

## **Titoli pubblicati**

### **1. Il condizionamento dell'aria**

Problematiche tecniche e ambientali  
a cura di Renato Lazzarin

### **2. Celle a combustibile**

Tecnologia e possibilità applicative  
Marco Noro

### **3. Prontuario dei termini per il condizionamento dell'aria**

Scienza – Applicazioni – Tecnologia  
Carmine Casale

### **4. Ventilazione e dislocamento**

Le nuove frontiere della climatizzazione  
AA.VV.

### **5. La rivoluzione elettrica**

Cosa è cambiato nella produzione, distribuzione  
e nella vendita dell'energia elettrica in Italia  
a cura di Renato Lazzarin

### **6. Guida alle travi fredde**

Funzionamento, progetto e applicazioni  
AA.VV.

### **7. Clima interno e produttività negli uffici**

Come integrare la produttività nell'analisi  
del costo del ciclo di vita degli edifici  
AA.VV.

### **8. Raffrescamento e riscaldamento mediante superfici radianti**

Nuove soluzioni per il riscaldamento a bassa temperatura  
e il raffrescamento ad alta temperatura  
AA.VV.



# FLUIDODINAMICA COMPUTAZIONALE

APPLICATA ALLA PROGETTAZIONE DELLA VENTILAZIONE

di

Peter V. Nielsen (curatore)

