

Gary S. Settles

## RIASSUNTO - ABSTRACT

### Visualizzazione in scala reale di flussi d'aria indotti dalla ventilazione

L'osservazione diretta in scala reale dei flussi d'aria indotti dai sistemi HVAC&R con la tecnica Schlieren si è rivelata realizzabile e utile. L'innovazione che lo permette è l'impiego di una griglia di grandi dimensioni e di una piccola lente, al posto delle strutture ottiche che finora avevano limitato l'area del campo visivo analizzabile con la tecnica schlieren. Gli studi sulla ventilazione in scala reale e sulla qualità dell'aria interna possono avvalersi quindi di un nuovo strumento, per la validazione dei risultati numerici, e per la diagnosi dei flussi d'aria generati da tutti i sistemi HVAC&R.

**Parole chiave:** Tecnica schlieren - Visualizzazione in scala reale - Ventilazione - IAQ - Sistemi HVAC&R - Flussi d'aria

### Visualizing Full-Scale Ventilation Airflows

*The direct observation of full-scale HVAC&R airflows by the schlieren technique has been shown to be feasible and useful. The innovation which permits this is the use of a large grid and a small lens in place of the optical elements which formerly limited the size of the schlieren field-of-view. Thus a new tool is now available for full scale ventilation and IAQ studies, validation of computational results, and the diagnosis of airflows created by all types of HVAC&R equipment.*

**Key words:** Schlieren technique - Full-scale visualization - Ventilation - IAQ - HVAC&R systems - Airflows

# IL SISTEMA SCHLIEREN

### Visualizzazione in scala reale di flussi d'aria indotti dalla ventilazione

La conoscenza dei percorsi seguiti dai flussi di aria è importante per quasi tutto che ciò che riguarda gli impianti di climatizzazione, detti anche, all'americana, "impianti HVAC". Tuttavia, poiché tali percorsi sono di solito invisibili, è difficile sapere come si comporta il flusso d'aria; quindi la possibilità di sbagliare è notevole. In molti studi non si fa alcun tentativo di visualizzare il flusso d'aria, ma si presentano solo schizzi in cui se ne traccia il comportamento ipotetico. In parte, questo è dovuto alla difficoltà tradizionale di visualizzare chiaramente le correnti d'aria. I metodi più tradizionali di visualizzazione consistono nel disperdere nell'aria particelle di elementi traccianti. Sono stati usati fumo, nebbie e bolle di sapone a galleggiamento neutro. Uno studio classico di que-

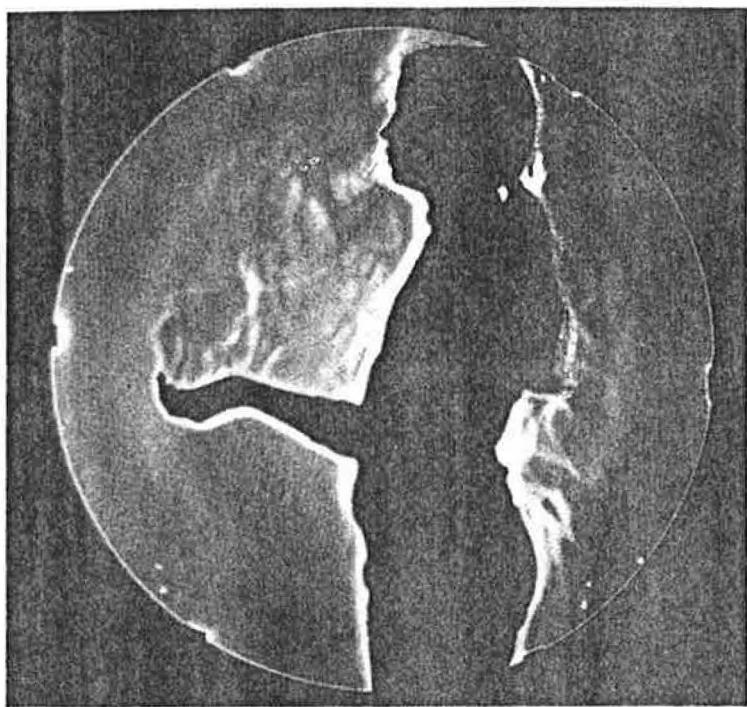


Figura 1 - Fotografia schlieren dello strato limite termico attorno ad una ragazza

sto tipo è stato fatto da Daws (1970). Sfortunatamente, molti dei fenomeni di flusso descritti da questo autore non si vedono chiaramente nelle sue fotografie. In particolare, le particelle traccianti non sono correlate alle differenze di temperatura del flusso e, in questo modo, quello che spesso si osserva dipende dal modo in cui le particelle sono introdotte.

