali di ventilazione dipendono molto dal disegno del fabbricato che li ospita e dai mutevoli fattori climatici. Per questo motivo la progettazione dell'edificio dovrebbe essere realizzata sommando al processo di sviluppo del disegno architettonico una fase dedicata all'identificazione delle strategie di controllo climatico ambientale.

I fattori climatici tipici di ogni zona geografica non sono però in alcun modo controllabili, e questo determina il limite maggiore alle prestazioni dei sistemi naturali. È verificato dall'esperienza e dall'analisi teorica che nella grande maggioranza dei siti abitativi nel nostro paese le condizioni climatiche non permettono di soddisfare i requisiti di comfort necessari utilizzando sistemi di ventilazione esclusivamente naturali.

In generale le condizioni climatiche estive sono caratterizzate da temperature esterne piuttosto alte con umidità relative elevate e l'escursione termica giornaliera non è molto ampia.

Pertanto la ventilazione naturale consente un raffrescamento dell'edificio fino a quando la temperatura esterna è inferiore alla temperatura ambiente, dopodiché è possibile il solo rinnovo dell'aria ai fini igienico-sanitari (peraltro con difficoltà nell'innescare l'effetto camino ottenibile non per differenza di temperatura interno-esterno, ma solo per surriscaldamento solare della struttura del condotto di aspirazione naturale).

Anche la deumidificazione mediante introduzione di aria esterna è possibile fino a quando l'umidità relativa di quest'ultima è inferiore a quella ambiente o quando la

temperatura esterna è più bassa in modo significativo (in tal modo elevando la temperatura dell'aria introdotta è possibile ridurne l'umidità relativa). Superate tali condizioni la ventilazione naturale va integrata con un sistema meccanico.

Analogamente le condizioni climatiche invernali sono piuttosto rigide e anche sfruttando al massimo gli effetti positivi delle rientrate attraverso le superfici vetrate e del calore endogeno sviluppato dalle persone e dalle apparecchiature elettriche, occorre prevedere un riscaldamento tramite batterie di scambio termico alimentate con fluido termovettore.

Si evince pertanto come tutti i sistemi di riscaldamento e raffrescamento passivi richiedano alle nostre latitudini l'integrazione con impianti di climatizzazione e ventilazione meccanica controllata.

I sistemi naturali moderni possono quindi essere controllati attraverso un sistema di regolazione. Questo è l'aspetto essenziale che permette di concepire un sistema ibrido meccanico-naturale. Un simile sistema sfrutta infatti razionalmente tutte le risorse a disposizione, senza penalizzare la vivibilità interna al fabbricato. Nelle condizioni in cui non è più possibile realizzare la ventilazione naturale, o nei casi in cui necessiti una risposta pronta del sistema, si attiva infatti il sistema meccanico integrativo, che può collaborare in misura più o meno rilevante anche al controllo del carico sensibile.

Combinando in un sistema di controllo integrato un disegno dell'edificio adatto ai flussi di ventilazione, sistemi meccanici ad elevata efficienza, tecnologie sostenibili (come il fotovoltaico) e metodi di controllo della temperatura ad elevato rendimento è possibile realizzare fabbricati con vantaggiosa gestione energetica e condizioni di comfort di elevato livello.

### APPENDICE: Effetto camino generalizzato (applicato ad un atrio)

Vediamo ora di generalizzare l'equazione (1) che forniva la portata d'aria per effetto camino alla situazione in cui sia presente una stratificazione della temperatura nell'ambiente.

Estendiamo quindi il caso del generico condotto verticale a quello più generale di un atrio dotato di due aperture, una alla base e una alla sommità (fig. 1).

