

UNIVERSITAT DE LLEIDA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRÀRIA

TESI DOCTORAL

**ESTUDI DE LA VENTILACIÓ NATURAL PER EFECTE TÈRMIC
EN HIVERNACLES, MITJANÇANT TÈCNIQUES DE
VISUALITZACIÓ DE FLUIDS EN MODELS A ESCALA**

JOAN OCA I BARADAD

Lleida, Setembre de 1996

UNIVERSITAT DE LLEIDA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRÀRIA

TESI DOCTORAL

ESTUDI DE LA VENTILACIÓ NATURAL PER EFECTE TÈRMIC
EN HIVERNACLES, MITJANÇANT TÈCNIQUES DE
VISUALITZACIÓ DE FLUIDS EN MODELS A ESCALA

Tesi presentada per optar al grau de Doctor Enginyer Agrònom, dirigida pel Dr. Juan Ignacio Montero, Investigador de l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries i tutorada pel Dr. Javier Barragan, Catedràtic de la Universitat de Lleida.

El doctorand

Joan Oca i Baradad

El director de la tesi

Juan Ignacio Montero Camacho

Lleida, Setembre de 1996

Agraïments

La realització d'aquesta tesi ha estat possible gràcies al finançament aportat per l'"Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias" al projecte "Análisis de la ventilación natural de los invernaderos: efecto de la forma y tamaño de las ventanas y de la resistencia del cultivo en el proceso de renovación del aire" de l'"Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries".

Vull expressar el meu agraïment al Doctor Juan Ignacio Montero, director d'aquesta tesi, per la seva ajuda al llarg de tot el procés de discussió i realització del present treball, així com al Doctor Javier Barragán per la seva tasca com a tutor.

Agraïco al personal del Departament de Tecnologia Hortícola del centre de l' I.R.T.A. de Cabrils i en especial a Assumpció Antón la seva col·laboració al llarg de tot el procés experimental. Al doctor Daniel Crespo, del Departament de Física Aplicada de la Universitat Politècnica de Catalunya, els seus suggeriments i ajuda. Als companys de la "Escola Superior d'Agricultura de Barcelona" el seu recolzament i en particular, a la doctora Trinitat Pradell la seva ajuda en els temes de conducció de calor a través del sòl i a Jordi Valero el seu suport en la part estadística.

Finalment, vull donar les gràcies a la meva dona Dolors i als meus fills Gemma i Miquel per la seva comprensió i pel suport que en tot moment m'han donat.

ÍNDEX

RESUM / RESUMEN / SUMMARY.....	VII
I. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS.....	1
I.1. Introducció.....	1
I.2. Objectius.....	2
I.3. Organització de la Tesi.....	3
II. ANTECEDENTS.....	5
II.1. Balanç tèrmic i renovació d'aire en un hivernacle.....	5
II.2. Ventilació natural.....	7
II.2.1. Efecte eòlic.....	8
II.2.2. Efecte tèrmic.....	10
II.2.2.1. Teoria de la ventilació natural per efecte tèrmic.....	11
II.2.2.1.1. Càlcul de l'alçada del pla neutre de pressions.....	13
II.2.2.1.2. Càlcul del flux volumètric.....	15
II.2.2.2. Tècniques experimentals utilitzades en l'estudi de la ventilació natural per efecte tèrmic.....	19
II.2.2.2.1. Assaigs a escala real.....	19
II.2.2.2.2. Assaigs amb models a escala.....	22
II.2.2.2.2.1. Models que utilitzen aire com a fluid.....	25
II.2.2.2.2.2. Models que utilitzen aigua com a fluid.....	26
II.2.2.3. Utilització de mètodes numèrics per l'estudi de la ventilació natural per efecte tèrmic.....	30
II.2.3. Combinació dels efectes tèrmic i eòlic en l'intercanvi d'aire.....	33
II.3. Tècniques experimentals de visualització de fluids.....	35
II.4. Tècniques escollides per abordar el cas d'estudi.....	38

III. EQUIPAMENT INSTRUMENTAL.	39
III.1. Equipament per als assaigs de laboratori.	39
III.1.1. Models a escala i tanc d'aigua	40
III.1.2. Sistema d'il·luminació.	42
III.1.3. Injecció de sals i colorants	43
III.1.4. Control de la conductivitat elèctrica.	44
III.1.5. Equip per l'adquisició i tractament de les imatges.	46
III.2. Equipament per als assaigs de camp.	47
III.2.1. Hivernacle.	48
III.2.2. Control de temperatures i radiació.	48
IV. MÈTODE EXPERIMENTAL.	50
IV.1. Simulació física del flux amb el model a escala.	50
IV.2. Lleis d'escala.	51
IV.3. Visualització del flux i obtenció de les imatges digitalitzades.	55
IV.4. Relació entre la distribució d'increments d'intensitat de gris de les imatges i la d'increments de densitat relativa.	56
IV.4.1. Increments d'intensitat de gris vs. concentració de colorant.	57
IV.4.2. Increments d'intensitat de gris vs. conductivitat elèctrica.	58
IV.5. Processat digital i anàlisi de les imatges obtingudes.	59
IV.6. Plantejament d'un model teòric per l'estimació dels increments de temperatura esperats.	62
IV.7. Mesura dels fluxos de calor i dels increments de temperatura en els assaigs de camp.	64

V. RESULTATS I DISCUSSIÓ.	67
V.1. Atenuació de la llum en funció de la concentració de colorant.	67
V.2. Assaigs de laboratori amb models d'hivernacle-túnel.	71
V.2.1. Relació entre els increments de conductivitat elèctrica i d'intensitat de gris.	72
V.2.2. Distribució dels valors de θ a les seccions transversals.	73
V.2.3. N° de Reynolds amb el que s'ha realitzat cada assaig.	78
V.2.4. Distribució de freqüències dels valors de θ de cada secció.	81
V.2.5. Característiques del flux als hivernacles-túnel: influència de Re	82
V.2.6. Formulació de la metodologia per la determinació "a priori" de les condicions experimentals necessàries.	83
V.3. Model teòric.	86
V.3.1. Increments de temperatura: Correspondència dels resultats de laboratori amb el model teòric.	86
V.3.2. Importància relativa de les pèrdues de calor a través de la coberta.	87
V.4. Assaigs de camp.	88
V.4.1. Fluxos de calor i increments de temperatura.	88
V.4.2. Correspondència dels resultats de laboratori amb els de camp i els del model teòric.	92
V.5. Assaigs de laboratori amb altres models d'hivernacle.	93
V.5.1. Hivernacle-túnel amb una sola finestra lateral.	93
V.5.2. Hivernacle multi-túnel.	96
VI. CONCLUSIONS.	101
VII. Bibliografia.	104

RESUM

L'objectiu del present treball de tesi s'explica al capítol I i consisteix en la posta a punt d'un mètode de laboratori que permeti, utilitzant models a escala i mitjançant tècniques de visualització de fluids i de digitalització i tractament d'imatges, l'estudi dels mecanismes de ventilació natural en els hivernacles en condicions d'absència de vent.

Al capítol II es fa una exposició dels fonaments teòrics de la ventilació natural, centrada especialment en l'estudi de l'efecte tèrmic. Es descriuen les diferents tècniques experimentals que poden ser utilitzades per al seu estudi, ja siguin a escala real o mitjançant la utilització de models a escala i en aquest darrer cas, diferenciant entre les que utilitzen aire i les que utilitzen aigua com a fluid de treball. Es fa també una breu introducció a la utilització de mètodes numèrics per l'estudi de la ventilació, així com a les tècniques experimentals més utilitzades per a la visualització de fluids. Finalment, s'indiquen les tècniques escollides per desenvolupar el mètode de laboratori objecte d'aquest treball, que consistiran en la utilització de models a escala utilitzant aigua com a fluid de treball i afegint sal per produir les diferències de densitat que serien les responsables de la ventilació per efecte tèrmic; la visualització del fluid s'aconseguirà mitjançant l'addició de colorant i les tècniques de digitalització i tractament d'imatges ens permetran quantificar les variables físiques d'interès, que seran interpretades mitjançant l'anàlisi dels criteris de semblança.

L'equipament instrumental necessari tant per la simulació física del flux com per la seva visualització, obtenció d'imatges digitalitzades i processat i anàlisi d'aquestes es descriu en el capítol III i consisteix, esquemàticament, en un tanc d'aigua transparent en el que s'introdueixen les maquetes bidimensionals de l'hivernacle en posició invertida, un equip per la injecció de la solució salina i el colorant a l'interior de la maqueta, un conductímetre que permet mesurar de forma contínua la conductivitat elèctrica en un punt fix d'aquesta i enregistrar els valors obtinguts en un data-logger, una vídeo cambra amb el corresponent magnetoscopi i un ordinador personal equipat amb una targeta digitalitzadora d'imatges i amb el software adient per al processat i anàlisi de les imatges. Per als assaigs de camp s'ha construït un hivernacle a escala real, de característiques similars als utilitzats en els assaigs de laboratori, situat a l'interior d'un hivernacle de dimensions molt superiors per tal d'eliminar l'efecte eòlic; en el seu interior s'han instal·lat dos sensors de radiació neta, dues columnes de sensors per determinar la temperatura de l'aire i sensors per determinar la temperatura del sòl a diferents fondàries.

El mètode experimental de laboratori es descriu amb detall en el capítol IV i consisteix en introduir la solució salina amb el colorant a través d'orificis practicats en el "sòl" del model a escala, de forma que el flux descendent provocat per la solució salina, de densitat superior a la de l'aigua del tanc, simuli el flux de flotabilitat provocat per l'escalfament de l'aire al seu contacte amb el terra, calent per l'acció de la radiació solar. S'analitzen les lleis d'escala i es defineix el paràmetre adimensional (θ) que ens permet interpretar els increments de temperatura que correspondrien, a escala real, als increments relatius de densitat obtinguts en els experiments. S'indiquen també les tècniques utilitzades per l'obtenció de les imatges digitalitzades i el seu posterior processat i anàlisi i s'estudia la relació existent entre els increments d'intensitat de gris obtinguts en punts homòlegs de diferents imatges d'un mateix experiment i les concentracions de colorant dels punts esmentats; en ser menyspreable en tots els experiments l'efecte de la difusivitat tant de la sal com del colorant, podem establir la

relació existent entre els increments d'intensitat de gris observats en cada punt (píxel) de les imatges capturades i els increments de densitat corresponents. Es planteja un assaig específic per conèixer amb precisió la relació esmentada.

En el mateix capítol, a fi i efecte d'obtenir, amb procediments diferents, resultats que puguin ésser contrastats amb els obtinguts amb el mètode de laboratori proposat, es planteja un model teòric que permet predir els increments de temperatura esperats en funció de les característiques geomètriques de l'hivernacle i de les condicions exteriors. Amb la mateixa finalitat, es proposen assaigs de camp destinats a fer una estimació dels fluxos de calor existents en hivernacles de característiques similars als utilitzats en els assaigs de laboratori i mesurar els increments de temperatura que en aquests es produeixen.

Els resultats obtinguts en els diferents tipus d'assaigs s'agrupen en el capítol V, on en primer lloc s'indica la relació obtinguda entre la concentració de colorant i l'increment d'intensitat de gris de les imatges, que és de tipus exponencial, si bé en aquells casos en que la disminució de la intensitat de gris sigui inferior al 35% pot establir-se una relació de tipus lineal. En els assaigs de laboratori realitzats amb maquetes a diferents escales d'un mateix tipus d'hivernacle, s'obté la distribució dels valors de θ en les seccions transversals dels diferents assaigs, es fa una descripció de les característiques del flux i s'estableix el número de Reynolds a partir del qual les característiques del flux seran independents de la viscositat, que per la geometria estudiada es situa al voltant de 900. Es formula la metodologia per l'elecció de les condicions experimentals adients (escala de longituds i cabal, increment relatiu de densitat i concentració de colorant de la solució salina) que ens permetin aconseguir, d'una banda, una simulació realista de les característiques del flux i d'altra banda, que els resultats dels experiments ens surtin dins d'un rang de valors que faciliti al màxim la seva interpretació.

En el mateix capítol es presenten els resultats obtinguts de l'aplicació del model teòric proposat i dels assaigs de camp realitzats, així com la comparació d'aquests amb els obtinguts en els assaigs de laboratori, no observant-se desviacions importants entre els increments de temperatura obtinguts pels diferents procediments. Finalment es presenten els resultats obtinguts en assaigs de laboratori realitzats amb altres models d'hivernacles de geometries diferents a la utilitzada com a referència per la posta a punt del mètode, indicant-se en cada cas la distribució dels valors del paràmetre adimensional θ ; en el cas dels hivernacles multi-túnel, tot i que per limitacions en les dimensions del dispositiu experimental no s'arriba a assolir les condicions necessàries per obtenir una simulació realista del flux, s'observa un comportament d'aquest força diferent d'aquell que seria previsible per aplicació de la teoria de l'eix neutre.

El capítol VI és el dedicat a les conclusions, al mateix temps que s'indiquen alguns suggeriments de cara a la futura continuació de la recerca.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de tesis se explica en el capítulo I y consiste en la puesta a punto de un método de laboratorio que permita, utilizando modelos a escala y mediante técnicas de visualización de fluidos y digitalización y tratamiento de imágenes, el estudio de los mecanismos de ventilación natural en los invernaderos en condiciones de ausencia de viento.

En el capítulo II se hace una exposición de los fundamentos teóricos de la ventilación natural, centrada especialmente en el estudio del efecto térmico. Se describen las diferentes técnicas experimentales que pueden ser utilizadas para su estudio, ya sean a escala real o mediante la utilización de modelos a escala y en este último caso, diferenciando entre las que utilizan aire y las que utilizan agua como fluido de trabajo. Se hace también una breve introducción a la utilización de métodos numéricos para el estudio de la ventilación, así como a las técnicas experimentales más utilizadas para la visualización de fluidos. Finalmente, se indican las técnicas elegidas para desarrollar el método de laboratorio objeto de este trabajo, que consistirán en la utilización de modelos a escala empleando agua como fluido de trabajo y añadiendo sal para producir las diferencias de densidad que serían las responsables de la ventilación por efecto térmico; la visualización del fluido se conseguirá mediante la adición de colorante y las técnicas de digitalización y tratamiento de imágenes nos permitirán cuantificar las variables físicas de interés, que serán interpretadas mediante el análisis de los criterios de semejanza.

El equipo instrumental necesario tanto para la simulación física del flujo como para su visualización, obtención de imágenes digitalizadas y procesado y análisis de estas se describe en el capítulo III y consiste, esquemáticamente, en un tanque de agua transparente en el que se introducen las maquetas bidimensionales del invernadero en posición invertida, un equipo para la inyección de la solución salina y el colorante en el interior de la maqueta, un conductímetro que permite medir de forma continua la conductividad eléctrica en un punto fijo de esta y registrar los valores obtenidos en un data-logger, una vídeo cámara con el correspondiente magnetoscopio y un ordenador personal equipado con una tarjeta digitalizadora de imágenes y con el software apropiado para el procesado y análisis de las imágenes. Para los ensayos de campo se ha construido un invernadero a escala real, de características similares a los utilizados en los ensayos de laboratorio, situado en el interior de un invernadero de dimensiones muy superiores para eliminar el efecto eólico; en su interior se han instalado dos sensores de radiación neta, dos columnas de sensores para determinar la temperatura del aire y sensores para determinar la temperatura del suelo a distintas profundidades.

El método experimental de laboratorio se describe con detalle en el capítulo IV y consiste en introducir la solución salina con el colorante a través de orificios practicados en el "suelo" del modelo a escala, de forma que el flujo descendente provocado por la solución salina, de densidad superior a la del agua del tanque, simule el flujo de flotabilidad provocado por el calentamiento del aire en su contacto con el suelo, caliente por la acción de la radiación solar. Se analizan las leyes de escala y se define el parámetro adimensional (θ) que nos permite interpretar los incrementos de temperatura que corresponderían, a escala real, a los incrementos relativos de densidad obtenidos en los experimentos. Se indican también las técnicas utilizadas para la obtención de las imágenes digitalizadas y su posterior procesado y

análisis y se estudia la relación existente entre los incrementos de intensidad de gris obtenidos en puntos homólogos de diferentes imágenes de un mismo experimento y las concentraciones de colorante en dichos puntos; al ser despreciable en todos los experimentos el efecto de la difusividad tanto de la sal como del colorante, podemos establecer la relación existente entre los incrementos de intensidad de gris observados en cada punto (pixel) de las imágenes capturadas y los incrementos de densidad correspondientes. Se plantea un ensayo específico para conocer con precisión la citada relación.

En el mismo capítulo, con el fin de obtener, con procedimientos distintos, resultados que puedan ser contrastados con los obtenidos con el método de laboratorio propuesto, se plantea un modelo teórico que permite predecir los incrementos de temperatura esperados en función de las características geométricas del invernadero y de las condiciones exteriores. Con la misma finalidad, se proponen ensayos de campo destinados a hacer una estimación de los flujos de calor existentes en invernaderos de características similares a los utilizados en los ensayos de laboratorio y medir los incrementos de temperatura que en estos se producen.

Los resultados obtenidos en los distintos tipos de ensayo se agrupan en el capítulo V, en el que se indica, en primer lugar, la relación obtenida entre la concentración de colorante y el incremento de intensidad de gris de las imágenes, que es de tipo exponencial, si bien en aquellos casos en que la disminución de la intensidad de gris sea inferior al 35% puede establecerse una relación de tipo lineal. En los ensayos de laboratorio realizados con maquetas a distintas escalas de un mismo tipo de invernadero, se obtiene la distribución de los valores de θ en las secciones transversales de los distintos ensayos, se describen las características del flujo y se establece el número de Reynolds a partir del cual las características del flujo serán independientes de la viscosidad, que para la geometría estudiada se sitúa alrededor de 900. Se formula la metodología para la elección de las condiciones experimentales adecuadas (escala de longitudes y caudal, incremento relativo de densidad y concentración de colorante de la solución salina) que nos permitan conseguir, por un lado, una simulación realista de las características del flujo y por otro lado, que los resultados de los experimentos nos salgan dentro de un rango de valores que facilite al máximo su interpretación.