## LA TECNICA OTTICA SCHLIEREN

Eppure, esiste un altro approccio focalizzato all'osservazione delle differenze di temperatura nel flusso d'aria. La visualizzazione ottica del flusso non richiede particelle traccianti, ma consiste nel passaggio di un fascio di luce attraverso il flusso e nell'esame delle distorsioni subite da questo fascio a causa delle variazioni dell'indice di rifrazione ottica dell'aria,

che dipende a sua volta linearmente dalle differenze di temperatura. Dei tanti possibili approcci, la procedura che qui viene descritta è nota come tecnica "schlieren", una parola tedesca che significa "strisce". Come mai questa tecnica non si usa già regolarmente negli studi sui flussi d'aria negli impianti HVAC? Il motivo tradizionale ha a che fare con un problema di scala. La tecnica schlieren normalmente richiede l'uso di una lente di precisione oppure di uno specchio della stessa grandezza del campo di moto sotto indagine, il che non è pratico per flussi di ventilazione in scala reale.

Per esempio, la figura 1 è una fotografia schlieren dell'aria calda che sale dal corpo di una ragazza, realizzata usando lo specchio parabolico di un telescopio di 1 m di diametro.

Anche se questo specchio è parte di uno dei più grandi apparati ottici convenzionali schlieren disponibili, esso è ovviamente da un lato ancora troppo piccolo per uno studio di ventilazione in scala reale, dall'altro di difficile trasportabilità.

Le tecniche schlieren applicate a modelli in scala hanno avuto un uso limitato a causa della difficoltà della modellazione e della precisione di riscalatura a situazioni reali. Per vedere flussi d'aria in scala reale, ci si dovrebbe far prestare lo specchio del telescopio dell'Osservatorio di Monte Palomar!

O, per lo meno, così sembrava fino a poco tempo fa, quando un nuovo approccio alla visualizzazione schlieren dei flussi d'aria in scala reale è diventato possibile.

Come è mostrato in figura 2, una parete di una grande camera è stata coperta con una griglia uniforme "sorgente" fatta di linee parallele nere e bianche.

Dall'altra parte della stanza, una lente forma una immagine di questa griglia su una lastra fotografica posta alla posizione di interdizione. Quando la lastra è esposta, sviluppata e rimessa esattamente nella sua posizione precedente, è l'esatta negativa dell'immagine della griglia "sorgente", con linee scure che si sovrappongono alle linee bianche della sorgente cosicché poca luce passa attraverso la griglia.