Francis Allard – Hazim B. Awbi – Lars Davidson – Alois Schälin

Traduzione di Stefano Schiavon e Giacomo Villi

**INDICE**

|   |      |    |
|---|------|----|
| <i>Prefazione</i> .....   | pag. | 9  |
| 1. FLUIDODINAMICA COMPUTAZIONALE: UNA SINTESI .....   | »    | 11 |
| 2. SIMBOLI E GLOSSARIO .....  | »    | 15 |
| 3. FORMULAZIONE MATEMATICA DI BASE  |      |    |
| 3.1. Introduzione .....   | »    | 21 |
| 3.2. Equazioni di avvezione-diffusione .....  | »    | 21 |
| 3.3. Media temporale delle equazioni istantanee del flusso .....                                | »    | 23 |
| 3.3.1. Applicazione della decomposizione di Reynolds alle equazioni istantanee del flusso ..... | »    | 23 |
| 3.3.2. Concetto di viscosità turbolenta .....   | »    | 27 |
| 3.4. Bibliografia consigliata .....   | »    | 28 |
| 4. MODELLI DI TURBOLENZA  |      |    |
| 4.1. Introduzione .....   | »    | 29 |
| 4.2. Il flusso laminare.....  | »    | 29 |
| 4.3. Il flusso turbolento .....   | »    | 31 |
| 4.4. Modelli di turbolenza .....  | »    | 33 |
| 4.4.1. Modelli basati sulla viscosità turbolenta.....   | »    | 33 |
| 4.4.2. Il modello SST .....   | »    | 35 |
| 4.4.3. Modelli basati sugli sforzi di Reynolds .....  | »    | 35 |
| 4.4.4. Tecnica di simulazione LES .....   | »    | 36 |
| 4.4.5. Commenti conclusivi .....  | »    | 37 |
| 5. METODI NUMERICI .....  | »    | 39 |
| 5.1. Introduzione .....   | »    | 39 |
| 5.2. Caso monodimensionale .....  | »    | 39 |
| 5.2.1. Formulazione ai volumi finiti .....  | »    | 40 |
| 5.2.2. Formulazione alle differenze finite .....  | »    | 41 |
| 5.2.3. Soluzione dell'equazione del trasporto.....  | »    | 42 |
| 5.3. Diffusione apparente .....   | »    | 44 |
| 5.4. Griglia .....  | »    | 48 |
| 5.5. Processo iterativo .....   | »    | 51 |
| 6. CONDIZIONI AL CONTORNO   |      |    |
| 6.1. Introduzione .....   | »    | 55 |
| 6.2. Superfici (pareti) che contornano il dominio .....   | »    | 55 |
| 6.2.1. Condizioni al contorno per la quantità di moto .....                                     | »    | 56 |
| 6.2.2. Condizioni al contorno per la trasmissione del calore .....                              | »    | 58 |
| 6.2.3. Condizioni al contorno per le emissioni dalle superfici .....                            | »    | 59 |
| 6.3. Superficie libera .....  | »    | 60 |
| 6.4. Piano di simmetria .....   | »    | 60 |
| 6.5. Ingressi d'aria .....  | »    | 61 |
| 6.6. Riprese dell'aria .....  | »    | 65 |
| 6.7. Ostruzioni del campo di moto.....  | »    | 66 |
| 7. CONTROLLO DELLA QUALITÀ  |      |    |
| 7.1. Introduzione .....   | »    | 67 |
| 7.2. Passi in una simulazione CFD .....   | »    | 67 |
| 7.3. Sorgenti di errori e di incertezze in una simulazione CFD .....                            | »    | 68 |
| 7.4. Garantire la qualità .....   | »    | 70 |
| 7.4.1. Definizione del problema .....   | »    | 70 |
| 7.4.2. Griglia di calcolo .....   | »    | 76 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 7.4.3. Modellazione .....   | » | 82  |
| 7.4.4. Condizioni al contorno .....   | » | 84  |
| 7.4.5. Errori numerici .....  | » | 86  |
| 7.4.6. Errori del codice .....  | » | 89  |
| 7.4.7. Errori degli utenti .....  | » | 89  |
| 7.5. Domande al tecnico.....  | » | 89  |
| 7.6. Ulteriori consigli .....   | » | 92  |
| 7.7. Commenti conclusivi .....  | » | 93  |
| <b>8. CFD COMBINATA AD ALTRI STRUMENTI DI SIMULAZIONE</b>   |   |     |
| 8.1. Introduzione .....   | » | 95  |
| 8.2. Interazioni possibili.....   | » | 95  |
| 8.3. Interazioni di interesse per lo studio della ventilazione .....  | » | 98  |
| 8.4. Vantaggi e svantaggi .....   | » | 99  |
| 8.5. Esempi.....  | » | 101 |
| 8.5.1. Interazione tra CFD e un programma aeraulico multizona .....   | » | 101 |
| 8.5.2. Portata d'aria e temperatura in una facciata a doppia pelle .....  | » | 103 |
| 8.5.3. Interazione reciproca completa tra simulazione termica e CFD di un atrio.....                                    | » | 105 |
| <b>9. APPLICAZIONE DEI CODICI CFD ALLA PROGETTAZIONE DEGLI EDIFICI</b>  |   |     |
| 9.1. Introduzione .....   | » | 109 |
| 9.2. Applicazioni CFD .....   | » | 110 |
| 9.3. Utilizzo della CFD nella progettazione .....   | » | 111 |
| 9.3.1. Progettazione di massima .....   | » | 111 |
| 9.3.2. Progettazione preliminare .....  | » | 112 |
| 9.3.3. Progettazione esecutiva.....   | » | 112 |
| 9.4. Procedura di modellazione CFD.....   | » | 114 |
| 9.4.1. Distribuzione dell'aria nella stanza.....  | » | 115 |
| 9.4.2. Analisi del comfort .....  | » | 115 |
| 9.4.3. Qualità dell'aria interna ed efficienza della ventilazione .....   | » | 116 |
| 9.4.4. Età media dell'aria .....  | » | 117 |
| 9.4.5. Propagazione dell'incendio e del fumo .....  | » | 117 |
| 9.5. Codici CFD, utilizzo e risorse necessarie .....  | » | 119 |
| 9.5.1. Codici commerciali .....   | » | 119 |
| 9.5.2. Utilizzo dei codici .....  | » | 119 |
| 9.5.3. Risorse necessarie .....   | » | 120 |
| <b>10. CASI DI STUDIO</b>   |   |     |
| 10.1. Introduzione .....  | » | 123 |
| 10.2. Il padiglione danese .....  | » | 123 |
| 10.3. Progettazione della distribuzione dell'aria in un ufficio.....  | » | 125 |
| 10.3.1. Ventilazione a miscelazione con diffusore montato sulla parete .....  | » | 126 |
| 10.3.2. Ventilazione verticale .....  | » | 128 |
| 10.3.3. Ventilazione a dislocamento .....   | » | 130 |
| 10.3.4. Ventilazione a miscelazione generata da un diffusore radiale montato a soffitto .....                           | » | 132 |
| 10.4. Simulazione diretta di un diffusore d'immissione e della distribuzione dell'aria nella stanza .....               | » | 134 |
| 10.5. Valutazione della distribuzione dell'aria nella hall di una biblioteca.....                                       | » | 139 |
| <b>11. BENCHMARK TEST</b>   |   |     |
| 11.1. Introduzione .....  | » | 145 |
| 11.2. Moto bidimensionale in una stanza con diffusore di mandata lineare e sistema di ventilazione a miscelazione ..... | » | 145 |
| 11.3. Moto tridimensionale attorno ad una persona per ventilazione a miscelazione e a dislocamento .....                | » | 146 |
| <b>APPENDICE</b> .....  | » | 149 |