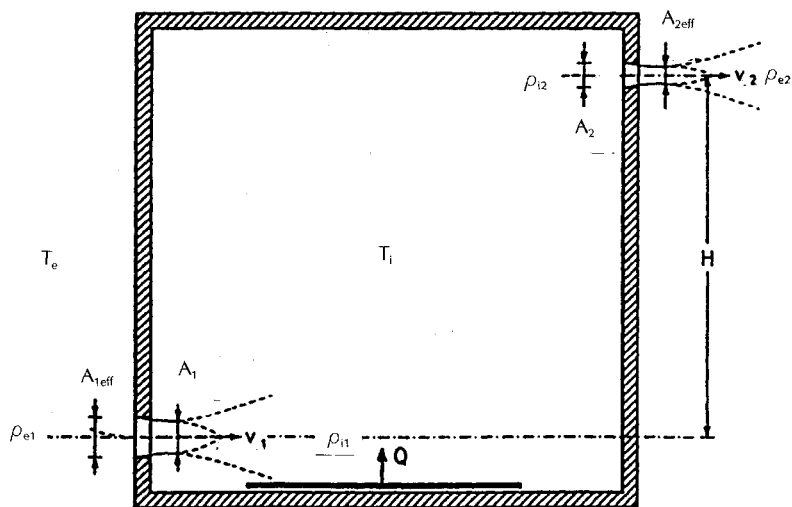


Fig.1

All'ambiente considerato sia fornita una potenza termica  $Q_s$ . La stratificazione della temperatura dipende da come il calore viene fornito e da come l'aria di rinnovo, introdotta dall'apertura inferiore, si miscela con l'aria ambiente.

La figura 2 individua alcuni andamenti della temperatura in funzione dell'altezza del locale (gradiente termico) per diverse tipologie di introduzione della potenza termica in ambiente.

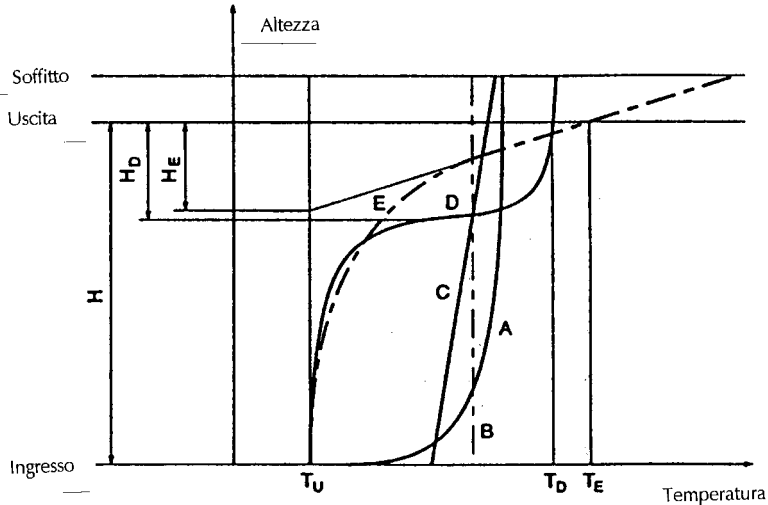


Fig.2

La retta A individua la situazione teorica limite in cui non sussiste stratificazione ed è ottenibile solo con il riscaldamento uniforme dell'ambiente e una miscela ottimale tra l'aria di rinnovo e l'aria ambiente.

La retta B rappresenta la situazione di stratificazione con andamento lineare con l'altezza, tipica di un riscaldamento uniforme della parete. E' il caso in cui all'effetto camino (tiraggio per effetto della differenza di densità) si aggiunge l'effetto di riscaldamento della parete (camino solare o sistema di estrazione elioassistito).

La curva C è tipica di un sistema in cui l'introduzione del calore avviene uniformemente a pavimento, quale può verificarsi nel caso di riscaldamento a pavimento realizzato mediante pannelli radianti annegati nella soletta.

La curva D rappresenta il caso in cui l'introduzione del calore avviene uniformemente a soffitto, tipico di un sistema a radiazione costituito da pannelli annegati nel solaio di copertura del locale.

Consideriamo dunque un volume di controllo delimitato dall'involucro dell'ambiente e dalle due sezioni di vena contratta a valle delle aperture.

Limitiamoci al caso di una stratificazione della temperatura interna con andamento lineare. La figura 3 anticipa l'andamento delle differenze di pressione. Si ha una pressione interna minore di quella esterna in corrispondenza dell'apertura inferiore, andamento che si inverte in corrispondenza dell'apertura superiore, passando per il cosiddetto asse neutro in cui le pressioni interna ed esterna si equivalgono.



