

La verifica dell'efficienza dell'impianto di ventilazione con l'ausilio dell'analisi fluidodinamica

Pietro Picuno ⁽¹⁾ - Zoe Godosi ⁽²⁾

1 - Introduzione

Il mantenimento di condizioni ambientali ottimali all'interno degli allevamenti zootecnici è un requisito indispensabile al fine di ottenere produzioni caratterizzate da elevati standard quantitativi e qualitativi e, nel contempo, ambienti di lavoro più salubri per gli operatori.

Il controllo dei parametri ambientali (temperatura, umidità relativa, velocità dell'aria, concentrazione dei gas e delle polveri) è solitamente affidato all'impianto di ventilazione che, insieme a quello di riscaldamento, al sistema di allontanamento delle deiezioni ed alle soluzioni costruttive che incrementano l'isolamento termico, contribuisce al controllo del microclima ambientale (17).

Il dimensionamento dell'impianto di ventilazione viene tradizionalmente condotto sulla base della necessità (5) di allontanare d'estate il calore sensibile e latente in eccesso e, in periodo invernale, l'eccesso di vapore acqueo prodotto dagli animali e dalla evaporazione della lettiera, delle urine e delle altre fonti, in modo da mantenere la temperatura e l'umidità relativa dell'aria ambiente entro valori ammissibili per la specie allevata (6).

Più di recente, soprattutto a seguito delle sempre più frequenti soluzioni progettuali che prevedono l'adozione del pavimento fessurato, è stata proposta (16, 22) la necessità di completare la fase di dimensionamento dell'impianto di ventilazione con la verifica della capacità di allontanare i principali gas inquinanti che vengono generati, oltre che dal metabolismo degli animali, dalla fermentazione delle deiezioni.

Un dimensionamento dell'impianto di ventilazione, pur accurato, ma che non tenga conto di fattori di carattere impiantistico e costruttivo, quali il sistema di allontanamento delle deiezioni prescelto, la geometria dell'ambiente con-

finato, la posizione del punto di ingresso e di uscita dell'aria, la presenza di eventuali ostacoli al flusso aerodinamico, ecc., non è però sufficiente a garantire l'effettivo controllo del microclima ambientale, poichè tali aspetti possono condizionare, in maniera anche notevole, l'efficienza della ventilazione, determinando una incompleta miscelazione del-

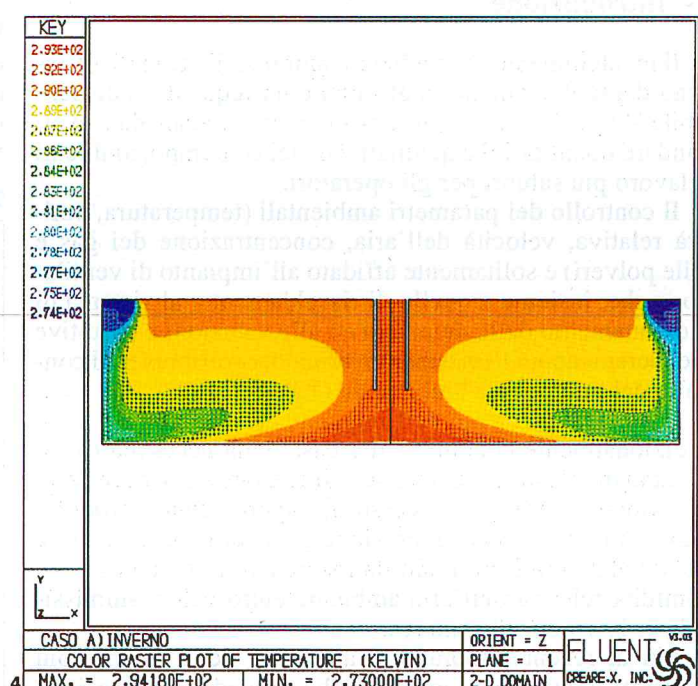
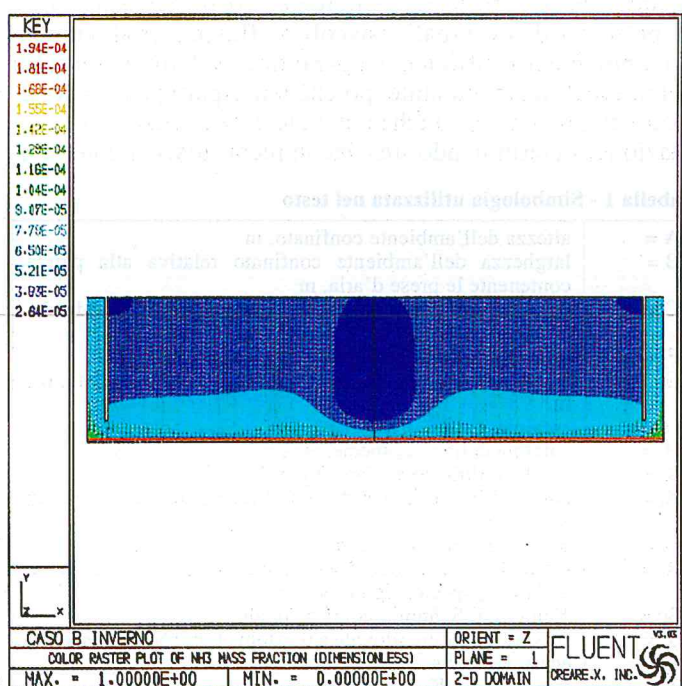
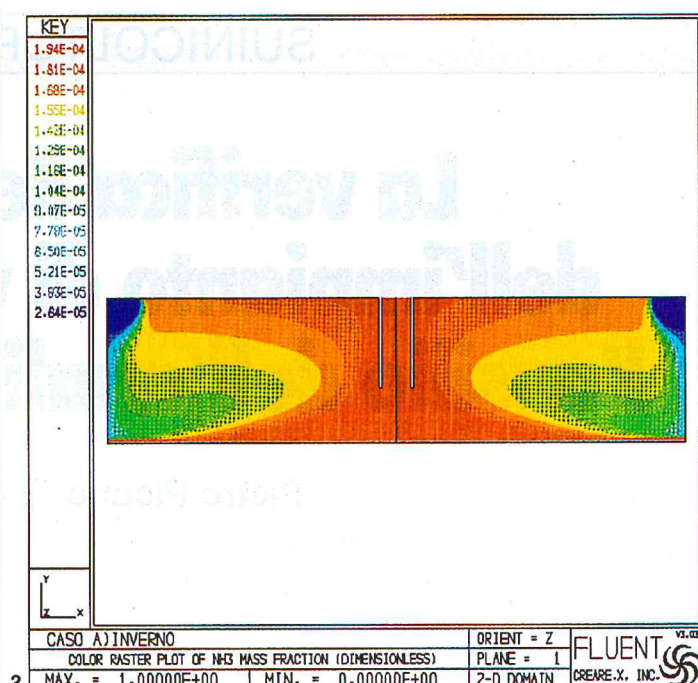
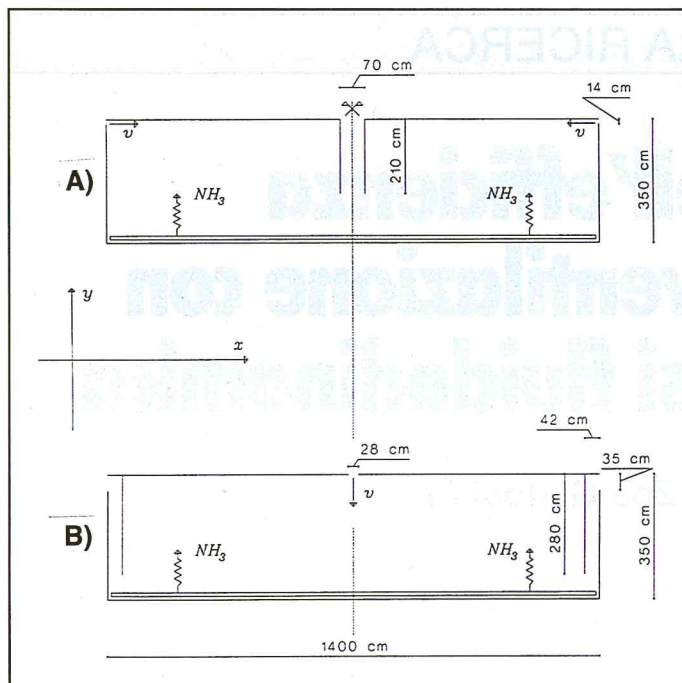
Tabella 1 - Simbologia utilizzata nel testo