En el mismo capítulo se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del modelo teórico propuesto y de los ensayos de campo realizados, así como la comparación de estos con los obtenidos en los ensayos de laboratorio, no observándose desviaciones importantes entre los incrementos de temperatura obtenidos por los distintos procedimientos. Finalmente se presentan los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio realizados con otros modelos de invernadero de geometrías distintas a la utilizada como referencia para la puesta a punto del método, indicándose en cada caso la distribución de los valores del parámetro adimensional θ ; en el caso de los invernaderos multi-túnel, a pesar de que por limitaciones en las dimensiones del dispositivo experimental no se llegan a alcanzar las condiciones necesarias para obtener una simulación realista del flujo, se observa un comportamiento de este muy distinto del que sería previsible por aplicación de la teoría del eje neutro.

El capítulo VI es el dedicado a las conclusiones, al mismo tiempo que se indican algunas sugerencias con vistas a la futura continuación de la investigación.

SUMMARY

The aim of the present work is explained in chapter I and consists in setting up a laboratory method that permits, using scale models and through fluid visualization and digital image processing, the study of the natural ventilation mechanisms in greenhouses without a wind effect.

In chapter II, the theoretical basis of natural ventilation is developed, focusing mainly on the study of the thermic effect. Different experimental techniques are described, which may be used for its study, both at full scale or using scale models, and in that last case distinguishing between those using air and those using water as a work fluid. A short introduction on the utilization of numerical methods for the study of ventilation, as well as the most frequently used experimental techniques in fluid visualization is presented. Finally, the chosen techniques to develop the laboratory method subject of the present work are indicated. They consist in the utilization of scale models employing water as a work fluid and adding salt to produce the density differences which are responsible of ventilation by thermic effect. Fluid visualization is achieved by means of dye addition. Digital image processing allows to quantify physical variables of interest. Data are analyzed using similarity criteria.

Instrumental equipment needed for physical flow simulation as well as visualization, digital image processing and analysis is described in chapter III. It basically includes a clear water tank where bidimensional greenhouses scale models are sunk upside-down, a flow pump to inject salty solution and dye inside the model, a conductivity meter measuring continuously at a fixed point of the cross section with a data logger connected to it, a video camera with the corresponding magnetoscope, and a personal computer equipped with an image digitizing card and a software package to process and analyze images. For the field trials, a full scale greenhouse was built up with similar features to those used in laboratory trials, placed inside a much bigger greenhouse in order to avoid the wind effect. Two net radiation sensors were located inside the greenhouse, as well as two sensor columns to measure air temperature and sensors to determine soil temperatures at different depths.

The laboratory method is described with detail in chapter IV. It consists in distributing the salt solution, with the dye, through a set of small holes made in the floor of the scale greenhouse. Thus, the descending flow produced by the saline solution, of density higher than the tank water, simulates the buoyancy flux due to the heating of the greenhouse air in contact with the soil surface, whose temperature is warmer than the surrounding air due to the action of solar radiation. Scale laws are used and a dimensionless parameter (θ) is defined in order to convert relative density differences from the scale models into temperature differences in the full scale situation. Techniques used to obtain digitized images are also indicated, as well as their further processing and analysis. The existing relationship between increments of grey intensities obtained at corresponding points of different images from the same experiment, and the dye concentrations at those points are studied. Assuming that salt and dye diffusivity effect is negligible in all experiments, the relationship between grey intensity increments observed at each point (pixel) of the captured images and the corresponding density increments can be established.

In the same chapter, different methods are proposed in order to obtain results that may be faced to those recorded with the trained laboratory method. A theoretical model is proposed in order to predict the expected temperature increments as a function of geometric characteristics of the greenhouse under different external conditions. With the same goal,

field trials with greenhouses of similar features to those employed in the laboratory assays are proposed in order to estimate heat fluxes and to measure temperature increments produced inside them.

Results obtained in different types of trials are grouped in chapter V, which points out, in the first place, the relationship obtained between dye concentration and grey intensity increment of images, which results to be exponential. However, in those cases where the reduction of grey intensity is less than 35%, a linear relationship may be established. In all field trials carried out with the same type of greenhouse models at different scales, a distribution of θ values in transversal sections of each assay is obtained. Characteristics of fluxes are described. Different experiments are carried out in order to estimate the minimal Reynolds number which allows to neglect viscosity effects. For the shape of greenhouse under study, the minimum Re number to be maintained is determined to be close to 900. A methodology to select the optimal experimental conditions is formulated (length scale, and flow, relative density increment and dye concentration of the salty solution) in order to obtain, on one side, a realistic simulation of flow characteristics and, on the other side, results fall into a range of values which enable an easy interpretation.

In the same chapter, results obtained from the proposed theoretical model and the field trials developed are presented, as well as the comparison with those obtained in the laboratory. Agreement between the results obtained by the different methods is satisfactory. Finally, results obtained in laboratory assays carried out with greenhouse models of other shapes, different from the one used as a reference for adjusting the method, are presented. In each case distribution of θ values are indicated. In the case of the multitunnel greenhouses, dimensions of experimental device do not permit to achieve the required conditions to obtain a realistic flow simulation; despite this fact, the observed behaviour is very different from the one expected by application of neutral level theory.

Chapter VI is devoted to conclusions, as well as some suggestions for aims of future research are pointed out.

I. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

I.1. Introducció

La construcció d'un hivernacle implica sempre una modificació molt important del medi físic interior, amb el que es pretén protegir el cultiu de les adversitats climàtiques així com augmentar les seves produccions. Aquesta capacitat de modificar les condicions interiors implica també la necessitat de conèixer el comportament de les condicions ambientals de l'hivernacle en funció del clima exterior per tal de facilitar el seu maneig, així com preveure les condicions extremes que es poden produir i que poden arribar a impedir el correcte desenvolupament d'alguns cultius.

A les àrees meridionals, amb alts nivells de radiació solar, les altes temperatures assolides als hivernacles durant els períodes estivals, esdevenen sovint un factor limitant determinant a l'hora de decidir els cultius que podem dur a terme al seu interior.

La ventilació natural és el procediment més efectiu per aconseguir reduir els increments de temperatura de l'hivernacle respecte l'exterior, a base d'aconseguir un important número de renovacions d'aire amb un cost energètic quasi nul, però implica normalment una major complexitat en l'estructura de l'hivernacle i en els mecanismes per la seva regulació. La ventilació forçada implicaria una despesa energètica molt important per aconseguir el mateix número de renovacions i al mateix temps sol generar corrents d'aire internes amb la conseqüent manca d'homogeneïtat en les condicions microclimàtiques dels cultius.

L'intercanvi d'aire entre l'interior i l'exterior de l'hivernacle, a més de modificar el balanç d'energia, i per tant la temperatura de l'aire, també afecta al contingut de vapor d'aigua i d'anhídrid carbònic.

Els factors més rellevants dels que depèn la ventilació natural d'un hivernacle determinat són la velocitat del vent exterior (efecte eòlic) i la diferència de temperatures entre l'interior i l'exterior de l'hivernacle (efecte tèrmic). Tot i que en les condicions de camp més habituals l'efecte eòlic és el dominant en la ventilació natural (Bot 1983, Brockett i Albright 1987, Kittas i cols. 1995), les condicions més desfavorables es donen quan la velocitat del vent és nul·la i l'efecte tèrmic és el responsable de la ventilació natural, el que fa especialment interessant el seu estudi des del punt de vista del disseny d'estructures d'hivernacles.

Diferents autors han modelitzat la ventilació natural dels hivernacles, emprant mètodes experimentals de camp per tal de determinar la taxa de renovació, els coeficients de descàrrega i els de vent. Aquests mètodes comporten un cost econòmic molt gran per obtenir mesures fiables, al mateix temps que ens permeten estudiar tan sols un número de possibilitats de disseny molt limitat. A més, les condicions de vent en aquests assaigs són imprevisibles i molt variables.

Un altre tret característic de la major part de treballs experimentals sobre la ventilació natural d'hivernacles és que solen centrar el seu interès en la determinació del número de renovacions aconseguit en unes condicions ambientals donades, sense aportar informació referent a la circulació de l'aire a l'interior de l'hivernacle ni al grau de barreja entre l'aire circulant per les finestres i l'aire interior.

I.2. Objectius

El treball realitzat té com a objectiu principal la posta a punt d'un mètode de laboratori que permeti, utilitzant models a escala i mitjançant tècniques de visualització de fluids i de digitalització i tractament d'imatges, l'estudi dels mecanismes de ventilació natural en els hivernacles en condicions d'absència de vent. Aquest objectiu principal es concreta en els següents objectius específics:

- 1.- Construir un dispositiu experimental de laboratori que permeti la simulació del flux de ventilació per efecte tèrmic amb models a escala, així com la visualització del flux esmentat.

- 2.- Establir un procediment que permeti quantificar els paràmetres físics d'interès en els models a escala a partir de la visualització del flux i ajudant-se de les tècniques de digitalització, processat i anàlisi d'imatges.
- 3.- Establir les condicions experimentals necessàries per obtenir una simulació realista del flux per un tipus d'hivernacle determinat.
- 4.- Fixar les limitacions i l'àmbit d'aplicació del mètode de laboratori proposat.

I.3. Organització de la Tesi

Després de la present introducció que constitueix el Capítol I, s'inicia el Capítol II realitzant una exposició dels fonaments teòrics de la ventilació natural, al mateix temps que es fa un recull dels diferents mètodes utilitzats per estudiar-la. En el mateix capítol, es descriuen algunes tècniques de visualització utilitzades per l'estudi experimental dels fluids i s'indiquen les que seran utilitzades concretament en aquest treball.

En els Capítols III i IV es descriu el mètode de laboratori proposat i l'equipament instrumental necessari tant per aconseguir la simulació física del flux com la visualització d'aquest i l'obtenció i tractament d'imatges. S'estableixen les lleis d'escala que ens han de permetre interpretar i quantificar els resultats obtinguts i s'indica el procediment utilitzat per establir la relació entre els paràmetres òptics de les imatges obtingudes i els paràmetres físics d'interès. Així mateix, es descriu el mètode i l'instrumental utilitzat en els assaigs de camp per mesurar els fluxos de calor i els increments de temperatura en un hivernacle a escala real, similar als utilitzats en els assaigs de laboratori i es planteja un model teòric per la determinació dels increments de temperatura esperats a partir d'unes condicions ambientals donades. Els assaigs de camp i el model teòric plantejat ens han de permetre contrastar els resultats obtinguts als assaigs de laboratori.

Al Capítol V es presenten els resultats obtinguts als assaigs de laboratori realitzats amb un tipus determinat d'hivernacle túnel que s'ha agafat com a geometria de referència, així com els obtinguts als assaigs de camp i amb l'aplicació del model teòric plantejat al capítol anterior. S'estableixen les condicions necessàries per obtenir una simulació realista del flux en el tipus d'hivernacle estudiat i es contrasten els resultats obtinguts amb els diferents procediments. Finalment, s'indiquen i discuteixen els resultats obtinguts en assaigs de laboratori realitzats amb models d'hivernacles diferents a l'estudiat anteriorment.

El Capítol VI és el dedicat a les conclusions i perspectives futures d'aplicació i de desenvolupament del mètode de laboratori proposat.

II. ANTECEDENTS

II.1. Balanç tèrmic i renovació d'aire en un hivernacle

L'intercanvi d'aire entre l'interior i l'exterior d'un hivernacle és un procés que afecta de forma molt important al balanç energètic interior i per tant a la temperatura de l'aire, així com al balanç dels components de l'aire de l'hivernacle i al contingut de vapor d'aigua. La seva quantificació és indispensable per a l'estudi del clima interior d'un hivernacle, havent centrat el interès tant d'aquells autors que han intentat estimar les pèrdues no desitjades d'aire per infiltració en hivernacles amb calefacció (Okada i Takakura 1972, Rùther 1985, Jolliet 1988 i 1991) com d'aquells que han mirat de proposar models per ser utilitzats en el control automàtic de l'ambient interior d'un hivernacle, considerant el fenomen de la ventilació (Kozai, Sase i Nara 1980, Bot 1983, Udink ten Cate 1983)

Kittas (1980) va proposar un model empíric d'estimació de la temperatura espontània de l'aire en període diürn que pot ser considerat com una representació simplificada del balanç d'energia, pel cas particular d'un hivernacle amb el sòl nu i sec:

$$T_i = T_o + \frac{a \cdot G + b \cdot D_G + c}{1 + d \cdot u^{0,8} + e \cdot N} \quad (\text{II.1})$$

on T_i i T_o són les temperatures interior i exterior, G la radiació solar global a l'exterior, D_G la variació de G la darrera mitja hora, u la velocitat del vent 1 m per sobre de l'hivernacle i N la taxa de renovació horària; a , b , c , d i e són paràmetres d'ajust que cal determinar experimentalment.

Aquest mateix model empíric va ser utilitzat per Chiapale i col.(1984) per fer l'estimació de la taxa horària de renovació voluntària d'aire de l'hivernacle susceptible de mantenir per sota d'un cert valor l'increment de temperatura:

$$N = \frac{1}{e} \cdot \left[\frac{a \cdot G + b \cdot D_G + c}{\Delta T} - (1 + d \cdot u^{0,8}) \right] \quad (\text{II.2})$$

Si ens situem en les condicions més desfavorables possibles per tal de considerar la taxa de renovació d'aire per la que cal fer el dimensionament del sistema (N_{max}), considerarem condicions de vent nul ($u=0$) i depreciam el terme d'inèrcia $b \cdot D_G$, obtenint l'expressió:

$$N_{max} = \frac{1}{e} \cdot \left[\frac{a \cdot G_{max} + c}{\Delta T} - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

Quant l'hivernacle és cultivat, es pot considerar el fenomen de l'evapotranspiració multiplicant el paràmetre d'ajust " a " per un coeficient minorador que dedueixi el percentatge de calor latent de " $a \cdot G$ ". Kittas (1986) proposa per aquest coeficient el valor 0,56 en el cas d'un hivernacle on el cultiu no estigui sotmès a cap limitació en la seva alimentació hídrica.

Kozai i col.(1980) varen proposar un model que permetia predir la taxa de ventilació de l'hivernacle, així com l'increment interior de temperatura a partir de l'angle d'obertura de les finestres, velocitat i direcció del vent, radiació, etc... Aquest model utilitzava, d'una banda, l'equació de balanç de calor donada per Yabuki (1974), i d'altra banda les equacions que regeixen els intercanvis d'aire a través de les obertures de l'hivernacle en funció de les diferències de pressió provocades pel vent i per la diferència de temperatura, de les que en parlarem en els propers apartats. L'equació de balanç de calor utilitzada va ser:

$$N = \frac{1}{C_p \cdot \gamma_0} \cdot \left[\frac{a \cdot Rn \cdot (1 - \alpha)}{T_i - T_o} - B \cdot k \right] \cdot \frac{S_F}{V_G} \quad (\text{II.4})$$

On C_p és la capacitat calorífica de l'aire, γ_0 el pes específic de l'aire exterior, " a " el factor de correcció, Rn la radiació neta a la superfície de la coberta vegetal de l'hivernacle, α el ratio de flux de calor latent/radiació neta, T_i i T_o les temperatures interior i exterior, B el ratio àrea de

la superfície de l'hivernacle/àrea de sòl coberta, " k " és el coeficient de transmissió de calor del material de coberta, S_F l'àrea de sòl i V_G el volum de l'aire de l'hivernacle. La radiació neta s'expressa, simplement, multiplicant la radiació solar per la transmissivitat de la llum, despreciant per tant la radiació neta d'ona llarga emesa pel sòl.

Boulard i Baille (1993) i Montero i Antón (1994) han plantejat models més complexos a partir de l'estudi del balanç d'energia dels diferents elements de l'hivernacle (coberta, aire, cultiu, sòl). Aquests models permeten predir l'efecte combinat de diferents sistemes de refredament en el clima de l'hivernacle.

II.2. Ventilació natural

Les diferències de pressió entre les dues bandes d'una obertura que originen la ventilació natural, poden ser provocades: (a) per l'efecte del vent o (b) per la diferència de temperatura entre l'aire interior i exterior. Al referir-nos a la primera causa parlarem de "efecte eòlic", mentre que al referir-nos a la segona parlarem de "efecte tèrmic", sent aquest darrer el que serà objecte d'estudi en aquest treball.

Els mètodes utilitzats per l'estudi experimental de la ventilació natural han estat diversos. D'una banda, s'han realitzat estudis a escala real en els que s'acostuma a utilitzar la tècnica del gas traçador per mesurar, en diferents condicions de vent exterior i de diferències de temperatura la caiguda de la concentració del gas al llarg del temps i a partir d'aquesta la taxa de renovació d'aire. Altres autors han estudiat el fenomen utilitzant models a escala, en els que el fluid experimental podia ser aire o bé aigua, interpretant-se en cada cas els resultats obtinguts a partir de les lleis d'escala. Finalment, l'aparició d'ordinadors amb gran potència de càlcul ha permès, en alguns casos, utilitzar la modelització matemàtica per l'estudi de la ventilació natural.

II.2.1. Efecte eòlic

L'acció del vent sobre un edifici es tradueix en una determinada distribució de pressions sobre les superfícies exteriors d'aquest. Si ignorem el caràcter fluctuant d'aquesta distribució degut a la naturalesa turbulenta del vent i considerem els valors promitjos en el temps d'aquesta distribució de pressions, podem relacionar els increments de pressió ΔP sobre les diferents superfícies exteriors (respecte a la pressió baromètrica de referència) amb la velocitat de l'aire u a un nivell de referència determinat (ASHRAE 1985):

$$\Delta P = Kp \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \quad (\text{II.5})$$

on Kp és el coeficient adimensional de pressió superficial i ρ la densitat de l'aire.