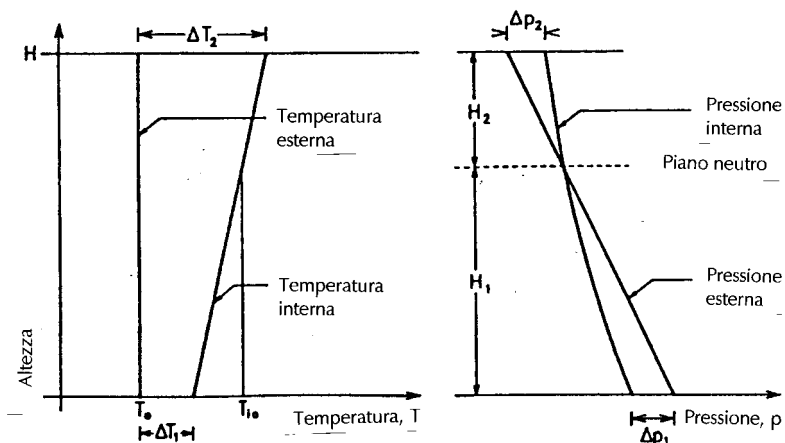


Fig.3

Le equazioni alla base dello studio sono:

l'equazione di conservazione della massa

$$\rho_e A_1 v_1 = \rho_{i2} A_2 v_2 \quad (1)$$

l'equazione di conservazione dell'energia

$$Q_s = c_p \rho_{i2} A_2 v_2 \Delta T_2 = c_p \rho_e A_1 v_1 \Delta T_2 = c_p \rho_e V \Delta T_2 \quad (2)$$

dove:

$\rho_e, \rho_{i2}$  [kg/m<sup>3</sup>] = densità dell'aria attraverso le aperture inferiore e superiore

$A_1, A_2$  [m<sup>2</sup>] = sezione della vena contratta nelle aperture inferiore e superiore

$v_1, v_2$  [m/s] = velocità dell'aria nelle sezioni di vena contratta delle due aperture

$Q_s$  [W] = potenza termica netta entrante (carichi termici introdotti in ambiente al netto delle dispersioni)

$\Delta T_2$  [temperature assolute K] = differenza tra temperatura interna ed esterna nella apertura superiore

$V$  [m<sup>3</sup>/s] = tasso di ventilazione

$c_p$  [1010 J/kg K] = calore specifico dell'aria

l'equazione dell'andamento della pressione interna (Andersen 1995)

$$p_i = p_{in} - g \rho_{in} y + 0,5 g b y^2 \quad (3)$$

con

$$b = \rho_{in} a / T \quad (4)$$

dove:

$p_{in}$  [Pa] = pressione interna all'altezza dell'asse neutro

$\rho_{in}$  [kg/m<sup>3</sup>] = densità dell'aria interna all'altezza dell'asse neutro

$g$  [9,81 m/s<sup>2</sup>] = accelerazione di gravità

$y$  [m] = distanza verticale dall'asse neutro, positiva verso l'alto

$a$  [K/m] = gradiente di temperatura interna

Dalla (3), insieme agli andamenti lineari della distribuzione di pressione esterna, è possibile calcolare i valori di differenza di pressione tra esterno e interno in corrispondenza delle aperture di ingresso e uscita dell'aria:

$$\Delta p_1 = \Delta \rho_n g H_1 - b g H_1^2/2 \quad (5)$$

$$\Delta p_2 = \Delta \rho_n g H_2 - b g H_2^2/2 \quad (6)$$

dove

$\Delta \rho_n$  [kg/m<sup>3</sup>] = differenza tra la densità dell'aria esterna e interna al livello dell'asse neutro

$H_1, H_2$  [m] = distanze del centro delle sezioni di ingresso ed uscita dall'asse neutro.

Dall'equazione generale del moto dei fluidi (equazione di Bernoulli generalizzata per deflusso stazionario, monodimensionale, senza lavoro utile) riferita all'asse neutro:

$$\frac{1}{2} v_1^2 + \Delta p_1 / \rho_1 = R \quad (7)$$

essendo

$R$  = lavoro delle forze resistenti (concentrate) =  $\xi_1 v_1^2/2$

si ottiene

$$\Delta p_1 / \rho_e = \frac{1}{2} (1 + \xi_1) v_1^2 = \frac{1}{2} \psi_1 v_1^2 \quad (8)$$

$$\Delta p_2 / \rho_{i2} = \frac{1}{2} (1 + \xi_2) v_2^2 = \frac{1}{2} \psi_2 v_2^2 \quad (9)$$

dove

$\Delta p_1, \Delta p_2$  [Pa] = differenza di pressione tra esterno e interno in corrispondenza delle aperture di ingresso e uscita dell'aria

$\xi_1, \xi_2$  = coefficienti di resistenza sulle sezioni di ingresso e uscita

$\psi_1, \psi_2$  = coefficienti di "flusso" per le sezioni di ingresso e uscita.