A =	altezza dell'ambiente confinato, m
B =	larghezza dell'ambiente confinato relativa alla parete contenente le prese d'aria, m
C =	opportuno coefficiente funzione del tipo di presa d'aria, adimensionale
F _j =	interazione del momento tra due fasi, Kg m ⁻² s ⁻²
G _k =	fattore di generazione dell'energia cinetica turbolenta, Kg m ⁻¹ s ⁻³
H =	entalpia, m ² s ⁻²
H _j =	entalpia della j-sima specie, m ² s ⁻²
K =	conducibilità molecolare, Kg m K ⁻¹ s ⁻³
K _t =	conducibilità effettiva dovuta al trasporto turbolento, Kg m K ⁻¹ s ⁻³
Q =	portata di ventilazione, m ³ s ⁻¹
R _i =	tasso di generazione/dissipazione per reazione chimica della i-sima specie, Kg m ⁻³ s ⁻¹
Sc =	Numero di Schmidt, adimensionale
S _h =	sorgenti di calore (dovute a reazioni chimiche tra le specie, ecc.), Kg m ⁻¹ s ⁻³
T =	temperatura, K
U _i /U _j =	componenti del vettore velocità secondo la i-sima/j-sima coordinata, m s ⁻¹
a =	altezza della presa d'aria, m
b =	larghezza della presa d'aria, m
c _i /c _j =	concentrazione della i-sima/j-sima specie, %
g =	accelerazione di gravità, m s ⁻²
g _j =	componente del vettore accelerazione secondo la j-sima coordinata, m s ⁻²
k =	energia cinetica turbolenta, m ² s ⁻²
p =	pressione, Kg m ⁻¹ s ⁻²
t =	tempo, s
v =	velocità, m s ⁻¹
x _i /x _j /x _k =	i-sima/j-sima/k-sima coordinata, m
ε =	fattore di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta, m ² s ⁻³
μ =	viscosità, Kg m ⁻¹ s ⁻¹
μ _t =	viscosità turbolenta, Kg m ⁻¹ s ⁻¹
ρ =	massa volumica, Kg m ⁻³
τ _{ik} =	tensore degli sforzi viscosi, Kg m ⁻¹ s ⁻²
Φ _{ji} =	flusso della j-sima specie nella i-sima direzione, Kg m ⁻² s ⁻¹

(1) Ricercatore Confermato. Dipartimento Tecnico-Economico, Università della Basilicata, Potenza.

(2) Ricercatrice. Tecnars - Tecnologie Avanzate Ricerca & Sviluppo s.r.l., Bari.

Il contributo all'impostazione ed allo svolgimento del lavoro va suddiviso in maniera paritetica tra gli Autori.



l'aria all'interno della stalla ed una aerazione non uniforme dell'ambiente di allevamento (14, 18).

La progettazione di un sistema di ventilazione artificiale che si limiti al dimensionamento dei ventilatori e trascuri una verifica dell'efficienza complessiva del sistema adottato può portare al risultato di un funzionamento pressoché continuo dei ventilatori ai massimi regimi, cui non corrisponde però il previsto effetto di rinnovo dell'aria: tale situazione può determinare il superamento dei livelli ammissibili dei parametri ambientali, con inevitabili ripercussioni negative sulle specie allevate che possono giungere, come in qualche caso è stato anche riscontrato, a conseguenze letali per gli animali.

Anche nel caso di ventilazione naturale, ove i meccanismi di ricambio dell'aria sono affidati alla contemporanea azione della velocità e direzione del vento e delle forze

Figura 1 - Configurazioni impiantistiche esaminate

Figura 2 - Distribuzione dell'ammoniaca con riferimento allo schema della figura 1A) in condizione di funzionamento invernale; la scala riportata a margine indica, in termini unitari, le concentrazioni di NH₃

Figura 3 - Distribuzione dell'ammoniaca con riferimento allo schema della figura 1B) in condizione di funzionamento invernale; la scala riportata a margine indica, in termini unitari, le concentrazioni di NH₃

Figura 4 - Distribuzione della temperatura nell'aria all'interno dell'ambiente della figura 1A) in condizione di funzionamento invernale; la scala riportata a margine è in gradi Kelvin

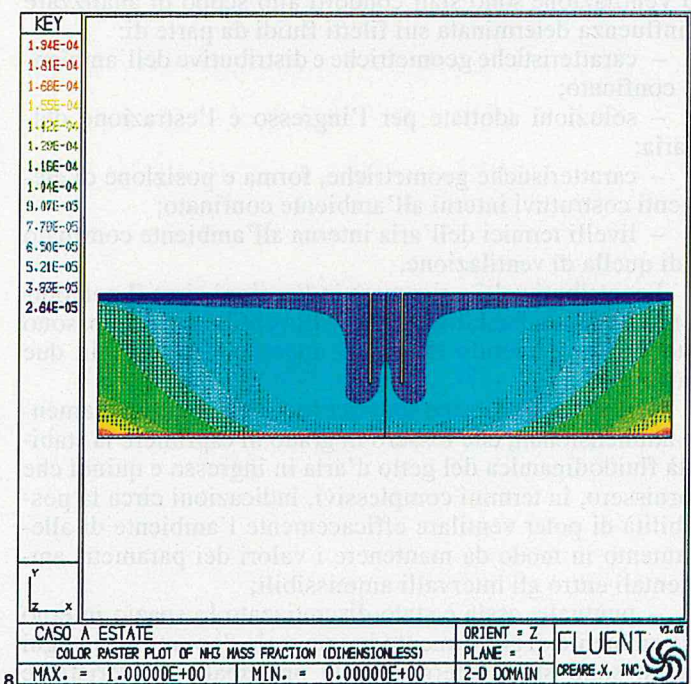
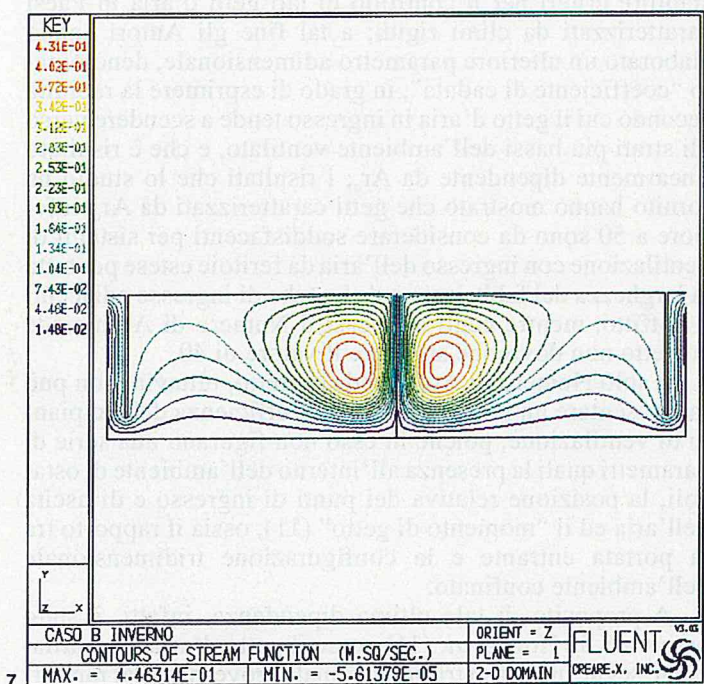
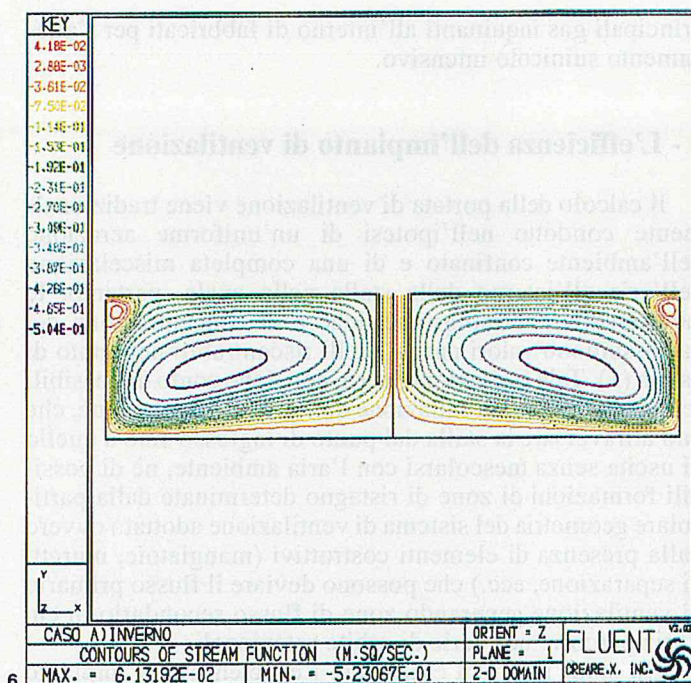
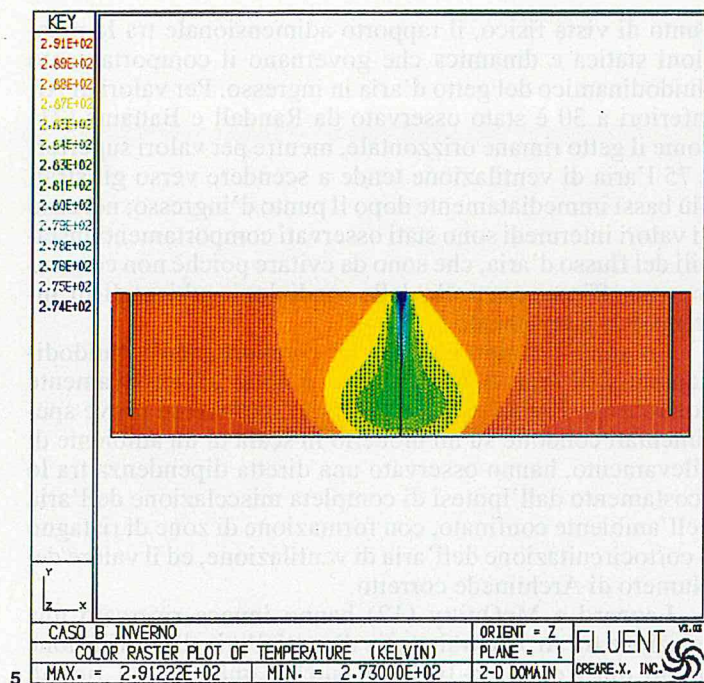