## **REHVA**

### **Federation of European Heating and Air-Conditioning Associations**

REHVA, nata quasi cinquant'anni fa, è un'organizzazione di professionisti europei che operano nell'ambito dei *building services* (riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria). REHVA rappresenta più di 100.000 esperti di trenta paesi europei.

La principale attività di REHVA è lo sviluppo e la diffusione di tecnologie da impiegare nei *building services* che siano economicamente vantaggiose, energeticamente efficienti e che consentano un ambiente interno salubre. Il lavoro è supervisionato dal comitato dei direttori. I progetti REHVA riguardanti le guide REHVA sono coordinati dal comitato tecnico REHVA.

Numerosi gruppi di lavoro sono attualmente attivi per la stesura di guide REHVA, tra questi, a titolo di esempio, quello sulle prestazioni e sull'efficienza energetica delle torri evaporative, quello sul controllo della legionella, quello sul clima interno nei musei, quello sul clima interno nelle scuole e quello sui nuovi sistemi di distribuzione dell'aria.

Questa guida sull'impiego della fluidodinamica computazionale nello studio della ventilazione è stata scritta da un gruppo di lavoro formato da esperti internazionali di elevato profilo provenienti dal mondo della ricerca, della consulenza e della progettazione. Le simulazioni CFD sono divenute rapidamente uno strumento potente per l'analisi della distribuzione dell'aria e degli inquinanti in diversi ambienti. È importante che gli utilizzatori delle simulazioni CFD siano consapevoli dei principi base della CFD e in modo particolare delle condizioni al contorno. L'affidabilità dei risultati dipende in larga misura dalle capacità della persona che svolge la simulazione. Questa guida è rivolta agli utilizzatori dei software CFD, ai progettisti, alle aziende costruttrici e ai proprietari degli edifici. Inoltre, questa guida fornisce linee guida a coloro che hanno richiesto a degli esperti delle simulazioni CFD. Essa, grazie alle figure e agli esempi presenti, è anche un ottimo libro di testo per le università e per i corsi per professionisti del settore.

Il comitato della REHVA desidera esprimere la sua sincera gratitudine al gruppo di lavoro per il suo inestimabile contributo. REHVA vuole inoltre ringraziare le associazioni e le aziende che hanno finanziato questo lavoro.

**Olli Seppänen**

Presidente REHVA

## Stati membri REHVA

|                     |             |                     |
|---------------------|-------------|---------------------|
| Belgio              | Grecia      | Romania             |
| Bosnia e Erzegovina | Ungheria    | Russia              |
| Bulgaria            | Irlanda     | Serbia e Montenegro |
| Croazia             | Italia      | Slovacchia          |
| Repubblica Ceca     | Lettonia    | Slovenia            |
| Danimarca           | Lituania    | Spagna              |
| Estonia             | Paesi Bassi | Svezia              |
| Finlandia           | Norvegia    | Svizzera            |
| Francia             | Polonia     | Turchia             |
| Germania            | Portogallo  | Regno Unito         |

## Gruppo di lavoro

Questo libro è il frutto di numerose discussioni avvenute nel periodo compreso tra il novembre 2003 e l'agosto 2007, mese della stampa, in seno ad un gruppo di lavoro composto dai seguenti esperti:

- Peter V. Nielsen, Professore, Aalborg University, Danimarca
- Francis Allard, Professore, Université de la Rochelle, Francia
- Hazim B. Awbi, Professore, University of Reading, Regno Unito
- Lars Davidson, Professore, Chalmers University of Technology, Svezia
- Alois Schälin, AFC Air Flow Consulting, Switzerland

## Revisori

Le persone che seguono hanno corretto il libro e fornito validi suggerimenti per dei miglioramenti:

- Derrick Braham, Regno Unito
- Martin Eimermann, Smits van Burgst Consulting Engineers, Paesi Bassi
- Jorma Heikkinen, VTT Technical Research Centre of Finland, Finlandia
- Hannu Koskela, Finnish Institute of Occupational Health, Turku, Finlandia
- Koos Mast, Smits van Burgst Consulting Engineers, Paesi Bassi

## *Prefazione*

Il nuovo libro della serie REHVA *guide book* (guide REHVA) è intitolato *Fluidodinamica computazionale applicata alla progettazione dell'impianto di ventilazione*. L'obiettivo della guida è quello di fornire ai progettisti europei un libro sulla fluidodinamica computazionale completo e semplice da capire. Questo progetto è stato ideato dalla commissione tecnica della REHVA.

La guida è stata scritta per le persone che devono usare e valutare i risultati ottenuti con un codice CFD. Inoltre, fornisce una rapida introduzione alla materia a persone che non lavorano comunemente con la CFD. Oggigiorno, viene eseguito un elevato numero di simulazioni CFD ed è spesso difficile giudicare il livello della qualità dei risultati.

La guida presenta delle regole per ottenere una buona simulazione, spiega i principi su cui si basa questo metodo numerico e discute alcuni temi speciali riguardanti la ventilazione.

Si spera che ciò possa far crescere la qualità tecnica delle simulazioni CFD.

Aalborg, agosto 2007

**Peter V. Nielsen, curatore**

## 1

# Fluidodinamica computazionale: una sintesi

Questa guida presenta un metodo di analisi basato sull'impiego del computer che può predire il movimento dell'aria, la distribuzione delle temperature e dei contaminanti, oltre a molti altri parametri della distribuzione dell'aria in una stanza. Il metodo è chiamato CFD (*Computational Fluid Dynamics*, cioè fluidodinamica computazionale). Il libro ha l'obiettivo di rendere familiare il lettore con alcuni dei principi e delle abbreviazioni fondamentali che sono necessari per l'applicazione della CFD all'ambiente interno. Alcune conoscenze di base sono presentate in modo da poter rendere possibile al lettore discutere in modo dettagliato dei software commerciali, leggere articoli tecnici sulla CFD e utilizzare la CFD nella progettazione.

L'incremento della capacità di calcolo dei computer avvenuta negli ultimi decenni ha fortemente influenzato lo sviluppo sia dei modelli CFD per lo studio del moto dell'aria all'interno di un ambiente confinato che della ricerca sulla fluidodinamica in generale. Questa tendenza è rappresentata nella figura 1.1, che mostra l'incremento della velocità di calcolo negli ultimi tre decenni.

All'incremento della velocità computazionale è corrisposta una diminuzione dei costi, ridottisi di un decimo ogni otto anni. Chapman (1979) cita un esempio impressionante di questa tendenza nell'efficienza computazionale. Egli sostiene che la soluzione numerica del flusso attorno ad un profilo alare nel 1960 avrebbe richiesto un tempo pari a 30 anni e un costo pari a 10 milioni di dollari. Se lo stesso calcolo fosse stato fatto nel 1980 avrebbe richiesto circa mezz'ora e sarebbe costato mille dollari. Oggi sarebbe lavoro di poca cosa.

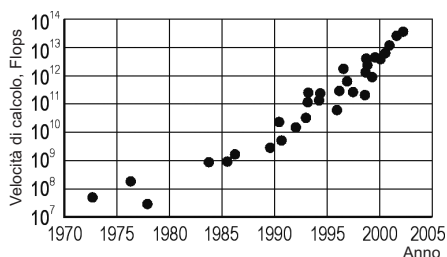


Figura 1.1  
Sviluppo della capacità computazionale  
in funzione dell'anno di introduzione  
(Kunugiyama, 2002)



Ci sono molte ragioni per questo sviluppo. Prima di tutto, la velocità di calcolo dei computer cresce più rapidamente del loro costo, e questa tendenza sembra che si manterrà anche in futuro. In secondo luogo, è aumentata la flessibilità dei software sia nella fase di impostazione del problema (pre-processo) che nella fase di analisi dei risultati (post-processo) e, inoltre, si assiste a un continuo sviluppo di nuovi software. All'incremento della velocità di esecuzione di una simulazione hanno contribuito i miglioramenti nei processi di calcolo fondamentali, quali, ad esempio, la generazione della griglia e i metodi numerici utilizzati.