Bruce (1975, llegit a Zhang 1989) va desenvolupar a partir de les consideracions anteriors una teoria de la ventilació deguda al vent en la que va definir un coeficient intern de pressió que venia determinat per la direcció del vent i per la configuració de l'edifici.

Les equacions que descriuen la ventilació deguda al vent eren:

$$\sum_{j=1}^n A_j \cdot \frac{|Kpe_j - Kpi|^{3/2}}{Kpe_j - Kpi} = 0 \quad (\text{II.6})$$

on A_j és l'àrea de les obertures i Kpe i Kpi els coeficients de pressió exteriors i interiors

Equació que deriva de l'equació de la continuïtat de volum i que és utilitzada iterativament per obtenir el coeficient intern de pressió. Aquest resultat permet calcular la taxa de ventilació a partir de les equacions:

$$V_{w_j} = \frac{|\Delta P|}{\Delta P} \cdot C \cdot \left(2 \cdot \frac{|\Delta P|}{\rho} \right)^{1/2} = C \cdot \frac{|Kpe_j - Kpi|^{3/2}}{Kpe_j - Kpi} \cdot u_{10} \quad (\text{II.7})$$

$$\Phi_{v,w} = \sum_{j=1}^n A_j^+ \cdot V_{w_j} \quad (\text{II.8})$$

on V_{w_j} és la velocitat de l'aire a les obertures, C el coeficient de descàrrega, u_{10} la velocitat del vent a deu metres d'altura, $\Phi_{v,w}$ el cabal volumètric i A_j^+ les àrees de les obertures d'entrada d'aire a l'edifici.

Existeix però un component no considerat en el plantejament anterior i que en molts casos esdevé el component principal que explica la ventilació per efecte eòlic. Aquest segon component és el degut a les fluctuacions turbulentes del vent que fan que les distribucions de pressió siguin també fluctuants (Bot 1985), el que dona lloc a diferències momentànies de pressió. L'amplitud d'aquestes fluctuacions serà també responsable de la renovació d'aire interior.

En comptes de considerar tota la complexitat d'aquest fenomen turbulent, Boulard i Baille (1995) consideren que un únic paràmetre (K_f) és capaç de descriure l'efecte de la pressió fluctuant del vent:

$$\Delta P' = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot K_f \cdot u^2 \quad (\text{II.9})$$

on $\Delta P'$ és la desviació estàndard de les fluctuacions de pressió en un interval de temps.

Fem notar que en el cas d'un edifici en que totes les finestres tinguin la mateixa orientació, aquest darrer efecte serà l'únic responsable de la ventilació, ja que K_p seria idèntic per totes les obertures. Així mateix, s'observa experimentalment (Gandemer i Biétry 1989, llegit a Boulard i Baille 1995) que els valors de K_f és mantenen força constants al variar l'orientació de l'edifici respecte la direcció del vent, mentre que els valors de K_p varien de forma molt important.

Com que tant ΔP com $\Delta P'$ depenen linealment de u^2 , podem considerar un coeficient K_w que combini els dos efectes exposats i que anomenarem coeficient de vent. Així, podrem calcular la diferència mitja de pressions entre l'interior i l'exterior en un interval de temps (ΔP_w) com:

$$\Delta P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot K_w \cdot u^2 \quad (\text{II.10})$$

En el cas que tinguem una sola finestra o bé diverses finestres d'identiques característiques, situació en la qual les diferències de pressió seran originades exclusivament per les fluctuacions turbulentes del vent, es considera que la meitat de l'àrea total d'obertura A_o s'utilitza per l'entrada d'aire i la meitat per la sortida (Papadakis 1994), podent-se calcular el flux volumètric com:

$$\Phi_{v,w} = C \cdot K_w^{1/2} \cdot u \cdot \frac{1}{2} \cdot A_o \quad (\text{II.11})$$

El problema en la utilització d'aquest coeficient global K_w és que es tracta d'un valor empíric, difícilment extrapolable. Boulard i Baille (1995), Kittas et al. (1995) constaten experimentalment una disminució significativa de K_w a l'augmentar la velocitat del vent. Resultat no considerat en el mètode proposat, el que fa pensar en la necessitat de millorar-lo.

II.2.2. Efecte tèrmic

L'estudi de l'efecte tèrmic en la ventilació dels hivernacles és l'objecte d'aquest treball, raó per la qual ens estendrem especialment en l'exposició de la teoria de la ventilació natural per efecte tèrmic així com en la descripció dels diferents mètodes utilitzats per l'estudi experimental d'aquesta i els resultats obtinguts.

Tota la teoria que es presenta en aquest apartat està desenvolupada emprant l'aproximació de Boussinesq, que consisteix en que totes les propietats del fluid, a excepció de la densitat, es consideren constants. Tanmateix, les variacions de la densitat es menyspreen sempre, excepte quan donen lloc a forces gravitacionals. Aquesta aproximació és assumida de forma generalitzada a la literatura sobre ventilació d'edificis.

II.2.2.1. Teoria de la ventilació natural per efecte tèrmic.

Diferents autors han exposat els fonaments teòrics de la ventilació natural per efecte tèrmic, així, Emswiler (1926) ja proposa el concepte de pla neutre de pressions, Brown i Solvason (1962) estudien la convecció natural a través d'obertures verticals en una paret, Bruce (1978) desenvolupa una teoria per la convecció natural a través d'obertures, que aplica a diferents casos freqüents en els edificis ramaders, Down i col.(1990) verifiquen experimentalment la teoria de Bruce, excepte en el cas en que el pla neutre intersecta l'obertura lateral. Timmons i col.(1984) desenvolupen nomogrames adimensionals a partir de la teoria de Bruce que simplifiquen la determinació dels ratios de ventilació sense una pèrdua important de precisió.

La convecció natural en un sistema en que dos volums estàtics i uniformes d'aire a diferent temperatura separats per una paret vertical amb una obertura rectangular va ésser estudiada per Brown and Solvason (1962). En la situació descrita, l'intercanvi és produït per la variació de la pressió hidrostàtica als dos costats de l'obertura. Es defineix un pla neutre de pressions, situat a una alçada h_0 en el qual la diferència de pressió induïda per la diferència de temperatura és igual a zero.

La pressió hidrostàtica a cada costat de l'obertura a una alçada h vindrà definida per les equacions:

$$\begin{aligned}P_1(h) &= P_0 + \rho_1 \cdot g \cdot (h_0 - h) \\P_2(h) &= P_0 + \rho_2 \cdot g \cdot (h_0 - h)\end{aligned}\tag{II.12}$$

on g és l'acceleració gravitacional i ρ_1, ρ_2 les densitats de l'aire a cada compartiment.

La diferència de pressions entre els dos costats de l'obertura a una mateixa alçada h serà:

$$P_1(h) - P_2(h) = (\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot (h_0 - h) = \Delta\rho \cdot g \cdot (h_0 - h)\tag{II.13}$$

per $\rho_1 > \rho_2$ la direcció del flux a un nivell de referència $h < h_0$ és del volum 1 al volum 2, mentre que a un nivell $h > h_0$ el flux és en sentit contrari.

Si despreciem els efectes de fricció a través de l'obertura, a partir de l'equació de Bernouilli tenim:

$$\Delta\rho \cdot g \cdot (ho - h) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (\text{II.14})$$

on V és la velocitat de l'aire a l'altura h

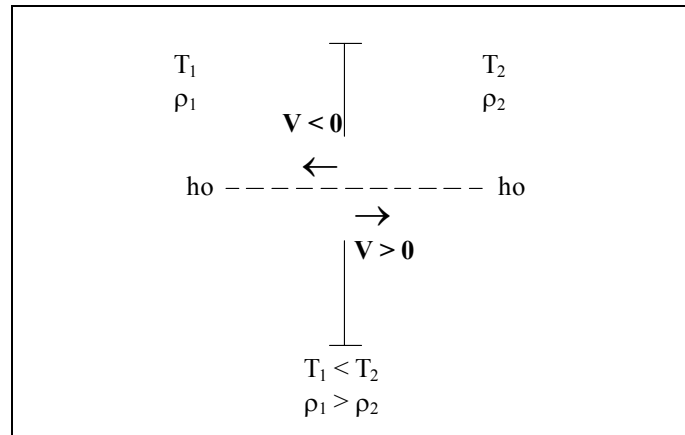


Fig. II.1: Conveni de signes utilitzat per la velocitat del flux de fluid en una obertura

Considerant que la velocitat del flux de fluid del costat més dens de l'obertura al menys dens té el mateix signe que $(ho-h)$ (veure figura II.1) i assumint que no hi ha gradient vertical de densitats, podem escriure:

$$V = \frac{|ho - h|}{ho - h} \cdot \left| 2 \cdot g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \right|^{1/2} \cdot |ho - h|^{1/2} \quad (\text{II.15})$$

Si tractem l'aire com a gas perfecte podem considerar, per pressió constant, $\Delta T/T \approx \Delta\rho/\rho$ i escriurem

$$V = \frac{|ho - h|}{ho - h} \cdot \left| 2 \cdot g \cdot \frac{\Delta T}{T} \right|^{1/2} \cdot |ho - h|^{1/2} \quad (\text{II.16})$$

II.2.2.1.1. Càlcul de l'alçada del pla neutre de pressions

Per determinar la situació del pla neutre, considerarem, a efectes de balanç de massa, que les densitats a ambdós costats de l'obertura són idèntiques, així, en tractar-se de volums tancats amb una sola obertura, el flux volumètric d'aire en un sentit haurà de ser igual al flux en sentit oposat:

$$\int_A V \cdot dA = 0 \quad (\text{II.17})$$

per tant:

$$\left| 2 \cdot g \cdot \frac{\Delta T}{T} \right|^{1/2} \cdot \int_A \frac{|ho - h|^{3/2}}{ho - h} \cdot dA = 0 \quad (\text{II.18})$$

simplificant, tenim:

$$\int_A \frac{|ho - h|^{3/2}}{ho - h} \cdot dA = 0 \quad (\text{II.19})$$

L'equació anterior ens ha de permetre calcular l'alçada del pla neutre "ho" sigui quina sigui la forma geomètrica de la finestra. així, en el cas d'una sola obertura rectangular d'alçada H i amplada L escriurem:

$$\int_0^H \frac{|ho - h|^{3/2}}{ho - h} \cdot L \cdot dh = 0 \quad (\text{II.20})$$

integrant tenim:

$$\frac{2}{3} \cdot \left(|ho - H|^{3/2} - ho^{3/2} \right) = 0 \quad (\text{II.21})$$

$$ho = \frac{H}{2} \quad (\text{II.22})$$

En el cas de dues obertures horitzontals d'àrees A_1 i A_2 situades en plans horitzontals ($h=cte.$) separats per una altura H , l'equació (II.19) l'escriurem:

$$\int_{A_1} \frac{|ho-h|^{3/2}}{ho-h} \cdot dA_1 + \int_{A_2} \frac{|ho-h|^{3/2}}{ho-h} \cdot dA_2 = 0 \quad (II.23)$$

integrant tenim:

$$\frac{|ho|^{3/2}}{ho} \cdot A_1 + \frac{|ho-H|^{3/2}}{ho-H} \cdot A_2 = 0 \quad (II.24)$$

com que $0 < ho < H$, tindrem

$$ho^{1/2} \cdot A_1 - (H-ho)^{1/2} \cdot A_2 = 0 \quad (II.25)$$

$$ho = H / \left(1 + \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right) \quad (II.26)$$

La localització del pla neutre en el cas d'una paret vertical amb N obertures rectangulars d'amplades L_i , alçades H_i i amb la base de les obertures a una alçada b_i sobre el pla de referència, l'obtindrem a partir de l'equació (II.19), que en aquest cas l'escriurem com.

$$\sum_{i=1}^N \int_{A_i} \frac{|ho-h|^{3/2}}{ho-h} \cdot dA_i = \sum_{i=1}^N \int_{b_i}^{b_i+H_i} \frac{|ho-h|^{3/2}}{ho-h} \cdot L_i \cdot dh = 0 \quad (II.27)$$

Que per integració ens donarà.

$$\sum_{i=1}^N L_i \cdot \left(|ho-b_i-H_i|^{3/2} - |ho-b_i|^{3/2} \right) = 0 \quad (II.28)$$

El mateix procediment l'utilitzem per la determinació del pla neutre en el cas d'obertures compostes, subdividint-les en diferents rectangles (Bruce 1978).

Si combinem les " N " obertures verticals rectangulars amb " M " obertures zenitals d'àrees A_j i altura constant sobre el mateix pla de referència anterior (H_z), escriurem:

$$\sum_{i=1}^N \int_{b_i}^{b_i+H_i} \frac{|ho-h|^{3/2}}{ho-h} \cdot L_i \cdot dh + \sum_{j=1}^M \int_{A_j} \frac{|ho-Hz|^{3/2}}{ho-Hz} \cdot dA_j = 0 \quad (\text{II.29})$$

En ser H_z constant tindrem:

$$\sum_{i=1}^N -L_i \cdot \frac{2}{3} \cdot \left(|ho-b_i-H_i|^{3/2} - |ho-b_i|^{3/2} \right) + \sum_{j=1}^M \frac{|ho-Hz|^{3/2}}{ho-Hz} \cdot A_j = 0 \quad (\text{II.30})$$

En ser les M obertures zenitals, sabem que $(ho-Hz) < 0$ i podem escriure:

$$\sum_{i=1}^N L_i \cdot \frac{2}{3} \cdot \left(|ho-b_i-H_i|^{3/2} - |ho-b_i|^{3/2} \right) + \sum_{j=1}^M (Hz-ho)^{1/2} \cdot A_j = 0 \quad (\text{II.31})$$

II.2.2.1.2. Càlcul del flux volumètric

Per obtenir el flux volumètric d'aire que surt de l'hivernacle $\Phi_{v,1}$ (que serà igual al flux entrant $\Phi_{v,2}$) n'hi haurà prou amb integrar $-V(h) \cdot L$ per l'àrea de finestra situada pel damunt del pla neutre, sent $V(h)$ la velocitat de l'aire, funció de l'alçada h , tal com ha estat definida a l'equació (II.16). Així, en el cas d'una sola obertura rectangular en una paret vertical el flux volumètric d'aire a través de la meitat superior de l'obertura serà:

$$\Phi_{v,1} = - \left| 2 \cdot g \cdot \frac{\Delta T}{T} \right|^{1/2} \cdot L \cdot \int_{ho}^{ho+\frac{H}{2}} \frac{|ho-h|^{3/2}}{ho-h} \cdot dh \quad (\text{II.32})$$

$$\Phi_{v,1} = \frac{L}{3} \cdot \left| g \cdot \frac{\Delta T}{T} \right|^{1/2} \cdot H^{3/2} \quad (\text{II.33})$$

Si considerem les pèrdues d'energia a través de l'obertura, introduïrem un coeficient de descàrrega C a l'equació anterior

$$\Phi_{v,1} = C \cdot \frac{L}{3} \cdot \left| g \cdot \frac{\Delta T}{T} \right|^{1/2} \cdot H^{3/2} \quad (\text{II.34})$$

Aquesta dissipació d'energia va ser estudiada per Bot (1983) per al cas d'obertures rectangulars amb ventilació forçada, en establir la relació entre els increments de pressió entre les dues bandes d'una obertura rectangular i el flux corresponent utilitzant models a escala, escollint números de Reynolds similars als utilitzats a escala real ($200 < Re < 21000$) i trobant que, en la regió de flux escollida, la importància de la viscositat era menor. Així, el flux era afectat principalment per la densitat de l'aire i per la forma de l'obertura, establint la relació:

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}^2} = F_0(L/H) \quad (\text{II.35})$$

\bar{V} = velocitat mitja a l'obertura

La funció $F_0(L/H)$ s'anomena factor de fricció de l'obertura i tot i que les condicions del flux per la convecció natural i forçada no són idèntiques, la utilització del factor de fricció F_0 pot també ser pertinent en les consideracions de convecció natural (de Jong 1990).

Si utilitzem aquest factor, l'equació (II.34) esdevindrà:

$$\Phi_{v,1} = \frac{L}{3} \cdot \left[\frac{g \cdot \Delta T / T}{F_0} \right]^{1/2} \cdot H^{3/2} \quad (\text{II.36})$$

podent deduir que:

$$C = F_0^{-1/2} \quad (\text{II.37})$$

Bot estableix la relació:

$$F_0 = 1,75 + 0,7 \cdot \exp\left(-\frac{(L/H)}{32,5}\right) \quad (\text{II.38})$$

per $L/H > 1$

$$F_0 = 1,75 + 0,7 \cdot \exp\left(-\frac{(H/L)}{32,5}\right) \quad (\text{II.39})$$

per $L/H < 1$

Els valors de F_0 calculats per Bot estan compresos entre 1,75 (per valors de L/H molt alts) i 2,43 (per L/H igual a 1), el que es correspon amb valors de C de 0,75 i 0,64 respectivament.

La validesa de la utilització d'aquests valors per al cas de la convecció natural va ésser estudiada per De Jong (1990), trobant una bona correspondència en els casos en que $L \geq H$, però no en les obertures rectangulars allargades verticalment ($L \ll H$), cas en el qual recomana prendre un valor de $C=0,6$.

Cal destacar que pel cas que estem estudiant d'una sola obertura rectangular, les relacions L/H que considerarem seran en realitat $L/(H/2)$ per al flux d'entrada i $L/(H/2)$ per al flux de sortida.