Figura 5 - Distribuzione della temperatura nell'aria all'interno dell'ambiente della figura 1B) in condizione di funzionamento invernale; la scala riportata a margine è in gradi Kelvin

Figura 6 - Andamento delle linee di flusso dell'aria all'interno dell'ambiente della figura 1A) in condizione di funzionamento invernale

Figura 7 - Andamento delle linee di flusso dell'aria all'interno dell'ambiente della figura 1B) in condizione di funzionamento invernale

Figura 8 - Distribuzione dell'ammoniaca con riferimento allo schema della figura 1A) in condizione di funzionamento estivo; la scala riportata a margine indica, in termini unitari, le concentrazioni di NH_3

indotte dai gradienti termici dell'aria, è necessaria un'accurata progettazione complessiva del sistema di ventilazione, che ne assicuri un'elevata efficienza in tutte le condizioni meteorologiche.

L'analisi dell'efficienza degli impianti di ventilazione nei fabbricati zootecnici, con particolare riguardo per quelli per l'allevamento suinicolo intensivo, è stata oggetto di svariati studi condotti in tempi recenti, intesi ad individuare i fattori che intervengono sull'uniformità dell'aerazione e sulla miscelazione dell'aria all'interno della stalla, nonché sull'efficacia nella rimozione dei gas inquinanti; sulla base delle indicazioni emerse dai suddetti studi, in questa sede è stata condotta un'analisi con l'ausilio di un modello fluidodinamico di tipo numerico, al fine di ottenere indicazioni circa l'influenza che la geometria dell'ambiente confinato ha sull'efficienza della ventilazione e sulla distribuzione dei

principali gas inquinanti all'interno di fabbricati per l'allevamento suinicolo intensivo.

2 - L'efficienza dell'impianto di ventilazione

Il calcolo della portata di ventilazione viene tradizionalmente condotto nell'ipotesi di un'uniforme aerazione dell'ambiente confinato e di una completa miscelazione dell'aria all'interno della stalla nella quale, pertanto, le caratteristiche termoigrometriche e di concentrazione dei gas assumono valori pari a quelli riscontrabili nel punto di uscita (1). Tale assunzione, però, non tiene conto di possibili fenomeni di cortocircuitazione dell'aria di ventilazione, che può attraversare la stalla dal punto di ingresso sino a quello di uscita senza mescolarsi con l'aria ambiente, nè di possibili formazioni di zone di ristagno determinate dalla particolare geometria del sistema di ventilazione adottato ovvero dalla presenza di elementi costruttivi (mangiatoie, muretti di separazione, ecc.) che possono deviare il flusso primario di ventilazione generando zone di flusso secondario in cui l'aria percorre una serie di orbite rotazionali.

Gli studi intesi ad esaminare l'efficienza dell'impianto di ventilazione sono stati condotti allo scopo di analizzare l'influenza determinata sui filetti fluidi da parte di:

- caratteristiche geometriche e distributive dell'ambiente confinato;
- soluzioni adottate per l'ingresso e l'estrazione dell'aria;
- caratteristiche geometriche, forma e posizione di elementi costruttivi interni all'ambiente confinato;
- livelli termici dell'aria interna all'ambiente confinato e di quella di ventilazione.

I contributi volti a ricercare indicazioni circa il comportamento fluidodinamico dell'aria di ventilazione si possono suddividere, secondo il tipo di approccio seguito, in due categorie:

- globale, ossia sono stati ricercati parametri, solitamente adimensionali, che fossero in grado di esprimere la stabilità fluidodinamica del getto d'aria in ingresso e quindi che fornissero, in termini complessivi, indicazioni circa la possibilità di poter ventilare efficacemente l'ambiente di allevamento in modo da mantenere i valori dei parametri ambientali entro gli intervalli ammissibili;
- puntuale, ossia è stato discretizzato lo spazio interno all'ambiente di allevamento in una serie di punti, ed in ogni punto sono state determinate le principali caratteristiche fluidodinamiche dell'aria attraverso una modellizzazione di carattere fisico o matematico.

2.1 - Analisi di tipo globale

Tra i contributi della prima categoria, di particolare importanza appare quello che ha portato all'elaborazione del "Numero di Archimede corretto", così definito (21):

$$Ar_c = \frac{g C_{ab} AB(A+B)}{Q^2} \frac{T_{int} - T_{est}}{(T_{int} + T_{est})/2}$$

ove i simboli hanno il significato riportato in tabella 1 e T_{int} e T_{est} rappresentano, rispettivamente, i valori delle temperature dell'aria ambiente e di quella entrante.

Il Numero di Archimede corretto rappresenta, da un

punto di vista fisico, il rapporto adimensionale tra le pressioni statica e dinamica che governano il comportamento fluidodinamico del getto d'aria in ingresso. Per valori di Ar_c inferiori a 30 è stato osservato da Randall e Battams (21) come il getto rimane orizzontale, mentre per valori superiori a 75 l'aria di ventilazione tende a scendere verso gli strati più bassi immediatamente dopo il punto d'ingresso; nel caso di valori intermedi sono stati osservati comportamenti instabili del flusso d'aria, che sono da evitare poichè non consentono un efficace controllo delle condizioni ambientali all'interno dell'allevamento.

Un'analisi di tipo globale del comportamento fluidodinamico dell'aria di ventilazione è stata successivamente condotta da Barber e Ogilvie (2) che, attraverso prove sperimentali condotte su un modello in scala di un ambiente di allevamento, hanno osservato una diretta dipendenza tra lo scostamento dall'ipotesi di completa miscelazione dell'aria nell'ambiente confinato, con formazione di zone di ristagno o cortocircuitazione dell'aria di ventilazione, ed il valore del Numero di Archimede corretto.