Risolvendo le equazioni sopra riportate si può determinare la posizione dell'asse neutro e quindi il tasso di ventilazione a partire dalla differenza di temperatura (effetto camino) o dalla potenza termica introdotta.

#### Determinazione della posizione del piano neutro

Le velocità dell'aria nelle vene contratte possono essere ricavate dalle equazioni (8) e (9) insieme alle equazioni (5) e (6). Inserendo le velocità nell'equazione (1) si ricava dopo semplificazioni e assumendo  $\rho_{in} / \rho_e \cong 1$  e  $\psi_1 / \psi_2 \cong 1$ :

$$A_1^2 (\Delta \rho_n g H_1 - b g H_1^2/2) = A_2^2 (\Delta \rho_n g H_2 + b g H_2^2/2) \quad (10)$$

Dove  $H_2 = H - H_1$  e inoltre  $\Delta \rho_n$  dipende da  $H_1$ . Dopo alcuni passaggi si ottiene una equazione di secondo grado per  $H_1$  come funzione del rapporto  $\Delta T_2 / \Delta T_1$  (essendo  $\Delta T_1$  la differenza di temperatura all'ingresso) parametrizzata secondo  $A_1 / A_2$ .

La figura 4 illustra la soluzione per diversi valori di  $A_1 / A_2$ . Come si può notare, il piano neutro è al di sopra della posizione valida per la temperatura interna uniforme.

Per  $\Delta T_2 / \Delta T_1$  tendente all'infinito (o  $\Delta T_1$  tendente a zero) si ottiene rispettivamente:

$H_1 / H$	con	$A_1 / A_2$
0,71		1/1
0,45		2/1
0,32		3/1

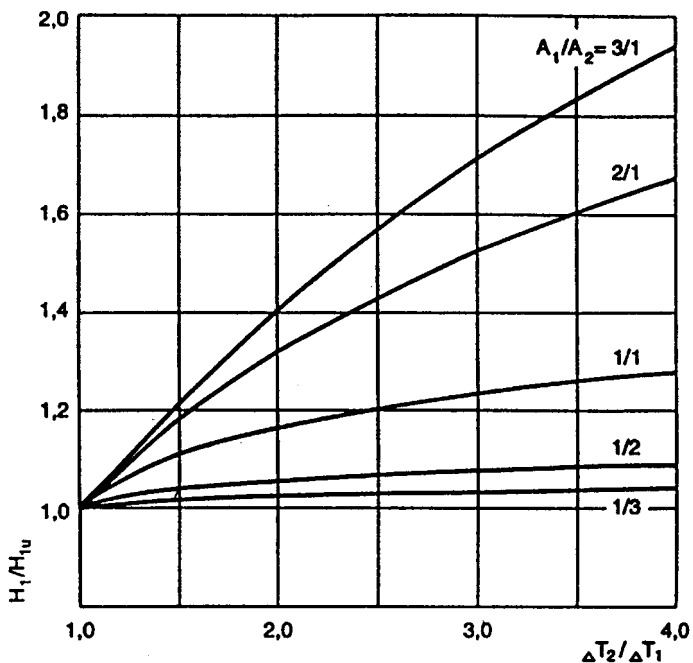


Fig. 4

#### Soluzione basata sulla differenza di temperatura

Introducendo la seguente relazione tra densità e temperatura:

$$\Delta \rho = \rho_e \Delta T / T_i = \rho_i \Delta T / T_e \quad (11)$$

si ottiene una soluzione basata sulla differenza di temperatura.