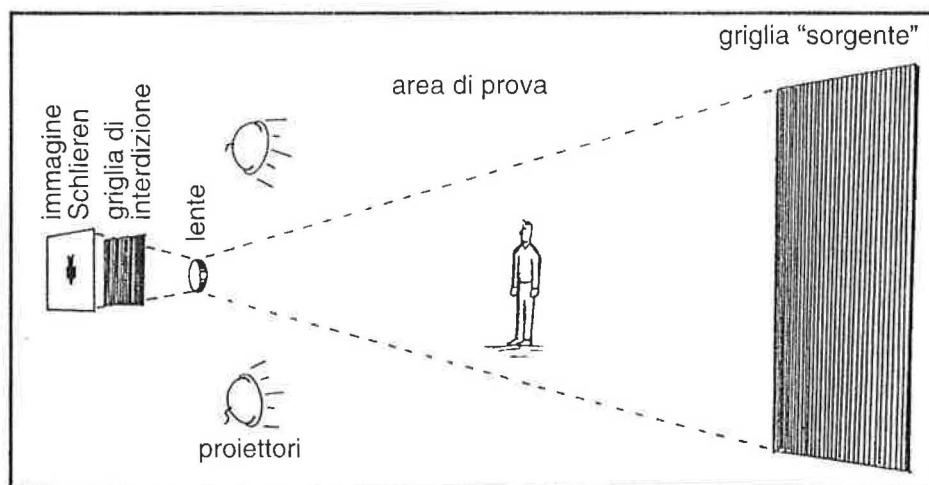


Figura 2 - Diagramma del sistema ottico schlieren

Se si scalda l'aria nell'area di prova, fra la lente e la griglia sorgente, alcuni raggi di luce saranno rifratti, ovvero deviati dai gradienti termici dell'aria. Non esiste più, ora, un'esatta corrispondenza tra la griglia di interdizione negativa e l'immagine della griglia "sorgente". Questo significa che alcuni dei raggi di luce riflessi dalle strisce bianche della sorgente modificano il loro percorso e quindi passano attraverso le strisce trasparenti della griglia di interdizione formando un'immagine schlieren dell'area di prova, che può essere osservata, fotografata o video-registrata in tempo reale. La luce che oltrepassa la griglia di interdizione è pertanto quella che ha attraversato le zone nell'area di prova ove vi sono differenze di temperatura.

Il vantaggio di questo approccio rispetto a quello che fa uso di uno specchio parabolico è ovvio, in quanto la griglia sorgente può essere molto grande e la lente invece di dimensione ridotta: l'area di prova può essere circa la metà della griglia "sorgente". Data una stanza di grandezza sufficiente, l'area di prova può essere quindi grande a piacere.

## SISTEMA OTTICO SCHLIEREN IN SCALA REALE

Seguendo questo principio si è costruito un sistema schlieren in un capannone. La sua griglia sorgente ha dimensioni 4,9x5,5 m ed è costituita da linee nere alternate di 5 mm serigrafate su materiale bianco retro-riflettente, come quello usato per le insegne stradali.

L'area di prova è 2,1x2,7 m. La griglia d'interdizione e l'immagine schlieren hanno dimensioni di circa 20x25 cm. Potenti proiettori sono stati usati per illuminare la griglia sorgente e il soggetto in esame per la fotografia o la videografia schlieren. In pratica, l'intero edificio, di 12x14 m, è stato convertito in una enorme macchina fotografica finalizzata a questo scopo. La visualizzazione in scala reale dei flussi HVAC era una delle principali giustificazioni per la realizzazione di questo apparato che è sicuramente il più grande sistema ottico schlieren del mondo.

L'uso principale di questo sistema è la visualizzazione qualitativa del campo di moto dell'aria. Anche se qualche volta viene confusa con la termografia a raggi infrarossi, la tecnica schlieren è in realtà del tutto differente. In genere non può dare distribuzioni quantitative di temperatura dell'aria, anche se è tipicamente sensibile a gradienti di temperatura dell'ordine di 1 °C/cm. Tuttavia, le videoregistrazioni schlieren possono essere usate, in alcuni casi, per misurare la velocità dell'aria usando un approccio conosciuto come velocimetria a correlazione d'immagine (Tokumaru & Dimotakis, 1993). Ciò è possibile perché le correnti d'aria tipiche della ventilazione compiono un breve tratto nell'intervallo di 1/30 di secondo fra due

successive immagini video, cosicché le posizioni delle singole strutture urbolente nel moto possono essere seguite nel tempo e le loro velocità possono essere calcolate. Con questo sistema si potrebbero anche ottenere informazioni sull'intensità della turbolenza del flusso, ma questa possibilità è ancora allo studio.

## RISULTATI PRELIMINARI

Questo nuovo strumento è operativo da circa due anni soltanto. Di seguito vengono forniti alcuni risultati preliminari per illustrare quanto si è già appreso finora.