Leonard e McQuitty (12) hanno invece ricercato una relazione tra Ar_c e le traiettorie di getti d'aria di ventilazione molto più fredda ($< -10^\circ C$) di quella ambiente, al fine di stabilire criteri per il controllo di tali getti d'aria in Paesi caratterizzati da climi rigidi; a tal fine gli Autori hanno elaborato un ulteriore parametro adimensionale, denominato "coefficiente di caduta", in grado di esprimere la rapidità secondo cui il getto d'aria in ingresso tende a scendere verso gli strati più bassi dell'ambiente ventilato, e che è risultato linearmente dipendente da Ar_c ; i risultati che lo studio ha fornito hanno mostrato che getti caratterizzati da Ar_c inferiore a 50 sono da considerare soddisfacenti per sistemi di ventilazione con ingresso dell'aria da feritoie estese per tutta la larghezza del fabbricato o da bocche di ingresso adiacenti il soffitto, mentre negli altri casi il Numero di Archimede corretto non dovrebbe superare il valore di 40.

Il solo Numero di Archimede corretto, tuttavia, non può rappresentare un indice globale dell'efficienza dell'impianto di ventilazione, poichè in esso non figurano una serie di parametri quali la presenza all'interno dell'ambiente di ostacoli, la posizione relativa dei punti di ingresso e di uscita dell'aria ed il "momento di getto" (11), ossia il rapporto tra la portata entrante e la configurazione tridimensionale dell'ambiente confinato.

A proposito di tale ultima dipendenza, infatti, è stato osservato da Hoff *et al.* (11) come il getto d'aria di ventilazione segue un flusso tridimensionale, governato dal rapporto tra la componente dinamica e quella statica della pressione in ogni punto dell'ambiente confinato, caratterizzato da traiettorie assimilabili ad eliche e sviluppantisi dal punto di ingresso a quello di uscita dell'aria.

Una descrizione precisa del comportamento fluidodinamico dell'aria all'interno degli ambienti confinati può, pertanto, essere ottenuta esclusivamente mediante un'analisi di tipo puntuale.

2.2 - Analisi di tipo puntuale

Tra i numerosi studi volti a definire in maniera puntuale le caratteristiche del campo di moto ed a studiare l'influenza esercitata su di esso da parte di una serie di fattori di carattere impiantistico e costruttivo, di particolare rilievo appare il contributo di Randall (19) il quale ha osservato,

attraverso prove sperimentali condotte in un fabbricato suinicolo ventilato artificialmente, che il modello fluidodinamico che si instaura nell'ambiente è determinato dalla direzione e dalla temperatura dell'aria in ingresso e che su di esso ha un'influenza molto più marcata la posizione del punto d'ingresso dell'aria rispetto a quella del punto d'uscita. L'Autore, inoltre, ha osservato come un'oscillazione della temperatura dell'aria di ingresso anche di pochi gradi può determinare un completo ribaltamento nei percorsi seguiti dall'aria di ventilazione all'interno del fabbricato: la semplice variazione della temperatura all'esterno durante il corso della giornata, pertanto, fa sì che si possa avere l'inversione del flusso di circolazione in corrispondenza di un determinato valore che l'Autore ha individuato, per la situazione esaminata, in corrispondenza di 14°C; poichè tale valore soglia viene facilmente superato nel corso di una giornata in molti periodi dell'anno, è stata desunta la conclusione che il comportamento del flusso d'aria non è legato alla stagione e che quindi esso va esaminato per tutte le differenti situazioni che si possono determinare.

Le prove, effettuate avendo sistemato all'interno del fabbricato dei dispositivi artificiali in grado di riprodurre il comportamento termico dei suini, sono state successivamente ripetute (3) in presenza degli animali, ricavando sostanzialmente le medesime indicazioni.

Randall e Battams (20), inoltre, hanno esaminato l'influenza esercitata sul modello fluidodinamico dell'aria da parte delle travi di supporto del solaio di copertura sporgenti all'interno dell'ambiente, ricavando, attraverso l'istituzione di relazioni tra le dimensioni delle travi e gli angoli di deviazione del getto d'aria in ingresso, indicazioni utili per una progettazione complessiva del sistema di ventilazione finalizzata all'ottenimento del maggior grado possibile di efficienza dell'impianto.

Il modello di distribuzione dell'aria all'interno di ambienti confinati è stato oggetto più recentemente di analisi condotte mediante l'ausilio di modelli matematici di tipo turbolento, basati sulla soluzione numerica delle equazioni governanti il moto in una serie di punti in cui lo spazio si immagina discretizzato; tra essi, il modello più diffuso, noto come "k-ε" (ove k rappresenta l'energia cinetica turbolenta ed ε è il suo fattore di dissipazione), è stato impiegato da Choi *et al.* (7, 8) per analizzare la distribuzione dell'aria in un ambiente confinato, in assenza o in presenza di un ostacolo rettangolare posato all'interno sul pavimento.

Gli studi mirati ed esaminare l'efficacia della ventilazione da un punto di vista fluidodinamico sono stati soltanto di recente estesi all'esame della distribuzione dei gas inquinanti e delle polveri.

In particolare, De Praetere e Van Der Biest (9, 10) hanno condotto un esame dei modelli fluidodinamici e del loro effetto sulla distribuzione dell'ammoniaca all'interno di allevamenti suinicoli intensivi con pavimento fessurato; attraverso prove condotte in ambienti sperimentali è stato rilevato come, dal punto di vista della generazione di ammoniaca, lo spazio sottostante il pavimento fessurato va considerato come una parte essenziale dell'ambiente confinato, poichè il flusso d'aria che lo attraversa esercita una diretta influenza sulla temperatura delle deiezioni, e quindi sul rilascio di gas inquinanti, nonchè sulla distribuzione dell'ammoniaca all'interno di tutto l'ambiente di allevamento: gli Autori hanno infatti rilevato come un flusso di ventilazione convogliato nell'ambiente in modo da attraversare precedentemente la fossa di raccolta delle deiezioni produceva, a causa

dell'effetto di raffreddamento del liquame, valori di concentrazione dell'ammoniaca nell'aria ambiente limitati a 3-7 ppm mentre se lo stesso ambiente veniva ventilato con un flusso d'aria convogliato direttamente all'interno, senza cioè attraversare la fossa sottostante il pavimento fessurato, le concentrazioni di NH_3 nei corrispondenti punti di misura salivano a 5-17 ppm. A proposito della distribuzione dell'ammoniaca all'interno del fabbricato, inoltre, gli Autori hanno osservato come, proprio a causa della variabilità del comportamento fluidodinamico dell'aria, è molto importante, quando si intende misurare la concentrazione dei gas, scegliere con attenzione i punti di campionamento: una misura presa, ad esempio, al centro dell'ambiente può non essere rappresentativa della qualità dell'aria nel complesso del fabbricato.

Anche Breum *et al.* (4), mediante prove sperimentali condotte in un fabbricato per l'allevamento suinicolo intensivo, hanno verificato come l'efficienza del processo di ricambio dell'aria e l'efficacia nella rimozione dei gas inquinanti sono direttamente correlate al sistema di ventilazione adottato; in particolare, dai risultati è emerso come uno schema di ventilazione dell'ambiente di allevamento con estrazione dal soffitto e flusso prevalentemente diretto verso l'alto ha mostrato una maggiore efficienza ed una migliore efficacia nell'allontanamento di polveri, calore in eccesso ed anidride carbonica a confronto con un analogo schema di ventilazione dello stesso ambiente, in cui l'estrazione dell'aria avveniva dai canali di raccolta delle deiezioni ed il flusso era prevalentemente diretto verso il basso, nel quale è risultata migliore soltanto l'efficacia nell'allontanamento dell'ammoniaca.

Una metodologia basata su una procedura di tipo numerico per lo studio del comportamento fluidodinamico dell'aria in un modello in scala di un ambiente di allevamento ventilato artificialmente, unitamente all'esame della distribuzione dei contaminanti gassosi e delle polveri, infine, è stata di recente proposta (13) sulla base di un algoritmo di calcolo utilizzando una procedura alle differenze finite; i risultati forniti da tale algoritmo di calcolo sono stati successivamente verificati (15) mediante prove sperimentali, che hanno mostrato un'elevata correlazione tra le traiettorie delle particelle previste teoricamente e quelle verificate sperimentalmente nonchè una buona corrispondenza tra i valori delle velocità misurati e quelli previsti con l'impiego del programma, le cui differenze sono sempre risultate contenute entro il 5% del valore della velocità dell'aria nel punto di ingresso.