En el cas d'una obertura rectangular inclinada un angle α , més gran de zero, respecte l'horitzontal i amb una alçada H mesurada verticalment, la velocitat de l'aire a una distància x de la base ($x=h/\sin\alpha$) serà, despreciant els efectes de fricció:

$$V = \frac{|x_0 - x|}{x_0 - x} \cdot \left| 2 \cdot g \cdot \frac{\Delta T}{T} \cdot \sin \alpha \right|^{1/2} \cdot |x_0 - x|^{1/2} \quad (\text{II.40})$$

Per simetria, el pla neutre serà situat al mig de l'obertura ($x_0=H/(2\cdot\sin\alpha)$). El flux volumètric a través de la meitat superior de l'obertura serà:

$$\Phi_{v,1} = -C \cdot \left| 2 \cdot g \cdot \frac{\Delta T}{T} \cdot \sin \alpha \right|^{1/2} \cdot L \cdot \int_{x_0}^{x_0 + \frac{H}{2 \cdot \sin \alpha}} \frac{|x_0 - x|^{3/2}}{x_0 - x} \cdot dx \quad (\text{II.41})$$

$$\Phi_{v,1} = C \cdot \frac{L}{3 \cdot \sin \alpha} \cdot \left| g \cdot \frac{\Delta T}{T} \right|^{1/2} \cdot H^{3/2} \quad (\text{II.42})$$

Si anomenem A l'àrea de l'obertura:

$$A = L \cdot \frac{H}{\sin \alpha} \quad (\text{II.43})$$

$$\Phi_{v,1} = C \cdot \frac{A}{3} \cdot \left| g \cdot \frac{\Delta T}{T} \right|^{1/2} \cdot H^{1/2} \quad (\text{II.44})$$

Podem observar que en aquest cas el flux volumètric depèn linealment de l'àrea de l'obertura (A) i de l'arrel quadrada de l'alçada de l'obertura mesurada verticalment (H).

Assenyalem així mateix que matemàticament ens surt una indeterminació en el cas d'obertura horitzontal ($\alpha = 0$).

En el cas de múltiples obertures, obtindrem el flux volumètric per integració de $-V(h) \cdot L_i$ a la part de dites obertures situada pel damunt del pla neutre, o de $V(h) \cdot L_i$ a la part situada per sota del pla neutre.

La teoria de la ventilació natural per efecte tèrmic tractada fins ara està basada sempre en la teoria del pla neutre de pressions, la qual constitueix una simplificació molt important de la realitat en tant que, a més de considerar la densitat de l'aire interior totalment uniforme, considera que les diferències de pressió generades entre l'interior i l'exterior per les diferències de densitat de l'aire en ambdós medis es converteixen, a l'alçada de les obertures,

en energia cinètica, sense considerar els efectes de la viscositat ni de la compressibilitat de l'aire. A partir d'aquest supòsit es determina la velocitat del fluid a qualsevol punt de l'obertura a partir de la seva altura i de la diferència de densitats i per integració s'obté el flux volumètric a través de l'obertura, havent d'aplicar un coeficient corrector que s'ha de determinar empíricament i que sol estar comprès entre 0,6 i 0,75.

Una mostra de la debilitat d'aquest plantejament és que no permet resoldre el cas de la ventilació d'un recinte amb una sola obertura horitzontal. Cal observar també que estem ignorant les característiques del flux i que no estem obtenint cap mena d'informació referent al camp de velocitats generat a l'interior de l'hivernacle. Així i tot, el plantejament teòric realitzat resulta útil, en la majoria de casos, per realitzar una estimació de la renovació d'aire en un edifici per efecte tèrmic. Down i cols (1990) al tractar de verificar experimentalment la teoria del pla neutre en edificis ramaders, troben resultats satisfactoris excepte en el cas en que aquest pla intersecta les obertures laterals. Probablement, la utilització dels mètodes numèrics, de la que parlarem a l'apartat II.2.2.3, permetrà fer una aproximació teòrica més fidel i complerta al fenomen de la ventilació natural per efecte tèrmic.

II.2.2.2. Tècniques experimentals utilitzades en l'estudi de la ventilació natural per efecte tèrmic

II.2.2.2.1. Assaigs a escala real

La major part dels treballs de recerca a escala real sobre la ventilació d'hivernacles utilitzen la tècnica del gas traçador (Morris i Neale 1954, Whittle i Lawrence 1960, Goedhart i col. 1984, Nederhoff i col. 1984 i 1985, Sherman 1990), consistent en realitzar un balanç de massa de l'aire de l'hivernacle. Fent servir un gas traçador inert i assumint una distribució uniforme del gas a l'interior de l'hivernacle tenim:

$$V_i \cdot \frac{dC_i}{dt} = -G(t) \cdot [C_i(t) - C_o] \pm F_i(t) \quad (\text{II.45})$$

on G és el flux de ventilació (m^3/s), V_i el volum d'aire de l'hivernacle (m^3), C_i i C_o les concentracions interior i exterior de gas traçador (kg/m^3) i $F_i(t)$ l'aport o eliminació de gas traçador a l'interior de l'hivernacle (kg/s).

Podem optar per dues variants, la primera, consistent en injectar el gas traçador a l'hivernacle i mesurar la caiguda de la concentració ($F_i=0$) i la segona consistent en mantenir un flux constant de gas traçador cap a l'interior de l'hivernacle ($F_i=\text{constant}$)

En la primera variant, amb G i C_o constant, integrarem l'equació (II-45) en l'interval comprès entre t_o i t , obtenint:

$$G \cdot (t - t_o) = -V_i \cdot \ln\left(\frac{C_i(t) - C_o}{C_i(t_o) - C_o}\right) \quad (\text{II.46})$$

El que permet calcular la taxa de renovació horària $N=3600G/V_i$ com:

$$N = \frac{3600}{(t - t_o)} \cdot \ln\left(\frac{C_i(t_o) - C_o}{C_i(t) - C_o}\right) \quad (\text{II.47})$$

on $t-t_o$ és el període de temps en segons, $C_i(t_o)$ és la concentració inicial de gas traçador

Amb la segona variant (mètode del flux continu), a partir de l'equació (II.45), considerant C_i i F_i constants, podem calcular N com:

$$N = \frac{3600 \cdot F_i}{(C_i - C_o) \cdot V_i} \quad (\text{II.48})$$

Els gasos utilitzats com a traçadors pels diferents autors han estat diversos, sent CO_2 i N_2O els més freqüents. El primer presenta l'inconvenient de no ser inert, ja que intervé en els processos bioquímics tant de les plantes com del sòl, el que el fa útil només per l'estudi de la ventilació en hivernacles buits i amb el sòl cobert per un material impermeable. La mesura de la concentració de gas traçador és realitza en ambdós casos utilitzant un analitzador de gasos d'infrarojos.

Boulard i Draoui (1995) introdueixen el mètode del balanç de vapor d'aigua, en el que utilitzen aquest com a gas traçador. Mesuren les humitats específiques (kg/kg) de l'aire interior $pi(t)$ i exterior $po(t)$ utilitzant psicròmetres i estimen la taxa de transpiració del cultiu $Tr(t)$ (kg/s) utilitzant una balança electrònica que suporta algunes plantes disposades en una fila de cultiu sense sòl. Ignorant l'evaporació del sòl, que pot ser minimitzada cobrint-lo amb una làmina impermeable, i ignorant també la condensació a l'interior; minimitzada utilitzant un hivernacle de doble coberta, escriuen l'equació del balanç de vapor d'aigua com:

$$\rho V_i \cdot \frac{dpi}{dt} = \rho \cdot G(t) \cdot (po(t) - pi(t)) + Tr(t) \quad (\text{II.49})$$

L'equació és discretitzada com una simple funció de pi , po i $Tr(t)$, enregistrant les mesures cada minut i promitjant-les cada hora i s'utilitza per calcular G i N .

Alguns autors han estudiat la ventilació dels hivernacles a partir de models de balanç d'energia amb diferents graus de complexitat (Kozai i col 1980, Chiappale i col. 1984, Verheye i Verlodt 1990, Fernandez i Bailey 1992), calculant les pèrdues d'energia per renovació d'aire interior a partir de la mesura de l'energia solar captada per l'hivernacle, menys la perduda a través de la coberta, menys la magatzemada per la coberta, l'aire, el cultiu, el sòl..., i podent estimar així la taxa de renovació de l'hivernacle. La utilització d'aquests mètodes de balanç energètic amb certa fiabilitat implica la necessitat de realitzar mesures d'un gran nombre de variables i sovint el funcionament incorrecte d'un sòl sensor afecta de forma molt important el resultat obtingut amb el model (Fernandez i Bailey 1992).

Boulard i col. (1994 i 1996) realitzen la predicció del número de renovacions d'aire a l'hivernacle a partir de la mesura de les diferències de pressió interior-exterior a nivell del sòl utilitzant un controlador de pressió diferencial. En els mateixos treballs, es determinen directament els fluxos d'aire i calor a través d'una obertura mitjançant un anemòmetre sònic i un termoparell de fil fi. Albright (1995) proposa un mètode per al control de la ventilació en un hivernacle amb finestres i ventiladors, consistent en controlar ambdós mecanismes a partir de la diferència de pressió interior-exterior i de la temperatura de l'aire respectivament, evitant així les deficiències de funcionament derivades dels continus canvis en el model de barreja i

distribució interior de l'aire interior de l'hivernacle deguts a l'efecte del vent que sovint afecten als sensors de temperatura instal·lats al seu interior.

II.2.2.2.2. Assaigs amb models a escala

L'aplicació de l'anàlisi matemàtica a l'estudi de problemes complexos de ventilació en els que es pretengui abordar les distribucions de velocitats, temperatures, concentracions, etc... es redueix sovint al planteig de les equacions diferencials que regeixen el conjunt de processos responsables de la ventilació i a la determinació de les condicions de contorn. La impossibilitat, en la major part dels casos, d'una solució analítica a les equacions plantejades condueix sovint a la necessitat de realitzar assaigs sobre models de laboratori que permetin estudiar sistemàticament la influència de cada factor aïllant-lo de la resta de factors que condicionen el fenomen en la seva globalitat. Al mateix temps, resulten una eina molt útil sempre que es necessita realitzar un estudi comparatiu de diferents sistemes de ventilació.

La teoria de la semblança (Palacios 1964, Baturin 1972 , Taylor 1974, Herranz 1989) , ens mostra com generalitzar els resultats d'un assaig realitzat en unes condicions determinades de forma que es puguin aplicar a situacions diferents i la manera d'utilitzar a escala real les dades obtingudes en un model a escala.

D'acord amb la teoria de la semblança, les equacions del moviment de fluids viscosos dona lloc als següents criteris de semblança:

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu} \quad (II.50)$$

número de **Reynolds** que relaciona les forces d'inèrcia i les degudes a la viscositat (V =velocitat, l =longitud característica, ν =viscositat cinemàtica)

$$Fr = \frac{g \cdot l}{V^2} \quad (\text{II.51})$$

número de **Froude** que relaciona les forces d'inèrcia amb les gravitacionals

$$Ar = Fr \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{g \cdot l}{V^2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{g \cdot l \cdot \Delta T \cdot \beta}{V^2} = \frac{g \cdot l \cdot \Delta T}{V^2 \cdot T} \quad (\text{II.52})$$

número d'**Arquímedes** que relaciona les forces d'inèrcia amb les ascensorials ($\beta=1/T$ =coeficient de dilatació cúbica en aire)

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot V^2} \quad (\text{II.53})$$

número d'**Euler** que relaciona la pressió amb les forces dinàmiques

Per simular els moviments naturals de l'aire, es transforma el criteri d' Ar per que no contingui la velocitat de forma explícita. El que aconseguim multiplicant Ar per Re^2 , obtenint:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \Delta T}{v^2 \cdot T} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{v^2} \quad (\text{II.54})$$

número de **Grashof** que relaciona les forces gravitacionals o ascensorials amb les degudes a la viscositat.

A més dels criteris anteriors, les equacions de la transmissió de calor i de la conducció de calor en les interfases proporcionen els següents criteris de semblança:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{II.55})$$

número de **Prandtl** de transferència de calor, que caracteritza les propietats físiques del fluid (per aire $Pr \approx 0.73$) (α =difusivitat tèrmica). En el cas d'un fluid que conté un solut, el paper de la difusivitat tèrmica el juga la difusivitat del solut i aleshores es defineix el número de Prandtl de transferència de massa.

$$Pe = \frac{V \cdot l}{\alpha} = Re \cdot Pr \quad (\text{II.56})$$

número de **Péclet**, que relaciona les forces d'inèrcia i les degudes a la difusivitat. Es parla de número de Péclet de transferència de calor o de transferència de massa segons ens referim a la difusivitat tèrmica o del solut.

$$Nu = \frac{h_c \cdot l}{k} \quad (\text{II.57})$$

número de **Nusselt**, que caracteritza les condicions de semblança per la transmissió de calor a la superfície de contacte entre un sòlid i un fluid (h_c =coeficient de transmissió de calor, k =conductivitat tèrmica)

No acostuma a ser possible complir totes les condicions de semblança, havent-se de recórrer a l'ajut que proporciona l'existència de dominis d'autosemblança, és a dir, regions dins les quals el fenomen es desenvolupa amb independència dels criteris individuals de semblança.

En la reproducció dels fenòmens de ventilació a escala de laboratori es pot utilitzar com a medi de treball tant aire com aigua. Ambdós medis presenten avantatges i inconvenients. A continuació descriurem les tècniques utilitzades per l'estudi de la ventilació natural utilitzant aire i utilitzant aigua com a fluid.

II.2.2.2.1. Models que utilitzen aire com a fluid

Els models a escala en els que el fluid és aire han estat àmpliament utilitzats en l'estudi de la ventilació d'edificis. Tot i que la major part dels treballs realitzats han anat dirigits a estudiar l'efecte eòlic de la ventilació utilitzant túnels de vent, també existeixen autors que han utilitzat aquests models per a l'estudi de la ventilació per efecte tèrmic que és a la que ens referirem en aquest treball.

Timmons i Baughman (1981) analitzen els criteris de semblança per l'estudi de la ventilació en un edifici ramader amb una finestra contínua zenital d'amplada D_1 i dues laterals d'amplada $D_2/2$ cada una, per un ΔT donat que serà fruit de les característiques tèrmiques de l'edifici, així com de la producció de calor pels animals. Consideren condicions d'absència de vent, despreciant els efectes de compressibilitat deguts a la velocitat de l'aire i considerant que la diferència de viscositat entre l'interior i l'exterior no afecta el flux (hipòtesi de Boussinesq). Obtenen quatre termes Π adimensionals que s'estableixen com a criteris de semblança:

$$\begin{aligned}\Pi_1 &= \frac{V_1 \cdot D_1}{\nu} && \text{(número de Reynolds, } Re) \\ \Pi_2 &= \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot h^3}{\nu^2} && \text{(número de Grashof, } Gr) \\ \Pi_3 &= \frac{D_1}{h} \\ \Pi_4 &= \frac{D_2}{h} && \text{(II.58)}\end{aligned}$$

on V_1 és la velocitat de sortida de l'aire, g és l'acceleració de la gravetat, β el coeficient d'expansió de l'aire exterior, ΔT l'increment de temperatura de l'aire interior-exterior, h la distància vertical entre la finestra d'entrada i la de sortida (distància d'acceleració del fluid) y ν la viscositat cinemàtica de l'aire.

El número de Reynolds (Π_1) és escollit com a variable dependent, ja que en el cas que ens ocupa coincidirà amb el cabal de sortida (principal variable d'interès) dividit per la viscositat cinemàtica de l'aire.

De la resta de paràmetres adimensionals, l'únic que presenta dificultats és el número de Grashof, que en el cas de que el fluid del model sigui aire requerirà la següent escala de temperatures:

$$(\Delta T)_M = n^3 \cdot (\Delta T)_F \quad (\text{II.59})$$

on els subíndexs M i F corresponen respectivament al model i al prototipus i n és l'escala de longituds (L_F/L_M).

Així, en el cas d'un edifici amb ventilació natural amb increments de temperatura previsibles de 1 a 3 K entre l'interior i l'exterior, si construïm un model a una escala de longituds $n=2$, necessitarem increments de temperatura de 8 a 24 K en el model si volem representar les condicions de temperatura del prototipus sense distorsió. Com podem veure, això limita considerablement la utilització d'escals superiors, doncs els increments de temperatura que caldria introduir quedarien fora de les possibilitats experimentals. La utilització de models més petits (escals superiors) implicaria la introducció d'una distorsió que hauria de ser avaluada abans de poder donar una interpretació significativa dels resultats experimentals.

Bruce (1982) i Down i col. (1990) han utilitzat també models a "mitja escala" per la verificació experimental de la teoria de la ventilació natural per efecte tèrmic en edificis ramaders.

II.2.2.2.2. Models que utilitzen aigua com a fluid

En l'estudi de molts problemes de ventilació, els efectes de la viscositat del fluid i de la difusió de calor són poc importants. Això es posarà de manifest amb els números de Reynolds y de Péclet, que prendran valors molt alts. En aquestes condicions, el flux serà independent d'aquests números (Simpson 1982). En aquests casos, podem simular els fluxos utilitzant models de laboratori a escala, fent servir aigua com a fluid de treball i afegint sal per tal de produir les diferències de densitat que originen el flux. Les diferències de concentració de sal representaran diferents increments de temperatura.

Cal assenyalar que la viscositat cinemàtica de l'aire és de l'ordre de quinze vegades la de l'aigua, mentre que la difusivitat del calor en el aire és de l'ordre de deu-mil vegades la difusivitat de la sal en l'aigua, per tant, el procediment assenyalat només serà vàlid quan l'advecció de calor sigui molt més important que la difusió, ja que la difusió de la sal en l'aigua es produeix massa lentament per representar la difusió del calor en l'aire (Lane-Serf 1989).

Un altra limitació d'aquest tipus de models és deguda a la consideració del flux com a incompressible, el que no succeirà si el flux real té una temperatura molt alta, per exemple deguda a focs. Així i tot, el moviment del fum pot ser estudiat utilitzant aquest procediment.