I primi studi CFD del movimento dell'aria in una stanza sono stati eseguiti negli anni Settanta. Nielsen (1973) ha mostrato un prima simulazione CFD del moto dell'aria in una stanza ventilata, mentre negli anni Novanta Jones e Whittle (1992) hanno discusso lo stato dell'arte e le capacità delle simulazioni CFD. Russel e Surendran (2000) hanno successivamente esaminato i lavori più recenti sull'argomento.

Il calcolo del flusso d'aria è basato sulle soluzioni delle equazioni fondamentali del flusso. Queste equazioni sono l'equazione di continuità, le tre equazioni della quantità di moto (una per ogni coordinata), l'equazione dell'energia e, a volte, l'equazione di trasporto per la distribuzione degli inquinanti.

In questo libro tutte le equazioni sono mediate nel tempo e la turbolenza locale è spesso espressa con un coefficiente di diffusione variabile chiamato *viscosità turbolenta*. Usualmente questa viscosità è ottenuta da altre due equazioni di trasporto chiamate *equazione per l'energia cinetica della turbolenza* ed *equazione per la dissipazione dell'energia cinetica della turbolenza*.

La descrizione globale del flusso consiste in otto equazioni differenziali che sono accoppiate (devono, cioè essere risolte contemporaneamente) e non lineari. Poiché non è possibile risolvere queste equazioni differenziali direttamente data

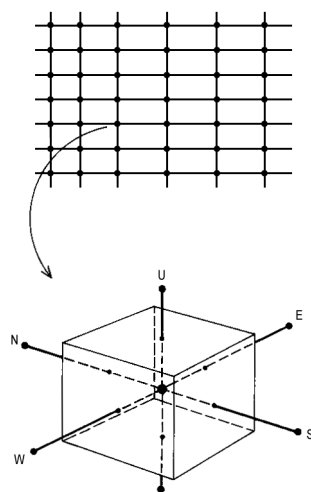


Figura 1.2  
La distribuzione dei punti della griglia  
e il volume di controllo attorno al nodo P

la natura del moto, viene quindi applicato un metodo numerico. È necessario dividere la stanza in celle, come in figura 1.2. Come mostrato nel disegno inferiore della figura, le equazioni differenziali devono essere discretizzate e scritte in corrispondenza ad ogni punto della griglia.

Supponiamo di dividere la stanza in  $90 \cdot 90 \cdot 90$  celle. Le otto equazioni differenziali sono sostituite in ogni nodo da otto equazioni alle differenze, ciò significa che vengono create 5,8 milioni di equazioni cui corrispondono altrettante variabili. Nella soluzione numerica è utilizzata una procedura iterativa che usualmente richiede 3000 iterazioni. Ciò significa che per risolvere il campo di moto devono essere fatti 17 miliardi di calcoli.

Nei prossimi capitoli sono descritti gli elementi raffigurati in figura 1.3. Nei capitoli 3 e 4 sono presentati il sistema di equazioni e i modelli di turbolenza che descrivono le equazioni del moto in una stanza dove viene studiato il clima interno. Il capitolo 6 riguarda la definizione delle condizioni al contorno che devono essere specificate sulle superfici che delimitano il dominio di calcolo. Nel capitolo 5 vengono descritti i metodi numerici appropriati per la soluzione del sistema di equazioni. Il capitolo 7 introduce il controllo della qualità delle risultati CFD e il capitolo 8 discute dell'integrazione della CFD con altri software. L'applicazione della CFD alla ventilazione è discussa nel capitolo 9. Il capitolo 10 fornisce alcuni esempi delle capacità della CFD di modellare il microclima e dei relativi parametri. Infine il capitolo 11 introduce alcuni test per la valutazione delle prestazioni dei software.

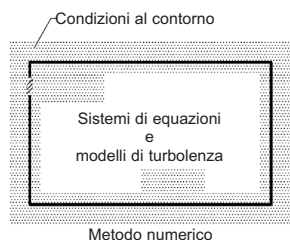


Figura 1.3  
Una stanza e i tre requisiti principali  
per la previsione numerica della distribuzione dell'aria