Lo stesso algoritmo di calcolo è stato impiegato (18) per l'analisi di differenti sistemi di ventilazione relativi ad uno stesso ambiente per l'allevamento intensivo, sotto l'aspetto dell'efficienza nella distribuzione dell'aria e dell'allontanamento dei gas inquinanti in una situazione isoterma, ossia caratterizzata da un uguale livello della temperatura dell'aria in ingresso rispetto a quella in tutti i punti dell'ambiente confinato, il che si può verificare con una certa probabilità nel periodo estivo (13). In questa sede, lo studio è stato ampliato con la considerazione di situazioni non-isoterme, in cui non esiste cioè necessariamente in tutti i punti del dominio considerato un'uguale temperatura, e valutando in queste condizioni il comportamento di un getto d'aria in ingresso dotato di un livello termico differente rispetto all'interno, avendo come obiettivo la valutazione del comportamento fluidodinamico del getto d'aria di ventilazione e della conseguente distribuzione delle temperature e dei gas

nocivi all'interno dell'ambiente di allevamento nelle diverse situazioni considerate.

3 - Analisi fluidodinamica del sistema di ventilazione

3.1 - Modello matematico

Il campo di moto dell'aria e dei gas contaminanti all'interno di un ambiente confinato è governato dalle seguenti equazioni, espresse in notazione tensoriale in un sistema di coordinate cartesiane:

Equazione di continuità (o di conservazione della massa)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0$$

Equazione di Navier-Stokes (o di conservazione del momento)

$$\frac{\partial (\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + F_j$$

Equazione del trasporto dell'entalpia (o di conservazione dell'energia)

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i H)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (K + K_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j H_j \Phi_{ji} + \frac{dp}{dt} - \tau_{ik} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + S_h$$

ove:

$$H = \sum_j c_p H_j$$

Equazioni della turbolenza (k-ε)

$$\text{Equazione } k: \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon$$

$$\text{Equazione } \epsilon: \frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + 1.44 \frac{\epsilon}{k} G_k - 1.92 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

ove:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$$

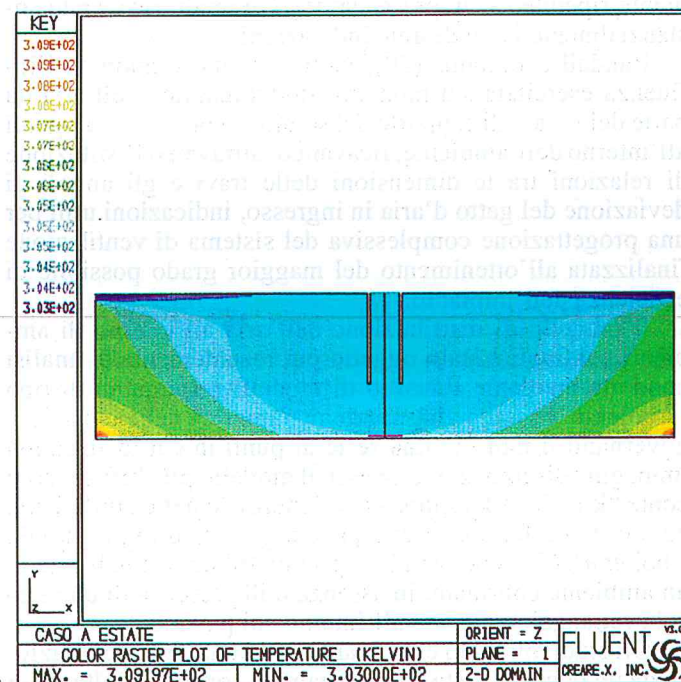
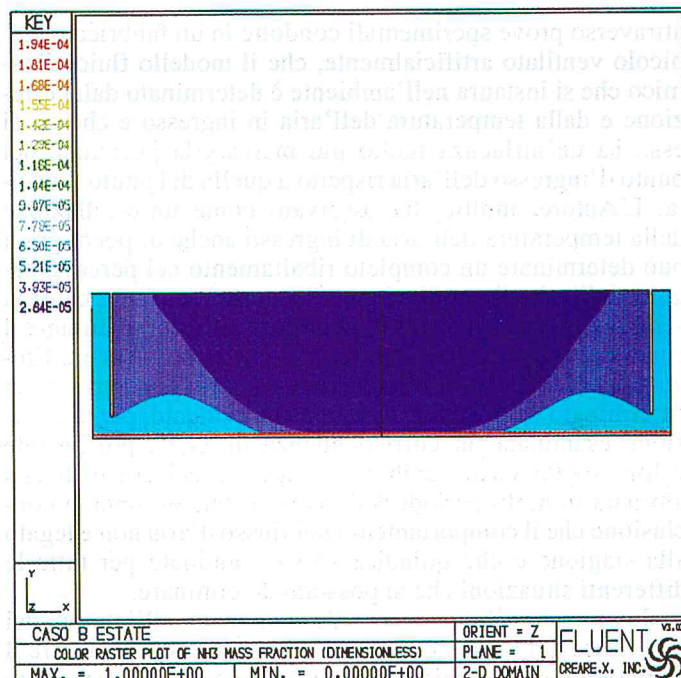
e μ_t , viscosità turbolenta, è legata a k ed ϵ tramite la relazione:

$$\mu_t = 0.09 \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

Equazione del trasporto di massa dei contaminanti

$$\frac{\partial (\rho c_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i c_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc} \frac{\partial c_i}{\partial x_i} \right) + R_i$$

La soluzione contemporanea di tali equazioni differenziali alle derivate parziali, una volta stabilite le opportune condizioni al contorno, consente di determinare, in ogni punto dell'ambiente di allevamento, i valori di tutte le variabili, la cui conoscenza è necessaria per poter determinare l'andamento del modello fluidodinamico dell'aria di ventilazione.



Il problema della soluzione contemporanea di equazioni differenziali tanto complesse viene solitamente affrontato mediante la procedura numerica delle "differenze finite", consistente nel discretizzare il dominio considerato in un numero finito di celle elementari, in cui le suddette equazioni differenziali vengono risolte secondo una procedura di soluzione di tipo iterativo, a causa della non-linearità e dell'interdipendenza tra di loro; una volta raggiunta la convergenza, la procedura di calcolo si arresta ed è possibile ottenere rappresentazioni grafiche e/o valori quantitativi dei parametri termofluidodinamici coinvolti, in tutti i punti del dominio considerato.

Tale tipo di approccio, naturalmente, richiede potenzialità di calcolo numerico molto elevate, che sono state di recente raggiunte grazie alla realizzazione di elaboratori elettronici sempre più potenti; è così possibile, oramai,

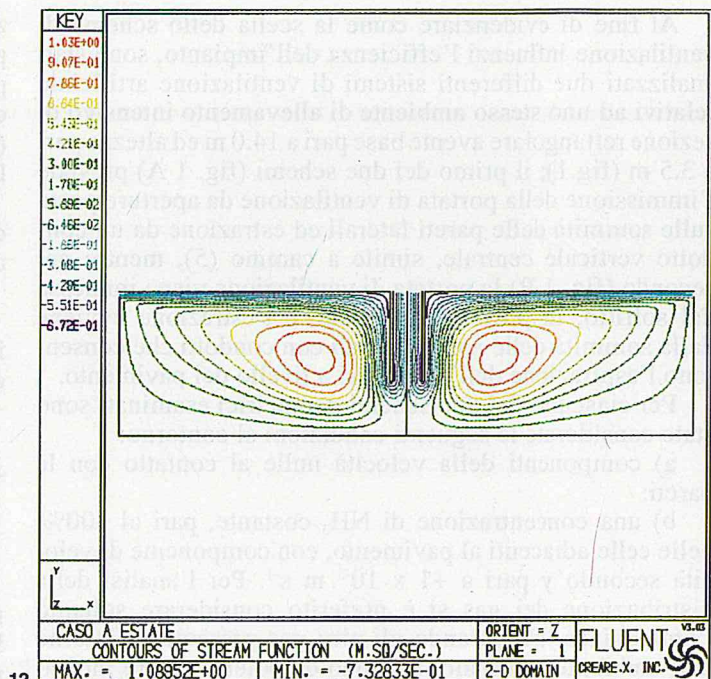
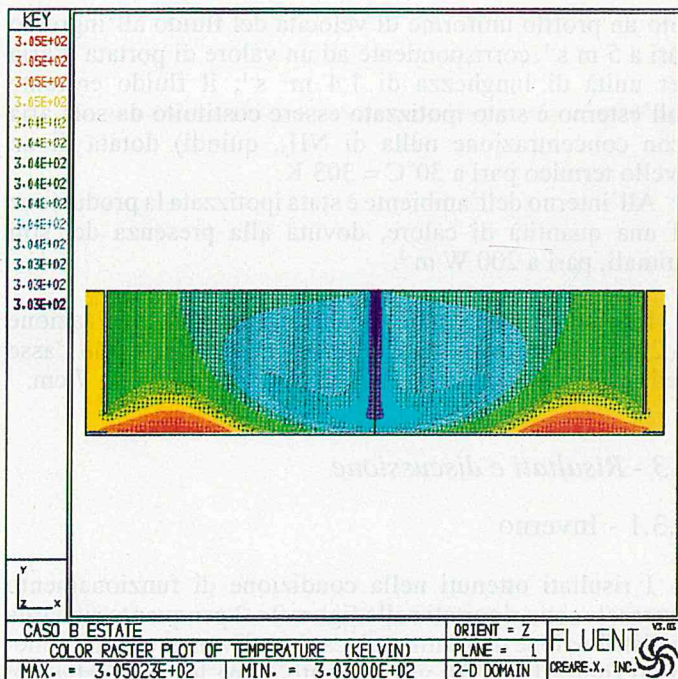