Les principals avantatges d'aquests tipus de models en front dels que utilitzen aire com a fluid es deriven, d'una banda, de la facilitat de visualització del flux, utilitzant colorants o mitjançant mètodes òptics basats en els diferents índex de refracció que corresponen a les diferents concentracions de sal (veure apartat II.3) i, per l'altra banda, de la possibilitat d'utilitzar valors molt més alts de $\Delta\rho/\rho$, podent-se així obtenir, per una mateixa mida de model a escala, números de Reynolds y Péclet més alts.

Diferents autors han utilitzat models de laboratori amb aigua com a fluid de treball per l'estudi de fenòmens de ventilació natural per efecte tèrmic. Així Linden i Simpson (1985), Linden i col. (1990) estudien el flux de ventilació a través d'una porta o finestra degut a la diferència de temperatura. Lane-Sherf i col. (1990) estudien la ventilació natural de l'edifici del Departament d'Humanitats de la Universitat de Sevilla, construït per la exposició universal de 1992. Lane-Sherf i col. (1992) estudien la ventilació natural, així com el comportament del fum en cas d'incendi en el "Leicester Polytechnic School of Engineering". Des del punt de vista de la seguretat en cas d'incendi, Linden y col. (1992) construeixen aquest tipus de model per estudiar l'efecte d'una barrera nebulitzadora d'aigua en la propagació de la calor i del fum produït per un foc a l'interior d'un túnel. Simpson (1987) aplica el mètode a l'estudi de diferents fenòmens atmosfèrics.

Per obtenir les escales de temps, velocitat i diferències de densitat en aquest tipus d'experiments definirem prèviament les variables "acceleració gravitacional reduïda (g')" i "flux de flotabilitat (B)":

En tots els casos de ventilació natural per efecte tèrmic, la força que origina el flux és produïda per diferències de densitat entre diferents parts del fluid. Si considerem les forces que actuen sobre un element de volum de fluid V envoltada per un fluid ambiental estacionari de densitat ρ , la força de flotabilitat experimentada per l'element de volum deguda al fluid que la envolta serà ascendent i igual al pes del fluid desplaçat, ρgV . Si la densitat de l'element de volum és $\rho + \Delta\rho$, la força descendent sobre aquest deguda a la gravetat serà $g(\rho + \Delta\rho)V$. Per tant, la força resultant serà descendent i igual a $g\Delta\rho V$ i l'acceleració experimentada per la parcel·la (g') serà:

$$g' = g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho + \Delta\rho} \quad (\text{II.60})$$

g' és coneguda com acceleració gravitacional reduïda.

A la majoria de situacions, $\Delta\rho/\rho$ és molt petit i podem utilitzar la aproximació de Boussinesq, consistent en considerar que l'efecte de les diferències de densitat és significant en la producció de forces de flotabilitat però la diferència en la inèrcia de les diferents parts del fluid és despreciable. Així, podem considerar que l'acceleració experimentada per la parcel·la de fluid és:

$$g' = g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (\text{II.61})$$

Per l'aire considerarem que $\Delta\rho/\rho$ és aproximadament igual a $-\Delta T/T$. Així, quan les temperatures a l'interior siguin superiors a les temperatures exteriors, el model s'haurà de colocar de cap per avall i els increments de concentració de sal representaran els increments de temperatura.

El flux de flotabilitat en el model (B_M) serà provocat per la introducció d'un flux volumètric d'aigua salada (Q) amb una acceleració reduïda (g'), sent l'esmentat flux:

$$B_M = Q \cdot g' \quad (\text{II.62})$$

El flux de flotabilitat a escala real (B_F) serà provocat per una font de calor de potència W i en el cas de l'aire serà:

$$B_F = \frac{g \cdot \beta \cdot W}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{II.63})$$

on β és el coeficient d'expansió i c_p el calor específic de l'aire. Per les condicions usuals de temperatura de l'aire serà $B_F = 0.0281 \cdot W$, on W és mesurat en kilowatts i B_F en m^4s^{-3} .

Per obtenir els criteris de semblança entre el model assajat i el prototipus en aquest tipus d'experiments, es consideren com a variables que intervenen en el procés la longitud característica (L), l'acceleració gravitacional reduïda (g'), el flux de flotabilitat (B), la velocitat característica (V) i el temps (t), obtenint-se els següents paràmetres adimensionals (Π) que ens proporcionaran respectivament les escales de temps (Π_1), de velocitat (Π_2) i de flux de flotabilitat (Π_3):

$$\Pi_1 = \frac{t \cdot g'^{1/2}}{L^{1/2}} \quad (\text{II.64})$$

$$\Pi_2 = \frac{V}{g'^{1/2} \cdot L^{1/2}} \quad (\text{II.65})$$

$$\Pi_3 = \frac{B}{g'^{3/2} \cdot L^{5/2}} \quad (\text{II.66})$$

Si els efectes deguts a la viscositat i a la difusivitat no fossin menyspreables, a les hores caldria introduir també els números de Reynolds y Péclet com a criteris de semblança. En la majoria dels casos només ens preocupem de que ambdós números siguin prou alts.

Finalment, hem d'aclarir que si bé alguns autors (Linden i Simpson 1985, Lane Sherf 1989, Lane Sherf i cols. 1990) utilitzen el número de Reynolds per establir a partir de quin valor d'aquest paràmetre adimensional el comportament del flux és independent de la viscositat, els mateixos autors acostumen a calcular l'esmentat valor considerant com a velocitat característica $(g' \cdot H)^{1/2}$. En substituir el terme de velocitat del número de Reynolds per aquesta expressió, podem comprovar que aquest és equivalent a l'arrel quadrada del número de Grashof $((g' \cdot H)^{1/2} \cdot H / \nu = \text{Gr}^{1/2})$, sent aquest darrer paràmetre l'utilitzat per altres autors per

analitzar problemes de convecció natural (Baturin 1976, Timmons i Baughman 1981, Bruce 1982, Down i cols. 1990). Aclarida aquesta relació, al llarg d'aquest treball continuarem utilitzant el número de Reynolds com a paràmetre adimensional indicador de la importància relativa de les forces degudes a la viscositat.

II.2.2.3. Utilització de mètodes numèrics per l'estudi de la ventilació natural per efecte tèrmic.

L'estudi de la ventilació mitjançant tècniques numèriques consisteix en fer prediccions del flux d'aire en edificis ventilats, a partir d'un model matemàtic consistent en expressar les lleis que governen el procés generalment en termes d'equacions diferencials, les quals, normalment, no poden ser resoltes analíticament, havent de recórrer a mètodes numèrics, el desenvolupament dels quals està íntimament lligat al dels ordinadors.

Les equacions diferencials que regeixen el flux de fluid en recintes sotmesos a ventilació natural induïda per gradients de temperatura són, assumint la aproximació de Bousinnesq (Awbi 1991, Perez-Segarra i cols. 1995):

Conservació de la massa:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.67})$$

Conservació de la quantitat de moviment:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'u'}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{u'w'}) \end{aligned} \quad (\text{II.68})$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{v'v'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{v'w'}) & \end{aligned} \quad (\text{II.69})$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'w'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{v'w'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{w'w'}) + \rho g \beta (T - T_0) & \end{aligned} \quad (\text{II.70})$$

Conservació de l'energia tèrmica:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho w \frac{\partial T}{\partial z} &= \frac{\lambda}{c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'T'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{v'T'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{w'T'}) + \frac{Q_V}{c_p} & \end{aligned} \quad (\text{II.71})$$

on x , y i z són les coordenades dimensionals, u , v i w són les components dimensionals del vector velocitat (velocitat promitja en els fluxos turbulents), p i T són la pressió dinàmica i la temperatura (valors promitjos en els fluxos turbulents), T_0 és la temperatura de referència, Q_V la calor generada per unitat de volum i ρ , μ , β i c_p són respectivament la densitat, la viscositat dinàmica, el coeficient d'expansió tèrmica i la capacitat calorífica. u' , v' , w' i T' seran les velocitats fluctuants turbulentes i la temperatura fluctuant, que només seran considerades quan s'analitzin fluxos turbulents.

En el cas que el flux sigui turbulent, per al càlcul de les tensions turbulentes $(-\rho \overline{u'u'}, -\rho \overline{v'v'}, -\rho \overline{w'w'}, -\rho \overline{u'v'}, -\rho \overline{u'w'}, -\rho \overline{v'w'})$ i dels fluxos de calor turbulent $(-\rho \overline{u'T'}, -\rho \overline{v'T'}, -\rho \overline{w'T'})$, és necessària la utilització de un model de turbulència. La majoria dels models utilitzats per resoldre casos pràctics es basen en la introducció dels conceptes de viscositat turbulenta i difusivitat turbulenta. El més utilitzat és l'anomenat model de turbulència $k-\varepsilon$ (Awbi 1991, Rodi 1984).

Per resoldre numèricament les equacions que governen el flux, cal discretitzar la distribució de les variables dependents en el domini del flux, creant una malla computacional i assignant valors discrets a les variables dependents. Aquesta discretització sistemàtica de l'espai i de les variables dependents és la que permet substituir les equacions diferencials per equacions algebraïques simples, que poden ser resoltes amb relativa facilitat. A mesura que la densitat de la malla en el domini del flux es fa més gran, la solució de l'equació de discretització s'apropa més a la solució exacta de l'equació diferencial; si bé la quantitat necessària de treball d'ordinador també augmenta i poden aparèixer nous problemes de precisió numèrica.

Aquests mètodes presenten l'avantatge que donen una informació completa i detallada de totes les variables rellevants (com ara velocitat, pressió, temperatura etc..) en tot el domini d'interès. El seu nivell d'incert depèn tant de treballar amb un model matemàtic adequat com de utilitzar una tècnica numèrica apropiada. En el cas que el problema analitzat admeti, matemàticament, més d'una solució (cas habitual quan es treballa amb Reynolds alts), no és fàcil determinar quan la solució obtinguda es correspon amb la realitat.

Quan s'estudien fenòmens dels que no es pot fer una descripció matemàtica precisa, com ara fluxos turbulents complexos o fluxos amb fluids no Newtonians, hi ha sempre una incertesa sobre fins a quin punt els resultats obtinguts es corresponen amb la realitat, sent necessària la obtenció de dades experimentals per ser comparades amb les obtingudes pels ordinadors (Patankar 1980). D'altra banda, per l'estudi dels fluxos de ventilació en règim turbulent, per geometries relativament complexes, els temps de càlcul necessaris amb els ordinadors habitualment utilitzats per aquest fi (des de estacions de treball a ordinadors massivament paral·lels) són, encara avui, molt grans (de l'ordre d'hores en problemes bidimensionals o dies en problemes tridimensionals)

Timmons i cols. (1980) van desenvolupar un model numèric capaç de predir les característiques del flux en recintes ventilats, comparant els resultats amb els obtinguts experimentalment utilitzant tècniques de visualització de fluids, Maghirang i Manbeck (1993) varen estudiar, utilitzant procediments similars, el transport de partícules respirables en allotjaments ramaders, Markatos i Cox (1984) varen modelitzar la propagació del fum en un recinte amb un foc. Darrerament, Perez-Segarra i cols. (1995) han estudiat problemes de

convecció natural turbulenta en recintes amb fonts internes de calor. Les geometries analitzades en aquests treballs han estat gairebé sempre paralepípedes rectangles.

II.2.3. Combinació dels efectes tèrmic i eòlic en l'intercanvi d'aire

Els efectes tèrmics i eòlics solen presentar-se quasi sempre de forma simultània. Els respectius components de la pressió es poden sobreposar per tal d'obtenir la pressió total a cada banda de l'obertura. Així, l'increment de pressió produït per l'efecte combinat del vent ($\Delta P_w(h)$) i de la temperatura ($\Delta P_T(h)$) serà:

$$\Delta P_{total}(h) = \Delta P_T(h) + \Delta P_w(h) \quad (\text{II.72})$$

ASHRAE 1985 recomana calcular el flux de ventilació degut a l'acció combinada del vent i la temperatura combinant ambdós fluxos utilitzant la "regla del quadrat":

$$\Phi_{total} = (\Phi_{v,T}^2 + \Phi_{v,w}^2)^{1/2} \quad (\text{II.73})$$

on $\Phi_{v,w}$ i $\Phi_{v,T}$ són els fluxos de ventilació deguts a l'efecte del vent i de la temperatura respectivament.

De Jong (1990) compara resultats experimentals obtinguts a escala real amb les prediccions realitzades amb el procediment anterior, obtenint errors màxims de l'ordre del 20% entre els valors predits i els mesurats.

Brockett i Albright (1987) desenvolupen un procediment numèric basat en la teoria de Bruce (1975 i 1978) que els hi permet calcular la taxa de ventilació en un edifici d'una sola nau a partir del càlcul dels increments de pressió provocats per la combinació ambdós efectes; els mateixos autors comparen els resultats obtinguts amb el seu procediment amb els obtinguts amb el mètode proposat per ASHRAE (1985), trobant diferències importants quan alguna de les finestres actua alhora com a finestra d'entrada i de sortida de l'aire. En la mateixa línia, Zhang i col (1989) contrasten els valors dels increments de temperatura obtinguts amb el seu

model de ventilació natural amb els resultats de camp obtinguts en una nau per bestiar, obtenint un alt grau de correspondència entre els valors calculats i els mesurats.

Boulard i Baille (1995) ajusten els resultats experimentals de camp obtinguts per Boulard i Draoui(1995) a diferents models basats en dues hipòtesis de combinació dels efectes eòlic i tèrmic, la primera consistent en considerar $\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_w$ i la segona consistent en considerar $\Phi = \Phi_{v,T} + \Phi_{v,w}$, sent la primera hipòtesi la que proporciona un millor ajust de les dades experimentals.

Pel que fa a la importància relativa d'ambdós efectes, observant les equacions II.34 i II.11 amb les que calculem el flux volumètric a través d'una finestra degut al efecte tèrmic i a l'efecte eòlic, veiem que el flux varia proporcionalment a la velocitat del vent i a l'arrel quadrada de l'increment de temperatura. En el cas d'un hivernacle amb una sola obertura rectangular podem escriure la relació entre ambdós fluxos com:

$$\frac{\Phi_{v,w}}{\Phi_{v,T}} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{Kw}{H \cdot g \cdot 1/T} \right)^{1/2} \cdot \frac{u}{(\Delta T)^{1/2}} \quad (\text{II.74})$$

Bot (1983) va determinar aquesta relació per un hivernacle tipus "Venlo" amb les finestres superiors completament obertes, obtenint:

$$\frac{\Phi_{v,w}}{\Phi_{v,T}} = 3 \cdot \frac{u}{(\Delta T)^{1/2}} \quad (\text{II.75})$$

Per tant, en el cas esmentat, l'efecte del vent havia de ser dominant quan:

$$3 \cdot u > (\Delta T)^{1/2} \quad (\text{II.76})$$

el factor 3 és expressat en unitats del sistema internacional ($\text{K}^{1/2} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$).

En qualsevol cas, tots els autors coincideixen en assenyalar que l'efecte tèrmic només és important quantitativament quan la velocitat del vent és baixa.

Papadakis i col. (1996), calculen la ventilació deguda a l'efecte combinat de la velocitat del vent (u) i l'increment de temperatura entre l'interior i l'exterior (ΔT) en un hivernacle amb finestres contínues laterals i zenitals mitjançant la següent expressió matemàtica:

$$\Phi = A_w \cdot (a^2 \cdot u^2 + b^2 \cdot \Delta T)^{0,5} \quad (\text{II.77})$$

on a i b són els factors de vent i de temperatura que determina experimentalment i A_w és l'àrea total de les obertures.

El cas d'un hivernacle multicapella va ésser estudiat per Kozai i Sase (1978) que varen proposar un procediment iteratiu de càlcul per estimar la ventilació natural, basat en el càlcul dels fluxos a través de les obertures de cada nau i entre les diferents naus, a partir de les diferències de pressió provocades pel vent i per les diferències de temperatura; el que permetia, després de successives iteracions, estimar la ventilació natural compartiment per compartiment. Calia conèixer els coeficients de descàrrega de cada obertura, que determinaven experimentalment.

II.3. Tècniques experimentals de visualització de fluids

El principal avantatge de la utilització de tècniques de visualització de fluids deriva del fet que aquestes ens proporcionen informació sobre la totalitat del camp de flux sotmès a estudi sense pràcticament interferir en l'esmentat flux. En canvi, la utilització d'un instrument de mesura de flux a partir de proves de pressió o temperatura, proporciona dades per només un punt del camp de flux i a més, el fluid és pertorbat en certa mesura degut a la presència de la prova de mesura. Dins el conjunt de tècniques de visualització més importants, podem diferenciar dos grups (Merzkirch, 1974):

* Els que impliquen l'addició de materials estranys en el flux de fluid, ja sigui aquest un gas o un líquid.

* Els mètodes òptics, fonamentats en detectar les variacions de la densitat del fluid en el camp de flux gràcies a les variacions de l'índex de refracció del medi que aquestes comporten. Aquests són els mètodes estrictament "no pertorbadors".