### Ventilazione di una cucina industriale

Una cucina industriale con fornello a gas e un aspiratore a cappa con ventilazione frontale sono stati introdotti nell'area di prova del sistema schlieren in scala reale per studiare i flussi d'aria associati all'importante problema della ventilazione delle cucine. La figura 3 è una delle fotografie fatte con il sistema schlieren durante lo studio, nella quale le correnti urbolente d'aria si vedono in rilievo, come se fossero illuminate obliquamente da destra. Un grosso pennacchio di prodotti di combustione sale da una fessura dietro al fornello direttamente verso la cappa dell'aspiratore. Il trascinamento turbolento prodotto da questo pennacchio attrae verso la cappa i vapori di cottura del cibo. Mentre la figura 3 rivela un eccesso di aria estratta attraverso la cappa, altre foto con



Figura 3 - Un piano di cottura di una cucina ad uso industriale e un aspiratore a cappa in uso, con vapori di cottura visibili tramite la tecnica schlieren

cappe aventi una estrazione insufficiente rivelano una visibile migrazione di una porzione dei fumi di cottura sotto il bordo frontale della cappa. La tecnica schlieren in scala reale consente dunque di osservare visualmente l'importante aspetto della cattura e contenimento dei fumi.

L'esperimento ha anche dimostrato la grande differenza nei campi di moto fra le cucine a gas e le cucine elettriche, in cui non esiste la colonna dominante dei gas combusti. Un'altra osservazione sorprendente è stata fatta quando si è introdotta l'aria trattata attraverso l'apertura frontale della cappa: il trascinamento dovuto alla corrente d'aria trattata provoca la fuoriuscita dei fumi di cucina al disotto del bordo della cappa. Difetti di progettazione di questo tipo sono chiaramente rivelati nella visualizzazione schlieren in scala reale.

#### Campo di moto in una stanza

In figura 4 sono mostrati i risultati ottenuti realizzando una tipica scena domestica nell'area di prova del sistema schlieren. Una persona seduta sta leggendo un giornale mentre si riscalda mediante una piccola stufa elettrica (1 kW) posta nell'angolo inferiore a sinistra della foto. Pennacchi galleggianti come questi sono stati riprodotti graficamente in tante pubblicazioni riguardanti gli impianti HVAC, ma pochi sono stati effettivamente visualizzati. Non c'è dubbio che questi moti di aria interna sono pienamente turbolenti. La transizione alla turbolenza può anche essere vista nel debole pennacchio termico originato dalla lampada elettrica. La figura 4 mostra come sia possibile effettuare, usando la tecnica schlieren, molti studi utili per la ventilazione dell'aria interna e per la distribuzione dell'aria. Si potrebbero realizzare studi sugli effetti di trascinamento, la stratificazione, i moti ricircolanti, i getti da parete, la progettazione di finestre per l'eliminazione degli spifferi e il risparmio energetico.

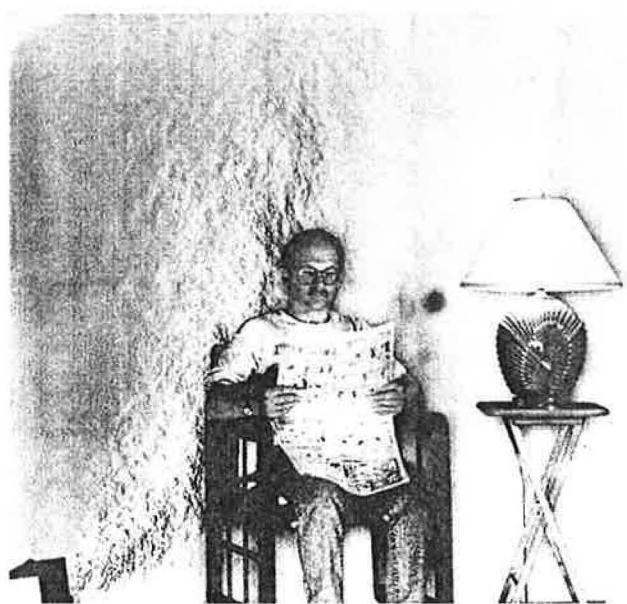


Figura 4 - Fotografia schlieren in scala reale di una stanza in una casa con una persona, una lampada e una stufa elettrica

#### Il corpo umano e la IAQ (Qualità dell'aria Interna)

Ritornando alla figura 1, lo strato limite termico che circonda il corpo umano (qui in giallo e bianco), molto difficile da vedere con le particelle traccianti, si vede invece chiaramente nelle immagini schlieren. Si vedono perfino l'espirazione dal naso e la convezione naturale sulla mano. Uno studio schlieren dei flussi d'aria attorno al corpo umano mostra che questi moti sono in tutta evidenza causati dalle forze di galleggiamento. Inoltre, il particolato umano sospeso nell'aria, consistente in milioni di scaglie epiteliali microscopiche, migra verticalmente lungo il corpo di una persona in piedi, dalle caviglie alla testa, in pochi secondi. In alcuni studi di IAQ, questo effetto è stato invece erroneamente descritto come una "amorfa nuvola di aria e di particelle che si muove in modo casuale attorno alla persona".