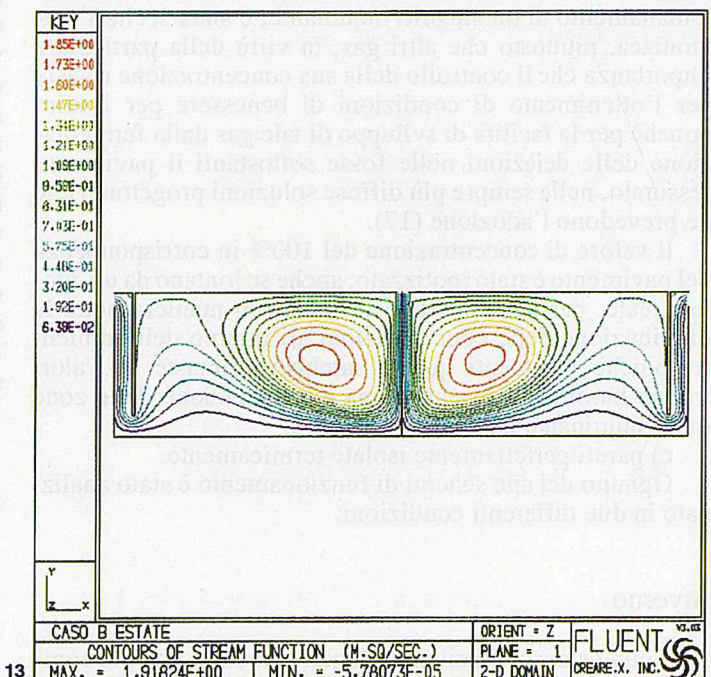
Figura 9 - Distribuzione dell'ammoniaca con riferimento allo schema della figura 1B) in condizione di funzionamento estivo; la scala riportata a margine indica, in termini unitari, le concentrazioni di NH_3

Figura 10 - Distribuzione della temperatura nell'aria all'interno dell'ambiente della figura 1A) in condizione di funzionamento estivo; la scala riportata a margine è in gradi Kelvin

Figura 11 - Distribuzione della temperatura nell'aria all'interno dell'ambiente della figura 1B) in condizione di funzionamento estivo; la scala riportata a margine è in gradi Kelvin

Figura 12 - Andamento delle linee di flusso dell'aria all'interno dell'ambiente della figura 1A) in condizione di funzionamento estivo

Figura 13 - Andamento delle linee di flusso dell'aria all'interno dell'ambiente della figura 1B) in condizione di funzionamento estivo



affrontare l'approccio alla fluidodinamica mediante differenze finite con l'impiego di un personal computer, con il vantaggio di poter esaminare un vasto campo di situazioni facendo variare, insieme o singolarmente, differenti parametri, in virtù della generalità delle leggi fisiche sulle quali i modelli matematici sono basati.

3.2 - Procedura di soluzione

È stato impiegato il codice di calcolo FLUENT (CREARE.X Inc., FLUENT Europe Ltd.) Vers. 3.03, prescelto, oltre che per essere uno dei più diffusi e completi algoritmi per il calcolo fluidodinamico con modellizzazione del flusso anche in presenza di gradienti termici, anche per essere già stato impiegato da altri Autori (13, 15) per l'esame dell'ef-

ficienza della ventilazione in allevamenti di broilers con risultati, riscontrati sperimentalmente, che ne hanno dimostrato una elevata capacità di rappresentazione della realtà fisica.

L'analisi è stata condotta nelle seguenti ipotesi:

- flusso stazionario, ossia tutti i parametri coinvolti sono stati considerati indipendenti dal tempo;
- dominio bidimensionale; l'analisi è stata cioè limitata alla sola sezione trasversale, ipotizzando che la configurazione esaminata si ripeta per tutta la lunghezza del fabbricato;
- moto completamente turbolento, con fattore di energia cinetica turbolenta pari a $k = 0.005 \text{ v}^2$; tale ipotesi è stata adottata in conformità ad altre analisi compiute con l'ausilio di modelli fluidodinamici di tipo numerico (7, 13);
- fluido (aria e gas contaminanti) incompressibile e dotato di caratteristiche fisiche costanti.

Al fine di evidenziare come la scelta dello schema di ventilazione influenzi l'efficienza dell'impianto, sono stati analizzati due differenti sistemi di ventilazione artificiale relativi ad uno stesso ambiente di allevamento intensivo di sezione rettangolare avente base pari a 14.0 m ed altezza pari a 3.5 m (fig.1); il primo dei due schemi (fig. 1 A) prevede l'immissione della portata di ventilazione da aperture poste sulle sommità delle pareti laterali ed estrazione da un condotto verticale centrale, simile a camino (5), mentre nel secondo (fig. 1 B) la portata di ventilazione viene immessa dal soffitto, in posizione centrale, e l'estrazione avviene dalla sommità delle pareti laterali con condotti che consentono l'aspirazione dell'aria quasi a livello del pavimento.

Per ciascuno dei due schemi geometrici esaminati sono state considerate le seguenti condizioni al contorno:

a) componenti della velocità nulle al contatto con le pareti;

b) una concentrazione di NH_3 costante, pari al 100%, nelle celle adiacenti al pavimento, con componente di velocità secondo y pari a $+1 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Per l'analisi della distribuzione dei gas si è preferito considerare soltanto l'ammoniaca, trascurando gli altri gas presenti all'interno dell'ambiente confinato, in modo da poter ottenere indicazioni circa l'efficacia dell'impianto di ventilazione nell'allontanamento di un singolo inquinante; è stata scelta l'ammoniaca, piuttosto che altri gas, in virtù della particolare importanza che il controllo della sua concentrazione riveste per l'ottenimento di condizioni di benessere per i suini nonché per la facilità di sviluppo di tale gas dalla fermentazione delle deiezioni nelle fosse sottostanti il pavimento fessurato, nelle sempre più diffuse soluzioni progettuali che ne prevedono l'adozione (17).

Il valore di concentrazione del 100% in corrispondenza del pavimento è stato ipotizzato, anche se lontano da un'ipotesi reale, per poter mettere in risalto in maniera netta la distribuzione delle concentrazioni all'interno dell'ambiente, poichè altrimenti queste sarebbero rimaste su valori troppo bassi per consentire una evidenziazione delle zone ove l'inquinante tende a ristagnare;

c) pareti perfettamente isolate termicamente.

Ognuno dei due schemi di funzionamento è stato analizzato in due differenti condizioni:

Inverno

Nella prima condizione di funzionamento, assunta come caratteristica di un periodo invernale, è stato ipotizzato un profilo uniforme di velocità del fluido all'ingresso pari a 1 m s^{-1} , cui corrisponde un valore di portata d'aria per unità di lunghezza del fabbricato pari a $0.28 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; il fluido entrante dall'esterno è stato ipotizzato essere costituito da sola aria (con concentrazione nulla di NH_3 , quindi) dotata di una temperatura pari a $0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$.