Dins del primer grup, quan el fluid és aire, la tècnica de visualització més utilitzada consisteix en la injecció de fum procedent de la combustió de fusta, palla, paper o tabac, o bé de la vaporització d'olis minerals (normalment kerosè) o d'altres substàncies com ara tetraclorur de titani ($TiCl_4$) o bromonaftalè ($C_{10}H_7Br$) (Brown 1953, Maltby i Keating 1962). La major part de treballs que utilitzen la injecció de fum han estat realitzats en túnels de vent i aconseguen la visualització de les línies de traça en un pla (que coincidiran amb les de corrent si el flux és estacionari) il·luminant una secció del flux amb una làmina plana de llum. Jaluria i cols.(1993) utilitzen aquesta tècnica per l'estudi de l'intercanvi de calor i massa a través d'una finestra horitzontal. Un altra tècnica utilitzada per visualitzar el flux d'aire ha estat la utilització de bombolles de sabó de flotabilitat neutra, el que es pot aconseguir amb una mida uniforme de bombolles (de l'ordre de 3 mm) i omplint-les amb heli, aquesta tècnica ha estat utilitzada per Revesz (1989) per estudiar el camp de flux en habitacions amb ventilació forçada i amb aire acondicionat; Maghirang i Manbeck (1993) utilitzen aquest sistema de visualització en la modelització del transport de partícules en un recinte amb ventilació forçada per comparar les trajectòries de les bombolles i els camps de velocitats dels resultats experimentals amb els obtinguts per simulació numèrica.

Quan el fluid d'estudi és un líquid, un dels procediments més coneguts i antics ha estat la injecció de colorants a través de petits tubs situats en la posició desitjada del camp de flux per aconseguir la visualització de línies de traça. Aquesta tècnica és útil per fluxos a baixa velocitat (baix nombre de Reynolds), és a dir fluxos laminars (Massons i col. 1989, Kimoto i cols. 1991). Els colorants utilitzats han estat molt diversos, colorants alimentaris, llet, tinta, permanganat potàssic, Nigrosin, etc.... Linden i Redondo (1991) i Tam i Swinney (1987) han utilitzat la tècnica de la injecció de colorant i han quantificat la seva concentració als diferents punts del camp fluid a partir de la intensitat de la llum tramesa a través del fluid.

Un altra tècnica àmpliament utilitzada per la visualització de fluxos en líquids ha estat la velocimetria de partícules (en anglès “particle image velocimetry-P.I.V.”), consistent en enregistrar el desplaçament de petites partícules en una regió del fluid (Buchhave 1992, Oshima i Ramaprian 1991). El camp de flux és il·luminat amb una sèrie de polsos curts de llum (llum blanca o sovint llum làser) amb un interval de temps entre polsos conegut. A l'enregistrar imatges fotogràfiques de la regió de flux il·luminada i sembrada de partícules, s'observen les successives posicions d'aquestes, el que permet conèixer la seva direcció i velocitat. La principal dificultat del mètode consisteix en ajustar el número de partícules per unitat de volum adequat, interval de temps entre polsos i el temps d'exposició de la fotografia. També s'han utilitzat enregistraments en vídeo de les imatges, que posteriorment han estat digitalitzades i processades per tal d'obtenir diagrames de vectors del flux (Willert i Gharib 1990, Wernet 1991, Boucher i Kamala 1991, Kawasue i Ishimatsu 1991).

Recentment, s'han utilitzat les tècniques anomenades de "laser-induced fluorescence" (LIF), consistents en aprofitar la capacitat de certs components químics per manifestar fluorescència quan, dissolts en aigua en petites quantitats, són il·luminats per llum làser, el que permet determinar la concentració del producte traçador en qualsevol punt del camp de flux ja que, dintre d'un rang de concentracions de traçador, la intensitat de la llum emesa és proporcional a la concentració de colorant (Davies 1992). Els productes afegits com a colorants traçadors en el flux depenen de la longitud d'ona del làser utilitzat, per exemple, el colorant Rhodamina 6G manifesta fluorescència a longituds d'ona properes a 570 nm quan és il·luminat per un làser de 514 nm.

Pel que fa als mètodes òptics, el més conegut és el Shadograph, atribuït a Dvorak (1880), consistent en la utilització d'un feix de llum col·limat o quasi col·limat que es fa passar a través d'un medi amb inhomogeneïtats de densitat. Els raigs són desviats de forma diferent segons la derivada segona espacial de la densitat, formant una imatge amb ombres i llums en la làmina translúcida que es situarà a l'altra banda del medi. Aquesta tècnica, tot i que només dona informació qualitativa, detectant la posició de pertorbacions, ha estat utilitzada per diferents autors per l'estudi de la ventilació natural en edificis (Jaluria i cols. 1993, Lane-serff i cols 1990, Linden i cols. 1990, Simpson 1987).

II.4. Tècniques escollides per abordar el cas d'estudi

La tècnica que farem servir en aquest treball per desenvolupar un mètode de laboratori que permeti l'estudi de la ventilació natural dels hivernacles per efecte tèrmic, consistirà en la construcció de models a escala utilitzant aigua com a fluid de treball i afegint sal per produir les diferències de densitat que serien les responsables d'aquest tipus de ventilació (veure apartat II.2.2.2.2.2). Aquesta tècnica només serà aplicable en aquells casos en que els números de Reynolds i de Péclet siguin prou alts per poder menysprear l'efecte de la viscositat del fluid i de la difusió de calor.

El fet d'utilitzar aigua com a fluid de treball i provocar els increments de densitat a base d'afegir una solució salina molt concentrada ens permet assolir valors de $\Delta\rho/\rho$ molt més alts dels que podríem arribar a assolir si el fluid fos aire i aconseguíssim les diferències de densitat gràcies a l'escalfament d'aquest, el que ens permet obtenir, per una mateixa mida de model a escala, números de Reynolds i Péclet més alts.

L'altra avantatge important d'utilitzar aigua com a fluid consisteix en que aquesta permet visualitzar el flux amb molta més facilitat, la tècnica emprada per la visualització consistirà en l'addició de colorant, el qual es barrejarà amb la solució salina de forma que, en ser menyspreables els efectes de la difusivitat del colorant i de la sal, puguem relacionar les concentracions de colorant amb les concentracions de sal i aquestes amb $\Delta\rho/\rho$ a qualsevol punt del camp de flux. Per tal de facilitar la visualització del flux, es treballarà amb maquetes bidimensionals que representaran la secció transversal de l'hivernacle estudiat, ignorant-se l'efecte dels frontals i s'oposant sempre la utilització de finestres contínues.

El recent desenvolupament de les tècniques de digitalització i tractament d'imatges, ens hauran de permetre obtenir amb facilitat les atenuacions de la intensitat de llum provocades pel colorant present en qualsevol punt d'una maqueta i a partir d'aquestes calcular els valors de $\Delta\rho/\rho$ al model. Aquests darrers valors els relacionarem amb els increments de temperatura que s'assoliran a escala real en unes condicions ambientals determinades mitjançant l'anàlisi dels criteris de semblança.

III. EQUIPAMENT INSTRUMENTAL

III.1. Equipament per als assaigs de laboratori

El dispositiu experimental utilitzat per la simulació física del flux als assaigs de laboratori consisteix en un tanc d'aigua transparent il·luminat per la seva part posterior, a l'interior del qual s'introduirà la maqueta, també transparent, en posició invertida. Un equip d'injecció permetrà introduir una solució salina amb colorant a l'interior de la maqueta.

Els experiments s'enregistraran amb un equip de filmació que estarà connectat a un ordinador equipat amb un sistema de digitalització i captura d'imatges. Al llarg de cada experiment s'anirà mesurant de forma contínua la conductivitat elèctrica en un punt fix de l'interior de l'hivernacle.

Els components de l'equip experimental utilitzat i el seu esquema general de funcionament s'indiquen a la figura III.1

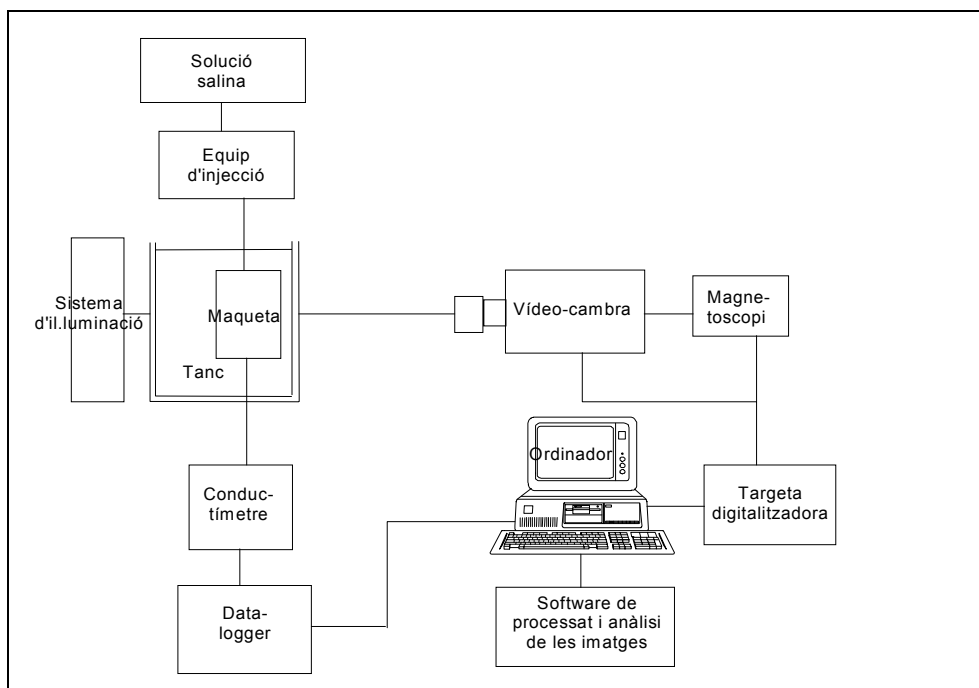


Fig. III.1: Esquema global del sistema experimental de laboratori

III.1.1. Models a escala i tanc d'aigua

CARACTERÍSTIQUES DEL TANC D'AIGUA:

S'utilitza un tanc de polimetacrilat transparent de 1 cm de gruix. Les seves dimensions exteriors són 200 cm de longitud, 25 cm d'amplada i 40 cm de fondària; provist d'una vàlvula a la seva part inferior per facilitar el buidat.

CARACTERÍSTIQUES CONSTRUCTIVES DE LES MAQUETES:

En la construcció de les maquetes s'ha suposat en tot moment que les característiques del flux eren bidimensionals, és a dir, es suposa en tots els casos que es tracta d'hivernacles de gran longitud, en els quals caracteritzarem el flux que es produeix en una secció transversal d'aquests, menyspreant per tant l'efecte dels frontals. Les maquetes es construeixen en polimetacrilat de 1 mm o 1,5 mm de gruix, tenen en tots els casos una fondària de 5 cm i van suportades sobre una

placa plana de polimetacrilat transparent de 100 cm de longitud per 35 cm d'amplada, amb uns rigiditzadors que eviten la seva deformació; per la seva part anterior van tapades amb una placa plana de metacrilat de 1 mm de gruix per evitar intercanvis de fluid a través d'altres obertures que no siguin les finestres de ventilació, tal com s'indica a la figura III.2. La corbatura de les peces que les integren s'aconsegueix per escalfament d'aquestes, col·locades en motlles adients, en forn a 80°C. Per la seva construcció s'utilitza un adhesiu a base d'acetat d'etil i acetat d'amil (Imedio), soluble en acetona, que al no degradar el metacrilat permet recuperar tant la placa rígida com les diferents peces.

Les maquetes s'introdueixen en el tanc en posició invertida, de forma que al introduir la solució salina a través del sòl de l'hivernacle, el flux descendent provocat per aquesta simuli el flux ascendent provocat per l'escalfament de l'aire al seu contacte amb el terra. Es col·loca la maqueta en el tanc de forma que quedi comprimida entre la placa de polimetacrilat que li serveix de suport i la paret del tanc (fig. III.3).

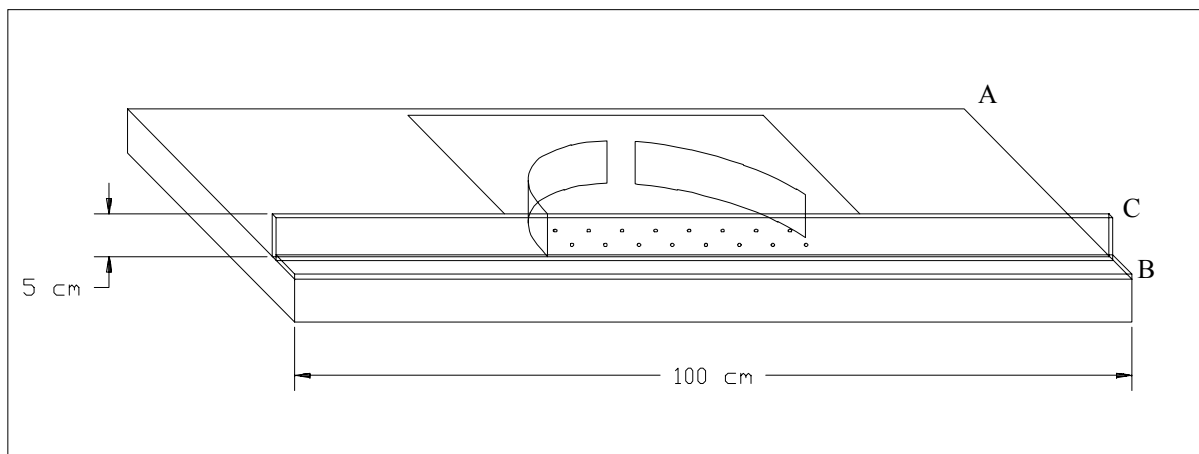


Fig. III.2: Esquema del muntatge de la maqueta d'un túnel sobre la placa rígida

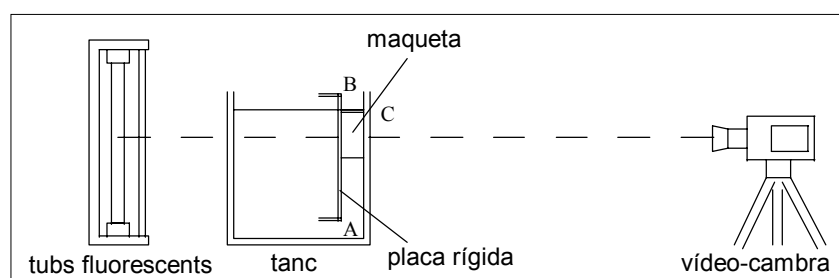


Fig. III.3: Esquema de la disposició dels diferents elements en les experiències de laboratori (els punts A, B i C coincideixen amb els de la figura III.2).

III.1.2. Sistema d'il·luminació

La il·luminació es realitza mitjançant un plafó de 6 tubs fluorescents de 15 W de potència cada un, situats verticalment i amb una reactància d'alta freqüència (30 kHz) per tal d'evitar l'efecte de parpelleig provocat per la freqüència normal de 50 Hz (Strachan 1993). La separació entre els fluorescents és de 19 cm i el conjunt del plafó va cobert per una placa translúcida blanca.

El plafó esta situat darrera del tanc, tal com s'indica a la figura III.3, situant-se de forma que quedi exactament al darrera de la maqueta.

La il·luminació proporcionada pel plafó de fluorescents no és totalment uniforme. Si considerem un eix horitzontal que travessi el plafó, observem petites oscil·lacions horitzontals en la intensitat de llum degudes a la situació relativa dels punts considerats respecte dels fluorescents. Si prenem una imatge de vídeo del plafó situat darrera del tanc d'aigua, la digitalitzem i mesurem la intensitat de gris al llarg d'un eix horitzontal que travessi el plafó amb un rang de 0 a 255, obtenim la gràfica que es mostra a la figura III.4 on s'observen les oscil·lacions abans esmentades i la seva amplitud.

Amb una intensitat mitjana dels valors d'intensitat de gris a l'àrea il·luminada pel plafó de 225,6 tenim una desviació estàndard de 4,57.

Tots els experiments es realitzen evitant l'entrada de llum natural a l'interior del laboratori per tal d'evitar les variacions en la intensitat d'aquesta.

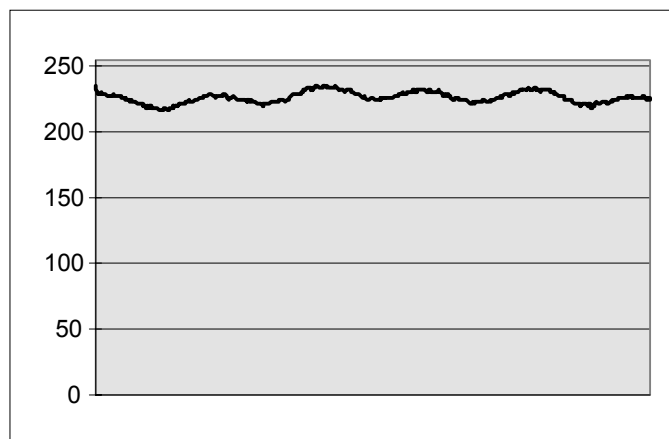


Fig III.4: Intensitat dels píxels al llarg d'un eix horitzontal que travessa el plafó de tubs fluorescents.

III.1.3. Injecció de sals i colorants

La solució salina utilitzada és una dissolució de NaCl en aigua, a la que s'hi afegeix un colorant. Té per objecte obtenir un fluid més dens que l'aigua existent en el tanc, arribant-se a assolir increments relatius de densitat de l'ordre del 20%. Quant es pretenen assolir les concentracions més altes és necessari escalfar prèviament l'aigua abans de realitzar la dissolució i dissoldre el colorant abans que el NaCl.

Per la mesura dels increments relatius de densitat de les solucions salines utilitzades en els experiments respecte l'aigua del tanc, utilitzem un picnòmetre i una balança de precisió (Mettler AJ100) amb una precisió de 0,1 mg i una capacitat màxima de 100 g, amb la que pesem volums idèntics de solució salina i d'aigua del tanc. Excepte en els experiments en que s'utilitzen increments relatius de densitat molt baixos per la solució salina (inferiors a 0,025), en els quals obtenim una millor precisió realitzant la mesura de l'increment relatiu de densitat de forma indirecta a partir del increment de conductivitat elèctrica (veure apartat III.1.4)

L'addició de colorant a la solució salina injectada a l'interior de la maqueta ha de permetre conèixer la fracció de volum de solució salina en un punt de l'interior d'aquesta a partir de la mesura de les intensitats de gris en aquest punt, actuant el colorant com un traçador passiu (Linden i Redondo 1991). A les experiències realitzades es fa servir colorant negre "Nigrosin" (Merck), el qual ha estat utilitzat per altres autors en experiències de visualització de fluids (Yehekel i Kehat 1971, llegit a Merzkirch 1974).