Comprendere la vera natura del pennacchio termico umano, come rivelato dall'immagine schlieren, è importante per i ricercatori IAQ. Non solo tutti i bioeffluenti umani sono trasportati in questo modo, ma anche le differenze spesso osservate fra i dati misurati da analizzatori di particelle fissi e portatili possono essere spiegate, almeno in parte, con il trasporto diretto di particelle dal pavimento alla "breathing zone" (ovvero, la zona in cui è ubicata la testa degli occupanti), dentro lo strato limite termico circondante il corpo umano.

Le immagini schlieren, inoltre, rivelano che le persone che camminano trascinano di sé colonne di aria calda contaminata, una specie di "scia termica umana". Un'ultima lezione da queste osservazioni schlieren è che non si dovrebbe mai usare un manichino freddo per rappresentare un vero corpo umano negli studi sui moti dell'aria.

#### ALTRÉ APPLICAZIONI PER GLI IMPIANTI HVAC&R

Oltre agli esempi appena mostrati, vengono in mente tante altre applicazioni della tecnica schlieren per gli impianti HVAC e di refrigerazione. Per esempio, la visualizzazione diretta dei flussi d'aria può rivestire un interesse particolare per lo studio delle cappe da laboratorio.

Usando l'attuale apparato in scala reale può anche essere studiata l'interazione fra articoli congelati e l'aria circostante (fig. 5).

Si possono osservare in scala reale le lame d'aria, il loro trascinamento dell'aria circostante e la loro suscettibilità alla deformazione dovuta a correnti d'aria esterne (fig. 6). La progettazione della ventilazione ospedaliera, in cui si presentano problemi speciali, come i vortici causati dalle grandi luci sospese, potrebbe avvantaggiarsi delle tecniche schlieren.

Problemi similari di ventilazione nelle camere bian-

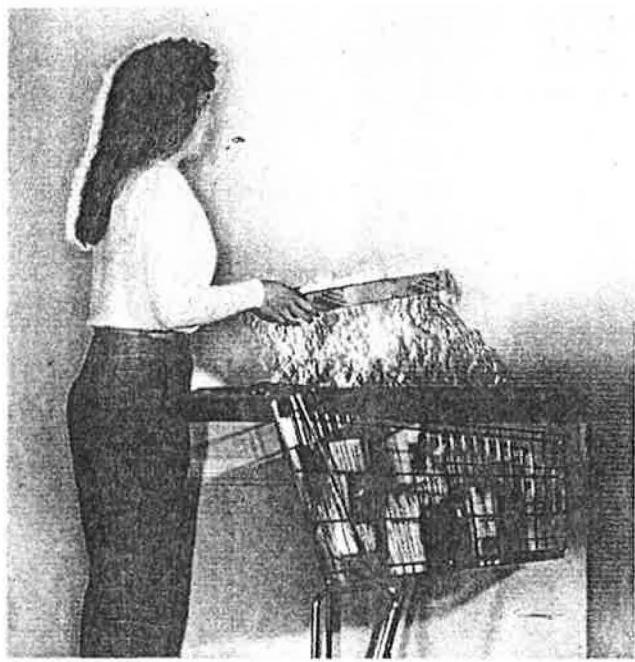


Figura 5 - Fotografia schlieren in scala reale di un cliente che rimuove una pizza surgelata da un banco frigorifero, in un supermercato



Figura 6 - Fotografia schlieren in scala reale di una lama di aria che produce un getto turbolento piano di aria riscaldata

che sono già stati studiati usando un sistema schlieren convenzionale. (Settles & Via, 1986). Si possono visualizzare in questo modo in scala reale impianti HVAC e di refrigerazione di tutte le dimensioni, e le loro interazioni termiche con l'aria circostante.