All'interno dell'ambiente è stata ipotizzata la produzione di una quantità di calore, dovuta alla presenza degli animali ed al funzionamento di un impianto di riscaldamento, pari a 400 W m^{-2} .

Estate

Nella seconda condizione di funzionamento, invece, assunta come caratteristica di un periodo estivo, è stato ipotiz-

zato un profilo uniforme di velocità del fluido all'ingresso pari a 5 m s^{-1} , corrispondente ad un valore di portata d'aria per unità di lunghezza di $1.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; il fluido entrante dall'esterno è stato ipotizzato essere costituito da sola aria (con concentrazione nulla di NH_3 , quindi) dotata di un livello termico pari a $30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$.

All'interno dell'ambiente è stata ipotizzata la produzione di una quantità di calore, dovuta alla presenza dei soli animali, pari a 200 W m^{-2} .

L'analisi è stata condotta mediante una discretizzazione in 200 celle secondo l'asse delle x e 50 celle secondo l'asse delle y, in modo da avere maglie di dimensioni $7 \times 7 \text{ cm}$.

3.3 - Risultati e discussione

3.3.1 - Inverno

I risultati ottenuti nella condizione di funzionamento invernale sono riportati nelle figure 2 e 3 per quanto riguarda la distribuzione dell'ammoniaca rispettivamente negli schemi di figura 1A e 1B; va osservato come le scale delle due rappresentazioni sono uguali, e pertanto risulta immediato desumere come il secondo schema appaia, da un punto di vista dell'efficacia nell'allontanamento dell'ammoniaca, certamente preferibile: le zone a più elevata concentrazione sono infatti, nel caso dello schema A, quelle centrali, mentre nel caso dello schema B le zone di massima concentrazione dell'inquinante sono disposte all'altezza del pavimento ed all'interno dei condotti laterali di estrazione, ed inoltre i valori di concentrazione di ammoniaca nell'aria in questo caso sono notevolmente inferiori, a parità di ogni altra condizione, rispetto a quelli che si ottengono nel primo schema: la concentrazione di NH_3 ad un'altezza di 1 m da terra nel caso dello schema A è infatti circa 3-4 volte superiore a quella che si raggiunge, a tale altezza, nello schema B.

Nelle figure 4 e 5, rispettivamente relative agli schemi delle figure 1A e 1B, sono riportati invece i valori della temperatura dell'aria all'interno dell'ambiente. Come si può rilevare, valori di temperatura bassa dell'aria sono presenti, a livello degli animali, in entrambi gli schemi impiantistici con la differenza che, mentre nel caso dello schema di figura 1A la zona interessata da un getto d'aria fredda ($T \approx 10^\circ\text{C}$) è quella adiacente il pavimento in prossimità delle pareti laterali, nel caso dello schema di figura 1B l'unica zona ove la temperatura raggiunge valori bassi, inammissibili per i suini per i quali, com'è noto, getti d'aria a bassa temperatura possono risultare anche gravemente dannosi (17), è quella centrale che, quindi, sarebbe opportuno destinare a zona di servizio non accessibile agli animali. Nella parte restante del fabbricato, invece, in entrambi i casi sono assicurati valori di temperatura più elevati, che, in virtù delle ipotesi formulate risultano superiori a 15°C e, quindi, sufficienti per suini adulti (6).

Nelle figure 6 e 7, infine, sempre con riferimento rispettivamente agli schemi delle figure 1A e 1B, sono riportati gli andamenti delle linee di flusso, dai quali si può desumere come nel caso dello schema B il flusso d'aria di ventilazione coinvolge una notevole porzione dell'ambiente confinato, mentre le zone in cui l'aria segue orbite ricurve su se stesse sono più limitate rispetto al caso dello schema A, in cui

invece la maggior parte dell'aria ambiente non viene direttamente interessata dal flusso di circolazione primario e, pertanto, l'efficienza della ventilazione risulta più bassa, come peraltro già evidenziato analizzando la distribuzione dell'ammoniaca.

3.3.2 - Estate

I risultati nella condizione di funzionamento caratteristici di un periodo estivo, con riferimento rispettivamente agli schemi dell'impianto di ventilazione delle figure 1A e 1B, sono riportati nelle figure 8 e 9 per quanto riguarda le concentrazioni dell'ammoniaca, nelle figure 10 e 11 per quanto concerne la temperatura dell'aria, e nelle figure 12 e 13 per quanto attiene gli andamenti delle linee di flusso.

Come si può notare dalle figure 8 e 9, in cui la scala è stata mantenuta uguale a quella delle figure 2 e 3, il problema della formazione di zone di ristagno dell'aria e dei gas nocivi è molto inferiore rispetto alla situazione invernale, in virtù della più elevata portata di ventilazione; comunque, si può osservare come nei punti in cui la ventilazione è meno efficiente, l'ammoniaca tende ad accumularsi, raggiungendo concentrazioni superiori a quelle delle zone ove il passaggio dell'aria garantisce un'efficace ricambio. Ancora una volta, comunque, la concentrazione di NH_3 ad un'altezza di 1 m da terra nel caso dello schema A è notevolmente superiore (circa 2-3 volte) a quella che si raggiunge, a tale altezza, nello schema B.

Anche per quanto riguarda la rimozione dell'eccesso di calore si può notare che lo schema A risulta meno efficiente rispetto a quello B: come si può osservare dalla distribuzione delle temperature (figg. 10 e 11), infatti, nel primo caso si hanno all'interno temperature superiori anche di 6 °C rispetto all'esterno, mentre nel secondo caso il salto termico tra l'aria entrante e quella interna all'ambiente confinato è contenuto entro 2 °C, e ciò a parità di tutte le altre condizioni, soltanto in virtù della più favorevole geometria impiantistica adottata. Dall'esame delle figure, inoltre, si può osservare che la distribuzione delle temperature, nel caso estivo, appare essere più strettamente condizionata dal campo di pressioni instaurato dal getto d'aria in ingresso, come si può notare osservando che le zone a temperatura minore sono quelle più vicine al getto d'aria entrante; la ridotta influenza dei fenomeni di "galleggiamento" termico sul modello fluidodinamico, peraltro, risulta in accordo con quanto indicato da altri Autori (13), i quali attraverso studi su prototipo hanno rilevato che i gradienti termici presenti nell'aria hanno uno scarso effetto sul modello fluidodinamico che si instaura in corrispondenza di elevate portate di ventilazione.

Di particolare interesse appare, infine, l'analisi dell'andamento delle linee di flusso: se nel caso dello schema di figura 1B, infatti, non si evincono sostanziali differenze rispetto alla situazione invernale, il raffronto dell'andamento delle linee di flusso dello schema di figura 1A rispetto alla situazione invernale mostra un comportamento profondamente diverso.

In inverno (fig. 6), infatti, il getto in ingresso tende a "cadere" immediatamente dopo l'ingresso nell'ambiente confinato, mentre in situazione di funzionamento estivo (fig. 12) il getto in ingresso tende a rimanere "attaccato" al soffitto sino al punto di estrazione, con ciò confermando quanto già osservato da Randall (19).

4 - Conclusioni

Una corretta progettazione del sistema di ventilazione di un fabbricato per l'allevamento suinicolo intensivo non può essere limitata al dimensionamento dell'impianto di estrazione dell'aria, ma deve comprendere anche una verifica complessiva dell'efficienza della ventilazione e dell'efficacia nella rimozione del calore, dell'umidità, dei gas nocivi e delle polveri, che potrebbero risultare menomate anche in maniera sensibile da una scelta non idonea dei punti di ingresso e di uscita dell'aria, dal posizionamento di ostacoli al flusso aerodinamico o da altri fattori di carattere costruttivo o impiantistico.

L'utilizzo di un modello numerico alle differenze finite, consentendo una verifica abbastanza rigorosa del comportamento fluidodinamico dell'aria di ventilazione e della distribuzione dei principali gas inquinanti, costituisce un ulteriore elemento a disposizione del progettista, poichè consente di determinare i valori delle principali caratteristiche termofluidodinamiche in ogni punto dell'ambiente confinato, contribuendo così ad evidenziare la formazione di possibili zone di ristagno dell'aria e dei gas inquinanti, di individuare eventuali fenomeni di cortocircuitazione dell'aria di ventilazione che determinerebbero una caduta dell'efficienza dell'impianto, nonché di ottenere indicazioni circa i livelli termici raggiunti in ogni punto interno all'ambiente di allevamento e pertanto, sulla base di tali indicazioni, di procedere ad un ottimale dimensionamento del sistema di ventilazione.