Per la injecció de la solució salina amb colorant utilitzem una bomba dosificadora de pistó, de cabal regulable de 0 a 32 litres per hora, amb una precisió del 1%.

Per aconseguir una distribució força uniforme de la solució injectada en la superfície corresponent al sòl de la maqueta, aquesta es distribueix a través d'emissors multisortides de reg localitzat, introduint-se el cabal emès per cada una de les sortides a través dels orificis practicats en el sòl de la maqueta (veure figura III.2). El nombre total de sortides utilitzades dependrà de l'amplada de cada maqueta, sent a raó de 3 orificis cada 10 cm d'amplada. Un teixit de ràfia de polipropilè col·locat sobre la superfície esmentada contribueix també a homogeneïtzar aquesta distribució.

Es determina experimentalment la relació existent entre el cabal emès per una sortida de l'emissor i la pressió existent a l'entrada de l'emissor, obtenint-se, en el rang de pressions comprès entre 15 i 103 kPa, la següent equació:

$$q = 0,1028 \cdot p^{0,482} \quad (\text{III.1})$$

On q és el cabal en cm^3/s i p la pressió en kPa. Amb un coeficient de determinació $r^2=0,978$ i significació $P=0,0002$

III.1.4. Control de la conductivitat elèctrica

La mesura de la conductivitat elèctrica de l'aigua que ocupa un punt determinat de l'interior del tanc és en realitat una mesura indirecta de l'increment relatiu de densitat en aquest punt provocat per la solució salina, doncs el NaCl dissolt en aigua la converteix en conductora (Redondo 1987).

Per mesurar la conductivitat elèctrica en un punt fix situat a l'interior de la maqueta, no podem utilitzar una cèl.lula de conductivitat estàndard degut a la grandària d'aquesta, que provocaria una baixa resolució espacial i una alteració molt important del flux. Per evitar aquests problemes s'utilitza un conductímetre amb una cèl.lula de flux de grafit, per l'interior

de la qual s'hi fa circular de forma contínua el fluid que es pren d'un punt fix de l'interior de la maqueta mitjançant un tub de plàstic flexible de 10 cm de longitud i 1,7 mm de diàmetre interior que s'introdueix a través del sòl de la maqueta de l'hivernacle. L'aspiració del fluid s'aconsegueix fent sifò amb un tub que va de la cèl.lula fins un nivell d'un metre per sota del nivell de l'aigua del tanc i a l'extrem del qual hi col·loquem una pinça per regular el cabal. El conductímetre està connectat a un data logger (Delta-Logger) que permet realitzar mesures de la conductivitat de forma periòdica.

El cabal que es fa circular per l'interior del tub és de l'ordre de 10cc/min, cabal que en tots els casos és menyspreable en front del cabal intercanviat a través de les finestres de la maqueta. El temps de resposta de la cèl.lula de flux a un canvi de conductivitat elèctrica a l'interior de la maqueta és en tots els casos inferior a 10 segons. La constant de cèl.lula és de $1,82 \text{ cm}^{-1}$.

Es realitza un assaig per determinar experimentalment la relació entre els increments de CE a 25°C mesurats amb el conductímetre i els increments relatius de densitat de la solució salina. Per la realització de l'assaig es prepara una solució salina concentrada de la que es determina l'increment relatiu de densitat utilitzant el picnòmetre. Posteriorment es preparen diferents dilucions de l'esmentada solució salina, es calcula l'increment relatiu de les esmentades dilucions i es mesura la seva CE a 25°C . els resultats obtinguts es mostren a la figura III.5.

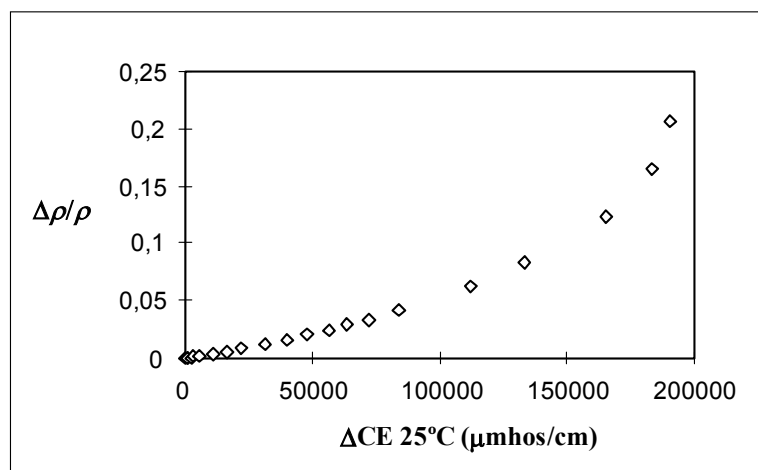


Fig III.5: *Incrementos relatius de densitat ($\Delta\rho/\rho$) que corresponen als diferents increments de conductivitat elèctrica ($\Delta CE \text{ } 25^\circ\text{C}$) de la solució salina.*

Per valors de CE inferiors a 60000 $\mu\text{mhos/cm}$ i de $\Delta\rho/\rho$ inferiors a 0,025 s'obté la següent relació:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 1,387 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta CE^{1,102} \quad (\text{III.2})$$

amb un coeficient de determinació $r^2 > 0,999$ i significació inferior a 10^{-5} .

Cal assenyalar que per valors de CE inferiors a 11000 $\mu\text{mhos/cm}$ i de $\Delta\rho/\rho$ inferiors a 0,004, podem ajustar ambdós paràmetres a una funció lineal, obtenintse la relació:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 3,460 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta CE \quad (\text{III.3})$$

amb un coeficient de determinació $r^2 = 0,998$ i significació inferior a 10^{-5} .

III.1.5. Equip per l'adquisició i tractament de les imatges

Per l'enregistrament de les imatges dels experiments s'utilitza una cambra de vídeo Hi8 model CCD-TR805E de SONY, que pot treballar amb intensitats il·luminació entre 3 i 10^5 Lux. L'equip escollit permet realitzar el control manual del diafragma per tal d'evitar variacions del grau d'obertura d'aquest al llarg d'un experiment. Així mateix permet fixar la velocitat d'obturació i la distància focal, garantint així el comportament estàtic de la cambra al llarg de la filmació de cada experiment.

Per l'enregistrament dels experiments s'utilitza el propi magnetoscopi de la cambra amb cintes de tipus Hi8 amb una resolució de 400 línies.

La digitalització de les imatges consisteix en discretitzarles en coordenades espacials (x,y) i en nivells de intensitat de llum ($I_p=f(x,y)$) que anomenarem nivells de gris. En el nostre cas treballarem amb imatges monocromàtiques, ignorant els components espectrals de la llum (es a dir, el color). El número de files en que dividim la imatge (m) i el número de píxels per fila

(n), determinen la resolució de la imatge digital ($m \times n$). Al quantificar el nivell de gris de cada píxel, la qualitat de la quantificació ve donada, fonamentalment, per el número de bits que s'assignen a cada píxel (p), sent el número de valors possibles 2^p . La quantitat de memòria necessària per magatzemar una imatge serà de ($m \times n \times p$) bites, és a dir $[(m \times n \times p) / 8]$ bytes

La digitalització i captura de les imatges de vídeo es du a terme mitjançant una targeta digitalitzadora d'imatges de vídeo monocroma (Data Translation DT3851), amb 256 nivells de gris (8 bits), capaç de capturar imatges amb una resolució màxima en display de 768x512 píxels i amb 1 Mbyte de memòria. La targeta digitalitzadora està instal·lada en un ordinador personal 486 amb 8 Mbytes de RAM i presenta la particularitat de permetre treballar amb un sol monitor VGA que mostra alhora les imatges adquirides i l'entorn gràfic de Windows.

Per al processament de les imatges utilitzem un paquet de software (Global Lab Image) que treballa en entorn Windows i que permet, entre altres coses, filtrar imatges, equalitzar-les, operar aritmèticament píxel a píxel amb diverses imatges, determinar la intensitat de cada píxel, obtenir histogrames de freqüències d'intensitats de gris en una zona d'una imatge, així com perfils lineals d'intensitat (González i Wintz 1987, Jain 1989, Domingo 1993). Els formats d'imatge acceptats pel paquet de software son: TIFF, PCX i DT-IRIS.

III.2. Equipament per als assaigs de camp

Per la realització dels assaigs de camp es construeix un hivernacle a escala real, de característiques similars a les utilitzades en els assaigs de laboratori, instal·lant-se en el seu interior l'instrumental necessari per poder calcular la quantitat d'energia per unitat de temps que esta contribuint a escalfar l'aire interior de l'hivernacle. El material instal·lat haurà de permetre mesurar la radiació rebuda a l'interior de l'hivernacle, així com les temperatures de l'aire interior i exterior i del sòl de l'hivernacle, a fi i efecte de poder estimar les pèrdues d'energia a través del material de coberta i a través del sòl. Tot seguit es detallen les característiques de l'hivernacle construït i les de l'equipament instal·lat al seu interior.

III.2.1. Hivernacle

Es construeix un túnel de dimensions relativament reduïdes (3 m d'amplada per 2 m d'alçada i 10 m de longitud). Per tal d'eliminar l'efecte eòlic en la ventilació del túnel, aquest ha estat construït a l'interior d'un hivernacle de dimensions molt superiors (9 m d'amplada per 5 m d'alçada i 30 m de longitud). Les finestres de ventilació són contínues, amb dimensions i situació similars a les utilitzades en els models de laboratori.

El material de coberta, tant del túnel com de l'hivernacle que el conté, és film de polietilè i la estructura esta formada per un arc d'acer galvanitzat cada dos metres de longitud. El mecanisme per l'obertura de les finestres consisteix en un eix d'acer galvanitzat de longitud igual a la de l'hivernacle i amb una manivela a l'extrem que permet enrotllar el plàstic i aconseguir així el grau d'obertura desitjat.

El sòl de l'hivernacle es troba completament desproveït de vegetació i amb un contingut baixíssim d'humitat, després de passar varios mesos sense ser cultivat ni regat.

III.2.2. Control de temperatures i radiació

Per mesurar les temperatures a l'interior de l'hivernacle s'instal·len dues columnes amb cinc sensors cada una en una secció transversal de l'hivernacle. Els sensors utilitzats seran del tipus PT-100 (Hewlett Packard 1980). Per tal d'evitar els errors de lectura produïts per l'escalfament dels sensors degut a la radiació rebuda, a més d'ombrejar-los, s'instal·larà un mecanisme que provoqui una petita aspiració d'aire en el lloc on hi tenim un sensor (A.S.A.E., 1991). El mecanisme consistirà en un tub vertical de P.V.C. de 90 mm col·locat al costat de cada columna de sensors, amb el seu extrem inferior connectat a un extractor situat fora de l'hivernacle i l'extrem superior tapat. Transversalment se li connectaran tubs de diàmetre molt inferior (14 mm), a l'interior dels quals s'hi col·locaran els sensors de temperatura, que al posar-se en funcionament l'extractor quedaran situats al mig del corrent d'aire. També es mesura la temperatura de l'aire en dos punts situats a l'exterior del túnel i interior de l'hivernacle gran, a l'alçada de la finestra lateral, generant, en aquest cas, l'aspiració d'aire amb dos petits extractors independents. Finalment, mesurem la temperatura de la superfície del sòl i la temperatura a 5 i 10 cm de fondària per tal d'estimar el flux de calor perdut a través del sòl.

Per la mesura de la radiació rebuda es col·loquen dos sensors de radiació neta del tipus Thies, situats en una mateixa secció transversal de l'hivernacle, separats una distància de cent vint centímetres i a noranta centímetres de les parets laterals.

Tant les dades de temperatura com les de radiació s'enregistren de forma periòdica, mitjançant un data logger (Delta-Logger). En el cas de les temperatures es realitza una lectura cada 30 segons i s'enregistra el promig de lectures cada 5 minuts i en el cas de la radiació les lectures es fan cada 10 segons i s'enregistra el promig cada 5 minuts.

IV. MÈTODE EXPERIMENTAL

IV.1. Simulació física del flux amb el model a escala

Es submergeix la maqueta en posició invertida en l'aigua del tanc de forma que el nivell de l'aigua tot just sobrepassi el nivell del "sòl" de la maqueta i procurant que no quedin bosses d'aire a l'interior d'aquesta.

Es posa en marxa la bomba de pistó que impulsa la solució salina, s'ajusta al cabal desitjat i es manté en funcionament sense introduir la solució salina en la maqueta fins que es tingui la seguretat de que s'ha buidat tot el líquid que omplia els tubs d'aspiració i d'impulsió de la bomba abans d'iniciar l'experiment. Esperarem a que el manòmetre situat a la sortida de la bomba ens marqui una pressió constant, moment en el qual es comprova el cabal de sortida a través dels tubs dels emissors.

S'introdueix la solució salina amb el colorant a través d'orificis practicats en el "sòl" del model a escala, de forma que el flux descendent provocat per la solució salina, de densitat superior a la de l'aigua del tanc, simuli el flux de flotabilitat provocat per l'escalfament de l'aire al seu contacte amb el terra, calent per l'acció de la radiació solar. L'increment de densitat de la solució salina respecte l'aigua del tanc i el seu cabal determinen el flux de flotabilitat de l'experiment, el càlcul del qual s'explicarà en el següent apartat.

Amb el procediment descrit, no podem simular la transmissió de calor a través del material de coberta, però sí tenir en compte aquest flux a efectes de balanç d'energia i estimar la seva importància relativa, tal com també s'explicarà en l'apartat següent.

El cabal de la solució salina introduïda a la maqueta ha de ser prou petit per ésser desestimat en front del cabal intercanviat a través de les finestres de ventilació. En els experiments

realitzats, la relació entre ambdós cabals no és superior en cap cas a 0,05. Per tal d'evitar errors derivats de possibles obturacions o del funcionament incorrecte d'alguns emissors, es comprovarà el cabal emes pel conjunt dels emissors al final de cada assaig.

Al llarg de cada experiment, es mesura la conductivitat elèctrica en un punt de la secció (punt de control), utilitzant una cèl.lula de conductivitat a través de la qual hi circula de forma contínua un flux d'aigua procedent del punt de la secció estudiat, amb un cabal també menyspreable. El conductímetre es manté connectat a un data logger, amb el que es realitzaran mesures cada 10 segons. Tal com s'explicarà més endavant, les esmentades mesures serviran per establir, utilitzant tècniques de digitalització i processament d'imatges, la relació entre les intensitats de gris obtingudes en el punt considerat i els increments de densitat de la solució salina que ocupava el punt de control.

El dispositiu descrit es manté en funcionament fins que s'assoleixi el règim permanent, moment a partir del qual les característiques del flux es mantindran constants, així com les conductivitats elèctriques enregistrades en el punt de control.

Cal fer notar que a mesura que el fluid de densitat superior va sortint per les finestres de la maqueta de l'hivernacle, aquest va ocupant la part inferior del tanc d'aigua, observant-se el límit de la zona ocupada per aquest gràcies a la presència del colorant. És important que la relació entre les dimensions de la maqueta i les dimensions del tanc sigui tal, que el règim permanent s'assoleixi abans de que el nivell de la zona ocupada pel fluid més dens s'apropi massa al nivell ocupat per la maqueta, ja que en cas contrari s'alteraria la densitat i el color de l'ambient fluid que envolta la maqueta de l'hivernacle.

IV.2. Lleis d'escala

En els fluxos de ventilació estudiats es va considerar que els efectes de la difusió de calor i de la viscositat eren petits en front de l'advecció. Per poder simular aquests fluxos en laboratori, caldria assegurar que els números de Reynolds i Péclet fossin prou alts (Linden & Simpson 1985, Lane-Serff 1989). Això és el que ens va portar, en les maquetes del túnel, a realitzar diferents repeticions de l'experiment variant l'escala de longituds i la densitat de la solució

salina, per tal d'establir el número de Reynolds mínim que calia assolir per obtenir una bona simulació del flux.

La relació d'escala entre les acceleracions gravitacionals reduïdes (g') al model (subíndex M) i a escala real (subíndex F) les podem obtenir a partir del paràmetre adimensional Π_3 indicat a l'apartat II.2.2.2.2.2., una vegada conegudes les escales de longitud (L) i de flux de flotabilitat (B) fent:

$$\frac{g'_M}{g'_F} = \frac{(B_M / B_F)^{2/3}}{(L_M / L_F)^{5/3}} \quad (\text{IV.1})$$

En el model a escala calculem el flux de flotabilitat com

$$B_M = g'_{SS} \cdot Q_{SS} \quad (\text{IV.2})$$

On Q_{SS} és el cabal de la solució salina i g'_{SS} es calcularà a partir de l'increment de densitat de la solució salina respecte del tanc. Aquest serà l'únic cas en que no realitzarem l'aproximació de Boussinesq, doncs els increments de densitat de la solució salina respecte l'aigua del tanc ($\Delta\rho_{SS}$) poden arribar a ser força alts.

$$g'_{SS} = g \cdot \frac{\Delta\rho_{SS}}{(\rho + \Delta\rho_{SS})} \quad (\text{IV.3})$$

A escala real, on el fluid és aire, és útil considerar que $\Delta\rho/\rho$ és aproximadament igual a $\Delta T/T$, on T és la temperatura absoluta, i així obtenim el flux de flotabilitat com

$$B_F = \frac{g\beta \cdot W}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{IV.4})$$

On β és el coeficient d'expansió, c_p és el calor específic de l'aire i W és la potència de la font de calor que escalfa l'aire.