Con buona approssimazione la velocità dell'aria può essere data da:

$$v_1 = (2 \Delta T_m g H_{1u} / (\psi_1 T_{im}))^{1/2} \quad (12)$$

$$v_2 = (2 \Delta T_m g H_{2u} / (\psi_2 T_e))^{1/2} \quad (13)$$

essendo:

$$\Delta T_m = (\Delta T_1 + \Delta T_2) / 2 \quad (14)$$

$$H_{1u} = H / (1 + (T_{im}/T_u) (C_{a1}/C_{a2})^2 (A_1/A_2)^2) \cong H / (1 + (A_1/A_2)^2) \quad (15)$$

$$H_{2u} = H - H_{1u} \quad (16)$$

e dove:

$\Delta T_1, \Delta T_2$  = differenza tra la temperatura interna ed esterna alle sezioni di ingresso e uscita

$T_{im}$  = valor medio della temperatura interna fra le sezioni di ingresso e uscita

$H_{1u}, H_{2u}$  = distanza dalla posizione del piano neutro al centro delle sezioni di ingresso e uscita con temperatura interna uniforme.

Le equazioni (12) e (13) alle espressioni valide per la temperatura interna uniforme quando si usi una differenza di temperatura di  $\Delta T = \Delta T_m$ . Può essere dimostrato che la velocità “stratificata” è uguale a quella “uniforme” con un errore minore dell’1%. Ciò può essere spiegato dal fatto che il piano neutro si sposta verso l’alto e la differenza di temperatura all’ingresso decresce allo stesso tempo, risultando una differenza di pressione all’ingresso circa uguale a quella che si ottiene con una temperatura uniforme. In modo simile si ottengono differenze di pressione quasi uguali all’uscita.

Il tasso di ventilazione è dato da:

$$V = A_1 v_1 = C_{d1} A_{1eff} (2 \Delta T_m g H_{1u}/T_{im})^{1/2} \quad (17)$$

con:

$$C_{d1} = (A_1/A_{1eff}) / \psi_1^{1/2}$$

e dove:

$C_{d1}$  = coefficiente di contrazione sulla sezione di ingresso

$A_{1eff}$  = area effettiva della sezione di ingresso.

### Soluzione basata sulla potenza termica netta entrante

Nella equazione (2), il tasso di ventilazione può essere eliminato utilizzando l’equazione (17). Si ottiene:

$$Q_s = c_p \rho_e C_{d1} A_{1eff} (2 \Delta T_m g H_{1u}/T_{im})^{1/2} \Delta T_2$$

Questa equazione può essere risolta in funzione di  $\Delta T_m$  introducendo

$$\Delta T_2 = (\Delta T_2/\Delta T_m) \Delta T_m = e \Delta T_m$$

ottenendo

$$\Delta T_m = (Q_s / \epsilon \rho_e C_{d1} A_{1eff})^{2/3} (T_{im} / 2 g H_{1u})^{1/3}$$

Eliminando  $\rho_e$ , introducendo  $Q_{se} = Q_s/\epsilon$ , e inserendo il valore delle costanti si ottiene:

$$\Delta T_m = 7,1 \cdot 10^{-5} T_{im} (Q_{se} / C_{d1} A_{1eff})^{2/3} (1 / H_{1u})^{1/3}$$

Utilizzando questa espressione si ottiene la velocità dell’aria, il tasso di ventilazione e le sezioni delle aperture in funzione della potenza termica  $Q_s$  e del fattore

di stratificazione e, come riportato nella tabella seguente.

### Campo di validità

Le formule riportate implicano una stratificazione lineare della temperatura e una velocità dell'aria uniforme attraverso le aperture.

Nella pratica la stratificazione può seguire diversi andamenti come visto in figura 1. Inoltre le velocità dell'aria attraverso aperture verticali saranno solo approssimativamente uniformi, assumendo andamento sempre più parabolico man mano che il piano neutro si avvicina a una delle aperture.

La situazione rappresentata dalle curve A, B e C può essere ben rappresentata dalle formule riportate.