L'analisi condotta, a titolo di esempio, nel presente studio, ha infatti messo in evidenza come tra due possibili schemi di ventilazione dello stesso ambiente di allevamento uno ha fornito, a parità di tutte le condizioni di funzionamento, migliori prestazioni, mostrando una maggiore efficienza della ventilazione testimoniata da una superiore efficacia nell'allontanamento dell'ammoniaca, sia in periodo invernale che estivo, e nella riduzione del salto termico rispetto all'esterno in periodo estivo, con l'unica condizione di dover prevedere nella parte centrale una zona di servizio, non accessibile ai suini, per evitare che questi possano essere investiti, in periodo invernale, da correnti di aria fredda.

RIASSUNTO

L'impianto di ventilazione di un fabbricato zootecnico viene dimensionato sulla base della necessità di mantenere i valori di temperatura, umidità relativa, concentrazione di gas e polveri nell'aria entro valori ammissibili per le specie allevate.

Di notevole importanza, particolarmente nel caso degli allevamenti suinicoli intensivi, appare la verifica della sua efficienza, che potrebbe venire influenzata in maniera anche sensibile dalla geometria dell'ambiente confinato, dal posizionamento dei punti di ingresso ed uscita dell'aria o dalla presenza di eventuali ostacoli al flusso aerodinamico: tale influenza si potrebbe manifestare attraverso la determinazione di condizioni di funzionamento non corretto, con riduzione di efficacia nel mantenimento delle condizioni ambientali entro i valori prefissati e, di conseguenza, pregiudizi anche gravi sulla corretta conduzione dell'allevamento.

Al fine di analizzare come la scelta dello schema di ventilazione influenza l'efficienza nella distribuzione dell'aria e nell'allontanamento dei gas inquinanti, è stata effettuata un'analisi fluidodinamica di due differenti schemi di ventilazione dello stesso fabbricato; con l'ausilio di un codice di calcolo alle differenze finite sono stati evidenziati il campo di velocità, la distribuzione delle temperature e quella dell'ammoniaca all'interno degli ambienti esaminati, potendo osservare come, a parità di ogni altra condizione, la scelta di uno

schema di ventilazione piuttosto che un altro può condurre a differenze di 2-4 °C di temperatura dell'aria ambiente e a concentrazioni di ammoniaca 3-4 volte superiori.

SUMMARY

THE CONTROL OF VENTILATION SYSTEM EFFICIENCY BY FLUID DYNAMICS ANALYSIS

A ventilation unit of a swine confinement building is designed with the aim to maintain the levels of temperature, relative humidity, gaseous contaminant and dust concentrations to values acceptable for the animals.

For the good performance of the ventilation system, particularly for swine confinement buildings, is very important to verify its efficiency, that may be affected by the building geometry, the inlet and outlet locations or the presence of obstructions to the airflow: that influence might be revealed through the determination of a not correct operational condition, with a reduced efficacy of keeping the environmental conditions under the fixed values and as a consequence a compromised management of the animal facility.

Thus, in order to study how the selection of the ventilation scheme influences the efficiency of the air distribution and of the gaseous contaminants removal, it was carried out a fluid dynamic analysis applied to two different ventilation schemes of the same building; by means of a finite difference computational code, the velocity field, the temperature and ammonia distribution within the airspace were examined, and it was pointed out that, under the same conditions and according only to the selected scheme, there is a difference of 2-4 °C in the temperature range and values of ammonia concentration 3-4 times higher.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Barber E.M., Ogilvie J.R. (1982) - "Incomplete mixing in ventilated airspaces. Part I. Theoretical considerations" *Can. Agric. Eng.*, 24, (1), 25-29.
- 2) Barber E.M., Ogilvie J.R. (1984) - "Incomplete mixing in ventilated airspaces. Part II. Scale model study" *Can. Agric. Eng.*, 26, (2), 189-196.
- 3) Boon C.R. (1978) - "Airflow patterns and temperature distribution in an experimental piggery" *J. Agric. Engng. Res.*, (23), 129-139.
- 4) Breum N.O., Takai H., Rom H.B. (1990) - "Upward vs. downward ventilation air flow in a swine house" *Transactions of the ASAE*, 33, (5), 1693-1699.
- 5) Candura A., Gusman A. (1971) - "La ventilazione dei fabbricati per allevamenti zootecnici" *Genio Rurale*, 34, (7-8), 17-42.
- 6) Chiappini U. (1989) - "Tabelle A.I.G.R. per la climatizzazione dei ricoveri zootecnici" *Genio Rurale*, 52, (6), 46-49.
- 7) Choi H.L., Albright L.D., Timmons M.B., Warhaft Z. (1988) - "An application of the k-epsilon turbulence model to predict air distribution in a slot-ventilated enclosure" *Transactions of the ASAE*, 31, (6), 1804-1814.
- 8) Choi H.L., Albright L.D., Timmons M.B. (1990) - "An application of the k-epsilon turbulence model to predict how a rectangular obstacle in a slot-ventilated enclosure affects air flow" *Transactions of the ASAE*, 33, (1), 274-281.
- 9) De Praetere K., Van Der Biest W. (1989) - "Airflow patterns and their relation to ammonia distribution" *Proceedings of the 11th International Congress on Agricultural Engineering, Dublino (Irlanda)*, 4-8 Settembre 1989, Vol. 2, 1457-1463.
- 10) De Praetere K., Van Der Biest W. (1990) - "Airflow patterns in piggeries with fully slatted floors and their effect on ammonia distribution" *J. Agric. Engng. Res.*, (46), 31-44.
- 11) Hoff S.J., Janni K.A., Jacobson L.D. (1992) - "Three-dimensional buoyant turbulent flows in a scaled model, slot-ventilated, livestock confinement facility" *Transactions of the ASAE*, 35, (2), 671-686.
- 12) Leonard J.J., Mc Quitty J.B. (1986) - "Archimedes number criteria for the control of cold ventilation air jets" *Can. Agric. Eng.*, 28, (2), 117-123.
- 13) Maghirang R.G., Manbeck H.B., Puri V.M. (1990) - "Numerical study of air contaminant distribution in livestock buildings" *ASAE Paper N° 90-4543*, ASAE, St. Joseph, Michigan, Usa.
- 14) Maghirang R.G., Manbeck H.B. (1991) - "Air contaminant distributions in a commercial laying house" *Transactions of the ASAE*, 34, (5), 2171-2180.
- 15) Maghirang R.G., Manbeck H.B. (1993) - "Modeling particle transport in slot-inlet ventilated airspaces" *Transactions of the ASAE*, 36, (5), 1449-1459.
- 16) Manera C., Picuno P., Margiotta S., Freschi P. (1993) - "L'influenza della ventilazione e della gestione delle deiezioni sull'inquinamento atmosferico e sulle produzioni ottenute in allevamenti suinicoli intensivi" *Atti del V Convegno Nazionale A.I.G.R., Maratea (PZ)*, 7-11 Giugno 1993.
- 17) Navarotto P. (1993) - "Microclima e consumi idrici, due aspetti importanti" *Rivista di Suinicoltura*, 34, (1), 23-43.
- 18) Picuno P. (1993) - "Analisi fluidodinamica del sistema di ventilazione nei fabbricati zootecnici" *Atti del V Convegno Nazionale A.I.G.R., Maratea (PZ)*, 7-11 Giugno 1993.
- 19) Randall J.M. (1975) - "The prediction of airflow patterns in livestock buildings" *J. Agric. Engng. Res.*, (20), 199-215.
- 20) Randall J.M., Battams V.A. (1976) - "The observed influence of surface obstructions on the airflow pattern within livestock buildings" *J. Agric. Engng. Res.*, (21), 33-39.
- 21) Randall J.M., Battams V.A. (1979) - "Stability criteria for airflow patterns in livestock buildings" *J. Agric. Engng. Res.*, (24), 361-374.
- 22) Scarascia Mugnozza G., Manera C., Fiume G. (1990) - "L'emissione di inquinanti atmosferici nei fabbricati per l'allevamento intensivo dell'agnello da carne" *Genio Rurale*, 53, (11), 27-34.