#### La tecnica schlieren come strumento di apprendimento

Si può imparare tanto sul comportamento dei flussi d'aria negli impianti HVAC&R da foto schlieren come quelle qui mostrate. L'impiego di queste illustrazioni, per esempio, in libri di testo oppure nei manuali dell'ASHRAE potrebbe aggiungere molto agli schemi del campo di moto attualmente usati. Ancora di più si può imparare dalla videoregistrazione di

immagini schlieren, ove si possono osservare i campi di moto nei minimi dettagli. Si potrebbe, per esempio, realizzare una videocassetta dimostrativa con la visualizzazione schlieren di tipici campi di moto indotti da impianti HVAC&R, come un nuovo strumento di apprendimento. Poiché pochi di noi hanno veramente visto questi flussi, la visualizzazione può essere utile sia al professionista che allo studente.

#### Validazione dei codici numerici di fluidodinamica

La capacità di simulare campi di moto dell'aria complessi usando il computer diventa rapidamente sempre più importante in questo settore. Tuttavia, poiché i flussi d'aria indotti dai impianti HVAC&R sono prevalentemente turbolenti e la fisica della turbolenza è ancora in buona parte sconosciuta, questi calcoli risultano approssimativi.

La validazione sperimentale è perciò una preoccupazione ricorrente. La validazione locale, attraverso la misura in alcuni punti con una sonda di velocità, può risultare fuorviante. Con la tecnica schlieren si può ora realizzare una validazione globale, in termini di verosimiglianza dell'intero campo di moto calcolato, attraverso il confronto diretto con i flussi d'aria visualizzati in scala reale.

Particolarmente utili a tale proposito potrebbero risultare i dati di velocità dell'aria ottenuti da questo tipo di visualizzazione, come descritto prima.

#### Possibilità di impiego in campo della tecnica schlieren

L'apparato descritto occupa un intero edificio e non è quindi portatile. Tuttavia, ci sono ovviamente molte applicazioni in cui un sistema portatile sarebbe utile. Occorrerebbe rendere la griglia "sorgente" portatile (per esempio, pieghevole) e integrare gli altri componenti ottici in una forma compatta. Mentre è improbabile che un sistema delle dimensioni di quello visto qui (ovvero, con un'area di prova di 2,1x2,7 m) possa diventare portatile, è in esame lo studio di altri sistemi portatili. Un prototipo è già stato assemblato e si stanno studiando delle semplificazioni per ovviare alla scarsa precisione di una grande griglia portatile e alla necessità di un preciso allineamento.

#### APPLICAZIONI ATTINENTI

Una applicazione collegata a quelle viste in precedenza potrebbe consistere nel posizionamento di un'automobile nell'area di prova di un sistema schlieren in scala reale.

Si potrebbero studiare in tal modo il campo di moto dell'aria e lo scambio termico convettivo sia all'esterno che all'interno delle automobili. Si potrebbero rendere chiaramente visibili i vapori prodotti dal riempimento del serbatoio di benzina, poiché hanno un indice di rifrazione più alto dell'aria.

Questo, a sua volta, suggerisce applicazioni nella rilevazione di perdite di gas, una problematica di importanza vitale nell'industria chimica e del gas naturale. I sistemi attuali si basano sull'assorbimento ottico oppure su pannelli di "annusatori", e tendono ad essere piuttosto costosi. Un apparato portatile schlieren del tipo descritto prima appare realizzabile con notevoli vantaggi in termini di costo e versatilità impiego.

Per ultimo, gli studi sulla sicurezza antincendio sono tradizionalmente condotti in scala reale poiché la combinazione di flussi d'aria, scambio termico e fenomeni di combustione è non lineare e quindi tali fenomeni non possono essere ridotti in scala. Questa potrebbe essere un'altra area dove la visualizzazione schlieren in scala reale potrebbe essere utile.

## CONCLUSIONI

In sintesi, l'osservazione diretta in scala reale dei flussi d'aria indotti dai sistemi HVAC&R con la tecnica schlieren si è dimostrata praticabile ed efficace.