	Formulae based on the mean temperature difference $\Delta T_m$	Formulae based on the modified surplus heat $Q_{st}$ ( $Q_{st}/\epsilon$ )
<b>Inlet conditions</b> pressure difference, $\Delta p_1$ (Pa)	$\rho_u \Delta T_m g H_1 / T_{im}$	
air velocity, $v_{c1}$ (m/s)	$\left[ \frac{2 \Delta T_m g H_1}{\psi_1 T_{im}} \right]^{1/2}$	$0.038 \left[ \frac{Q_{st} H_1}{C_{d1} A_1} \right]^{1/3} \left[ \frac{1}{\psi_1} \right]^{1/2}$
<b>Outlet conditions</b> pressure difference, $\Delta p_2$ (Pa)	$\rho_l \Delta T_m g H_2 / T_u$	
air velocity, $v_{c2}$ (m/s)	$\left[ \frac{2 \Delta T_m g H_2}{\psi_2 T_o} \right]^{1/2}$	$0.039 \left[ \frac{Q_{st} H_2}{C_{d2} A_2} \right]^{1/3} \left[ \frac{1}{\psi_2} \right]^{1/2}$
Temperature difference, $\Delta T_m$ (K or °C)		$7.3 \cdot 10^{-5} T_{im} \left[ \frac{Q_{st}}{C_{d1} A_1} \right]^{2/3} \left[ \frac{1}{H_1} \right]^{1/3}$
Ventilation rate, $V$ (m <sup>3</sup> /s)	$C_{d1} A_1 \left[ \frac{2 \Delta T_m g H_1}{T_{im}} \right]^{1/2}$	$0.038 (Q_{st} H_1)^{1/3} (C_{d1} A_1)^{2/3}$
Inlet area $A_1$ (m <sup>2</sup> ) 1)		$6.2 \cdot 10^{-7} \frac{Q_{st}}{C_{d1}} \left[ \frac{1}{H_1} \right]^{1/2} \left[ \frac{T_{im}}{\Delta T_m} \right]^{3/2}$
		$140 \frac{V^{3/2}}{(Q_{st} H_1)^{1/2} C_{d1}}$ 2)

Fig. 5

Le formule mantengono la loro validità anche nel caso della curva D sostituendo la altezza della apertura  $H$  con l'altezza  $H_D$  della regione ad alta temperatura e utilizzando la temperatura  $T_D$  come temperatura interna.

Le formule sono ancora valide nel caso della curva E sostituendo la altezza della apertura  $H$  con l'altezza  $H_E$  e assumendo una stratificazione della temperatura determinata dalla temperatura massima  $T_E$  e una temperatura all'ingresso pari alla temperatura esterna  $T_e$ .

### Considerazioni di progetto

Progettando un sistema di ventilazione naturale, un problema tipico è quello di determinare le aperture assicurandosi che non venga superata una certa differenza di temperatura tra interno ed esterno in una calda giornata estiva in assenza di vento.

Un primo passo consiste nel calcolare la posizione del piano neutro che implica la conoscenza del rapporto tra le aree  $A_1/A_2$ . Tale rapporto dovrà essere scelto in modo tale che la area totale delle aperture  $A_1 + A_2$  non sia più grande del necessario.

Una analisi teorica dimostra che, con una temperatura uniforme, il più elevato tasso di ventilazione è ottenibile quando l'area totale delle aperture è suddivisa in modo uguale tra ingresso e uscita. Lo studio dimostra che il tasso di ventilazione si riduce meno del 10% per una variazione del rapporto tra le aree compreso tra  $\frac{1}{2} < A_1/A_2 < 2/1$ .

Questo assunto può essere utilizzato anche quando viene considerata la stratificazione di temperatura, poiché il tasso di ventilazione dipende solo in lieve misura dalla stratificazione.

## **BIBLIOGRAFIA**

Brunelli, Codegone – Fisica tecnica – Volume II – Parte I – Termocinetica – Ed. V. Giorgio Torino – 1964

Annex 35 – Hybvent Forum '99 – Atti "First International One-day Forum on Natural and Hybrid Ventilation" – University of Sidney, Australia – 1999

Annex 35 – Hybvent Forum '00 – Atti "4th Expert Meeting on Natural and Hybrid Ventilation" – Athen, Greece – 2000

ASHRAE Handbook – Fundamentals – SI version – 1997

European Passive Solar Handbook – Commission of Directorate General XII for Science, Research and Development EEC, Brussels – 1986

Karl Terpager Andersen – Design of Natural Ventilation by Thermal Buoyancy with Temperature Stratification – Roomvent – Stockholm – 1998

COMIS 3.0 – User's Guide – Helmut E. Feustel, Brian V. Smith