L'innovazione che ha reso questa tecnica utilizzabile è consistita nell'uso di una griglia grande e di una piccola lente al posto di apparati ottici che in un primo tempo limitavano le dimensioni del campo di azione delle tecniche schlieren. Pertanto, un nuovo strumento in scala

reale è ora disponibile per gli studi sulla ventilazione e sulla IAQ, per la validazione dei codici di calcolo numerici, e la visualizzazione dei campi di moto dell'aria creati da tutti i tipi di impianti HVAC&R.

### Ringraziamenti

L'autore ringrazia per l'assistenza il Dr. Leonard M. Weinstein, Lori J. Dodson e J. D. Miller.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Daws, L. F., "Movement of Airstreams Indoors," *J. Inst. Heating & Ventilation Engrs.*, 37, pagine: 241-253, 1970.
- [2] Settles, G. S., Hackett, E. B., Miller, J. D., e Weinstein, L. M., "Full-Scale Schlieren Flow Visualization," in *Flow Visualization VII*, ed. J. P. Crowder, Begell House, New York, pagine: 2-13, Settembre 1995.
- [3] Settles, G. S., e Via, G., "A Portable Schlieren Optical System for Clean Room Applications," *The Journal of Environmental Sciences*, 30, 5 pagine: 17-21, Settembre 1986.
- [4] Tokumaru, P. T., e Dimotakis, P. E., "Image Correlation Velocimetry," *Experiments in Fluids*, 19, pagine: 1-15, 1995.
- [5] Weinstein, L. M., "Large-Field High-Brightness Focusing Schlieren System," *J. Amer. Inst. of Aeronautics and Astronautics*, 31, pagine: 1250-1255, Giuglio 1993.

Gary S. Settles, Ph D., Professore di Ingegneria Meccanica alla Penn State University

Articolo tratto da ASHRAE Journal, July 1997

Titolo originale: "Visualizing Full-Scale Ventilation Airflows"

*Call for Papers*

## "La climatizzazione ambientale ed il rumore: aspetti tecnologici, legislativi e normativi"

Padova, 10 giugno 1999

Come è noto, tra le varie attività culturali dell'AICARR figura l'organizzazione di due convegni con cadenza annuale, uno a Padova nel mese di giugno e uno a Bologna nel mese di ottobre.

Per entrambi i convegni, i temi prescelti riguardano spesso argomenti che, oltre ad essere di grande attualità per gli operatori del settore termotecnico, interessano anche altri soggetti coinvolti nel processo di progettazione, realizzazione ed esercizio degli impianti di climatizzazione ambientale, costituendo così un'operazione di confronto e di costruttivo dibattito.

Proprio in tale ottica, per il convegno che avrà luogo a Padova il 10 giugno 1999, il Comitato Tecnico Scientifico ha individuato il tema "La climatizzazione ambientale ed il rumore: aspetti legislativi e normativi": infatti, anche a seguito di una recente serie di discussi provvedimenti legislativi, questo argomento è oggi al centro dell'attenzione non soltanto di progettisti e produttori di componenti, chiamati ad affrontare numerosi problemi tecnici di non facile soluzione, ma anche di amministratori locali, di giuristi e di magistrati, data la frequenza con cui i problemi acustici danno origine a contenziosi.

Su questi argomenti porteranno il loro contributo alcuni relatori ad invito che inquadreranno i diversi aspetti del problema, ma sono altresì chiamati ad intervenire con relazioni libere anche tutti coloro che intendono divulgare i propri studi, le proprie esperienze e le diverse soluzioni adottate.

Gli interessati alla presentazione di relazioni libere sono pertanto invitati ad inviare titolo e riassunto (200 parole) dei loro contributi alla Segreteria dell'AICARR, via Monte Grappa 2, 20124 Milano (tel. 02/29002369 - fax 02/29000004, e-mail: [segreteria-aicarr@aicarr.it](mailto:segreteria-aicarr@aicarr.it)) entro il 15 febbraio 1999. L'accettazione delle memorie verrà comunicata entro il giorno 1 marzo 1999 ed il testo completo di quelle accettate (redatto secondo le norme che verranno comunicate) dovrà pervenire alla Segreteria stessa tassativamente entro il 30 aprile 1999; dopo tale data le relazioni non saranno più accettate né pubblicate sugli Atti del Convegno.