Com que l'experiment no permet simular el flux de calor a través del material de coberta, en indicar el valor de W ens estarem referint, en realitat, al flux de calor que escalfa l'aire interior de l'hivernacle menys el perdut a través del material de coberta. Quan coneguem l'increment de temperatura provocat per W , podrem calcular la importància relativa de les pèrdues a través de la coberta en front de W i estimar si aquestes són prou grans per provocar modificacions importants de les característiques del flux.

Aplicant l'aproximació de Boussinesq podem calcular, per un valor de B_F donat els increments de temperatura que correspondran als respectius increments relatius de densitat als diferents punts de la secció transversal de l'hivernacle, considerant:

$$\frac{g'_F}{g'_M} = \frac{\Delta T / T}{\Delta \rho / \rho} = \frac{B_F^{2/3} \cdot L_F^{-5/3}}{B_M^{2/3} \cdot L_M^{-5/3}} \quad (\text{IV.5})$$

Obtindrem els increments de temperatura esperats a escala real a partir de la relació lineal:

$$\Delta T = \left(\frac{B_F}{B_M} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{L_M}{L_F} \right)^{5/3} \cdot T \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (\text{IV.6})$$

En els casos que estudiarem en aquest treball, en considerar que es tracta d'hivernacles de gran longitud i estudiar tan sols el que succeeix en una secció transversal d'aquests, és útil introduir el concepte de "flux de flotabilitat per unitat de longitud", que designarem com $b=B/L$ on L serà la longitud total de l'hivernacle. Utilitzant aquest paràmetre, la relació (IV.1) es convertirà en

$$\frac{g'_M}{g'_F} = \frac{(b_M / b_F)^{2/3}}{L_M / L_F} \quad (\text{IV.7})$$

i obtindrem les diferències esperades de temperatura a partir de la relació lineal:

$$\Delta T = \left(\frac{b_F}{b_M} \right)^{2/3} \cdot \frac{L_M}{L_F} \cdot T \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (\text{IV.8})$$

Per mostrar els resultats de forma adimensional i poder així comparar els obtinguts a les diferents experiències (amb diferents escales de longitud i diferents increments de densitat i cabals de la solució salina) definirem el següent paràmetre adimensional θ que caracteritzarà cada un dels punts de la secció transversal del model:

$$\theta = \frac{g'_M \cdot L_M}{b_M^{2/3}} \quad (\text{IV.9})$$

On L_M serà una longitud característica de la secció transversal de la maqueta (prendrem l'amplada)

Observem que el paràmetre adimensional θ és equivalent a $(\Pi_3)^{-2/3}$ (considerant que $b=B/L$). Així mateix, hem d'assenyalar que si en obtenir els paràmetres adimensionals indicats a l'apartat II.2.2.2.2, s'hagués utilitzat com a variable b en lloc de B i s'haguessin escollit b i L com a variables repetides (en comptes de g' i L com fa Lane-Serf (1989)), els paràmetres adimensionals obtinguts haurien estat $(t \cdot b^{1/3} \cdot L^{-1})$, $(V \cdot b^{-1/3})$ i $(g' \cdot L \cdot b^{-2/3})$, sent aquest darrer el que aquí hem anomenat θ .

A tall d'exemple, per una maqueta d'un túnel de 0,25m d'ample, si suposem que les condicions reals són de 3 m d'amplada, 300 K de temperatura exterior i que la calor aportada pel sòl a l'hivernacle és de 300 W/m², el flux de flotabilitat per unitat de longitud a escala real seria de 0,0244 m³·s⁻³ (suposant $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ i $c_p = 1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). En aquestes condicions, a un valor de $\theta = 5$ li correspon un increment de temperatura de 4,29 °C

$$\Delta T = \theta \cdot \frac{b_F^{2/3}}{g' \cdot L_F} \cdot T = 4,29^\circ \text{C} \quad (\text{IV.10})$$

IV.3. Visualització del flux i obtenció de les imatges digitalitzades

El procés de simulació física del flux és filmat en vídeo des de que es comença a injectar solució salina amb colorant a l'interior de la maqueta, fins que s'assoleix el règim permanent.

La concentració de colorant de la solució salina haurà de ser l'apropiada per provocar, a l'interior de la maqueta de l'hivernacle, un adequat nivell d'atenuació de la llum tramesa (veure apartat V.1).

La cambra de vídeo es situa a una distància de 3,25 m del tanc, amb l'eix del sistema òptic perpendicular a la paret frontal del tanc i passant pel punt central de la maqueta. Les condicions de filmació seran estàtiques, amb control manual de la distància focal, així com de la velocitat d'obturació i del grau d'obertura del diafragma.

Abans d'iniciar-se la filmació, s'ajustarà la velocitat d'obturació i l'obertura de diafragma de forma que no hi hagi cap zona de la imatge en que s'assoleixi el nivell de saturació de llum, és a dir, el nivell de gris 255, ja que això podria induir a errors a l'hora de calcular el nivell d'atenuació de la llum provocat pel colorant. Així mateix, s'evitarà la presència de cap altra font d'il·luminació que no sigui la descrita a l'apartat III.1.2.

La cambra de vídeo està connectada a la targeta digitalitzadora instal·lada a l'ordinador, el que permet visualitzar "en viu" les imatges en el monitor de l'ordinador, així com capturar-les directament mentre són visualitzades. També és possible capturar les imatges una vegada enregistrades amb el magnetoscopi. La resolució de les imatges serà de 640x480 píxels i el rang de nivells de gris de 0 a 255.

S'obtidran dues imatges, una abans d'iniciar-se el procés de simulació del flux (background) i l'altra una vegada s'hagi assolit el règim permanent (foreground), que es capturaran directament en viu, en ser aquesta la forma amb la que s'obté un millor nivell de qualitat. Aquestes dues imatges seran les que ens permetran mesurar el nivell d'atenuació de la llum provocat pel colorant del fluid que ocupa cada punt de la secció transversal de l'hivernacle, operant amb ambdues imatges de la forma que s'indicarà a l'apartat IV.5.

IV.4. Relació entre la distribució d'increments d'intensitat de gris de les imatges i la d'increments de densitat relativa

L'efecte de la difusivitat molecular del NaCl així com del colorant en la distribució de les seves concentracions seran menyspreables, gràcies a treballar amb números de Péclet prou grans en tots els experiments (Pe serà de l'ordre de 800 vegades superior a Re). Això ens ha de permetre establir la relació entre els increments d'intensitat de gris observats a cada punt (píxel) de les imatges capturades i els increments de densitat corresponents. Per fer-ho estudiarem dues relacions:

1.- La relació existent entre la concentració de colorant (nigrosin) en l'aigua i la intensitat de llum tramesa

2.- La relació existent, a cada experiment, entre l'increment de conductivitat elèctrica provocat pel NaCl i els increments d'intensitat de gris (la relació entre la conductivitat elèctrica i l'increment relatiu de densitat de l'aigua ja ha estat establerta a l'apartat III.1.4.).

Això donarà lloc a dos possibles procediments per conèixer la distribució dels increments de densitat a partir de les imatges de background i foreground capturades:

El primer procediment consisteix en calcular, a partir dels increments d'intensitat de gris, la concentració de colorant en cada punt de la secció transversal (C_i) i a partir d'aquí, coneixent la concentració de colorant i l'increment relatiu de densitat de la solució salina (C_{SS} i $(\Delta\rho/\rho)_{SS}$) calcular els increments de densitat a cada punt $(\Delta\rho/\rho)_i$, que serà igual a $(\Delta\rho/\rho)_{SS} \cdot C_i / C_{SS}$. La utilització d'aquest procediment implica la realització d'una sola calibració (concentració de colorant vs. atenuació de la intensitat de gris) vàlida per tots els experiments.

El segon procediment consisteix en trobar, per cada un dels experiments, la relació existent entre els increments d'intensitat de gris en un punt al llarg de l'experiència i els increments de conductivitat elèctrica en el mateix punt. Amb aquest procediment hem de fer una calibració específica per cada experiment, però no necessitem conèixer amb exactitud la concentració de colorant a la solució salina.

A continuació indiquem la metodologia utilitzada per la realització dels dos tipus de calibració

IV.4.1. Incrementos d'intensitat de gris vs. concentració de colorant

La relació entre la concentració de colorant en un punt de la secció i la intensitat de llum tramesa (Tam i Swinney 1987), s'ajusta a l'equació:

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot L \cdot C} \quad (\text{IV.11})$$

on I serà la intensitat de llum tramesa en el punt considerat, I_0 serà la intensitat de llum tramesa quan la concentració de colorant és zero, C serà la concentració de colorant en el punt considerat, L serà el gruix de la capa de fluid que s'interposa entre la font de llum i la cambra de vídeo i k és una constant que cal determinar experimentalment.

Suposant que hi ha una relació lineal entre les intensitats de llum tramesa i les intensitats de gris de les imatges digitalitzades, intentarem obtenir una expressió del tipus de la anterior que ens relacioni, en les condicions d'il·luminació abans descrites, la intensitat de gris en un punt de la secció transversal de la imatge digitalitzada i la concentració de colorant del líquid que ocupa el punt homòleg de la maqueta.

Es realitza un assaig consistent en omplir 8 recipients transparents, en forma de paral·lelepípede rectangle de 79 mm d'amplada i de llargada i 62 mm d'alçada amb solucions de negrosín amb concentracions de 0, 1, 2, 3, 5, 7, 10 i 20 p.p.m. respectivament. Els recipients es col·loquen a l'interior del tanc i es prenen imatges de vídeo en les mateixes condicions d'obertura de diafragma en que es realitzaria en els experiments. Es digitalitzen les imatges i s'obtenen dos perfils longitudinals d'intensitat de gris, un al llarg d'un eix horitzontal que travessi tot el panell d'il·luminació i un altre paral·lel a aquest però a una alçada tal que travessi els recipients plens de solució de colorant.

També es fa la mateixa operació amb tots els recipients plens d'aigua sense colorant per tal de mesurar l'atenuació provocada per aquesta i pels recipients i corregir així els resultats anteriors.

IV.4.2 Incrementos d'intensitat de gris vs. conductivitat elèctrica

Per obtenir la relació esmentada, després de realitzar la simulació del flux es capturarà, a partir de les imatges enregistrades en el magnetoscopi de la pròpia vídeo cambra, una imatge cada 10 segons, començant en el mateix moment que s'iniciï la injecció de solució salina. En cada una de les imatges s'identificaran sis píxels, tres dels quals estaran situats molt propers al punt del que s'aspira el fluid que es fa passar a través de la cèl.lula del conductímetre (píxels de control) i els altres tres en punts fora de la maqueta, en els que la presència de colorant al llarg de tot l'experiment sigui nul·la (píxels de referència).

Cada una de les imatges és filtrada amb un filtre de mitjana (apartat IV.5) i a continuació és mesura la intensitat de gris en els píxels de control i els píxels de referència de cada imatge.

Al promig dels increments d'intensitat de gris enregistrat als píxels de control de cada imatge respecte a la intensitat a la imatge del background se li fa correspondre el valor de la conductivitat elèctrica enregistrat pel data-logger en el mateix instant en que s'ha capturat la imatge. Els píxels de referència, als que se'ls hi suposa una intensitat de gris constant al llarg de l'experiment, s'utilitzaran per corregir possibles variacions en la intensitat de gris no degudes a l'acció del colorant. Finalment s'estableix per regressió lineal la relació existent entre els increments d'intensitat de gris deguts al colorant i els increments de conductivitat elèctrica

Tot i que amb el procediment descrit a l'apartat anterior no necessitàvem fer mesures de conductivitat elèctrica al llarg de l'experiment, en els assaigs que es realitzaran al llarg del present treball preferirem utilitzar aquest mètode per establir la relació entre les intensitats de gris i els increments relatius de densitat per les següents raons:

- Resulta difícil mesurar de forma acurada la concentració de colorant quant preparem volums importants de solució salina, especialment quan volem aprofitar solució salina sobrant de l'experiment anterior
- Aquest darrer procediment facilita la detecció d'errors deguts a variacions en la concentració de colorant de la solució salina deguts a una mala solubilització d'aquest o a variacions en les condicions d'il·luminació al llarg d'alguns dels experiments.
- La mesura contínua de la conductivitat elèctrica al llarg de l'assaig ens facilita conèixer en quin moment s'assoleix el règim permanent.

IV.5. Processat digital i anàlisi de les imatges obtingudes

Tant a la imatge del background com a la del foreground se li aplicarà en primer lloc un filtre de mitjana, consistent en substituir el valor de la intensitat de gris de cada píxel per la mitjana aritmètica dels píxels del seu entorn, és a dir dels nou píxels que formen un quadrat de 3x3 píxels que té com a centre el píxel en qüestió. L'aplicació d'aquest filtre té com efecte una *suavització (smoothing)* de la imatge i l'eliminació del soroll "de patró" originat pel sistema de captura d'imatges, que origina una trama molt fina en el conjunt de la imatge (Gonzalez i Wintz, 1987). A la figura IV.1 s'observa una ampliació (1x5) d'una petita àrea d'una imatge abans i després de ser filtrada.

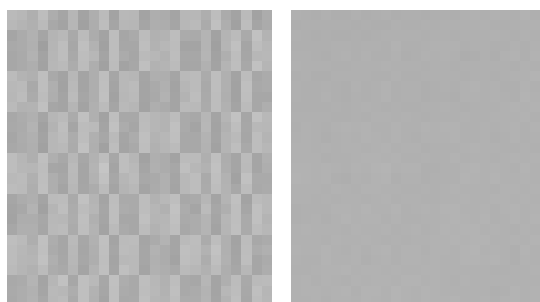


Fig. IV.1: ampliació (1x5) d'una petita àrea d'una imatge abans i després de ser filtrada.

Una vegada han estat filtrades ambdues imatges, abans de passar a determinar les diferències d'intensitat de gris provocades pel colorant present a la imatge del foreground, comprovarem si existeixen diferències d'intensitat en les zones de la imatge no afectades pel colorant. L'existència de petites diferències d'intensitat és habitual a la pràctica, sent la imatge del background la que sol tenir intensitats lleugerament superiors a les zones esmentades. Aquestes diferències poden ser atribuïbles al fet que en el foreground, en ser absorbida pel colorant part de la llum procedent de la font d'il·luminació, disminueix la quantitat de llum que és reflectida pel conjunt de l'estructura i contribueix, també, a il·luminar el conjunt de la imatge. També podrien ser parcialment degudes a variacions en la intensitat de la font d'il·luminació o bé a variacions no controlades provocades pel sistema d'obtenció i captura de les imatges.

Per fer aquesta comprovació, mesurarem la intensitat de gris en 10 píxels de la imatge del foreground situats fora de la zona d'influència del colorant i repartits en tot l'entorn exterior de la secció i promitjarem els seus valors. Farem el mateix en els píxels homòlegs de la imatge del background. La diferència del valor obtingut a la imatge del background menys l'obtingut a la imatge del foreground l'arrodonirem en unitats i el designarem amb la lletra " d ".

Per determinar les diferències d'intensitat de gris entre background i foreground provocades per la presència de colorant, realitzarem una operació aritmètica simple entre les dues imatges, consistent en calcular píxel a píxel la intensitat de gris del background menys la del foreground menys " d ", amb el que s'obtindrà una nova imatge en la que la intensitat de gris de cada píxel representarà l'increment provocat pel colorant a la imatge del foreground.

Per cada valor d'increment d'intensitat de gris obtingut, podem calcular l'increment de densitat relativa que li correspon tal com s'ha indicat a l'apartat IV.4. i a partir d'aquí, el valor del paràmetre adimensional θ per cada punt, definit a l'equació IV.9. Així mateix, una vegada conegut el valor de θ podem calcular, per unes condicions reals donades de temperatura exterior i flux de calor, els increments de temperatura corresponents a cada punt a partir de l'equació IV.10, que seran directament proporcionals a θ .

Amb la nova imatge obtinguda, utilitzant el software de processat i anàlisi d'imatges, obtindrem perfils longitudinals verticals i/o horitzontals d'intensitats de gris, que tal com s'ha assenyalat anteriorment podrem convertir en perfils longitudinals de valors de θ o d'increments de temperatura.

El mateix software ens permet obtenir histogrames de freqüències d'una zona de la imatge digitalitzada, proporcionant un fitxer que indica, per cada valor d'intensitat de gris, el número de píxels de la zona analitzada que el presenten. Amb aquesta informació podrem calcular els valors promitjos de θ a l'interior de l'hivernacle i el seu coeficient de variació, que ens indicarà el grau d'homogeneïtat de les temperatures. Aquest pas però presenta una dificultat, ja que la zona de la imatge analitzada ha de ser necessàriament rectangular. Per resoldre el problema, sabent que les intensitats de gris fora de l'hivernacle han de ser iguals o molt properes a zero excepte en les zones ocupades pel doll de sortida de les finestres, analitzarem la zona rectangular més petita possible que contingui tota l'àrea d'interès, calcularem el percentatge de l'àrea ocupada per zones exteriors no afectades pel colorant i sostrauem, als valors d'intensitat de gris més baixos (començarem pel zero i arribarem, si cal al 1 i en alguns casos al 2) un número de píxels igual al mateix percentatge del total.

Per mostrar gràficament la distribució dels valors de θ en la secció transversal de l'hivernacle, modificarem la imatge anterior creant un mapa de transició d'intensitats de gris, el qual a cada valor d'intensitat d'entrada n'hi fa correspondre un altre de sortida. Amb aquesta tècnica crearem una nova imatge en la que utilitzarem un número reduït de nivells d'intensitat de gris (de 9 a 14 nivells) amb valors equidistants compresos entre 0 i 255, cada un dels quals es correspondrà amb un interval de valors del paràmetre adimensional θ que s'indicarà en una taula adjunta. Per cada valor d'intensitat de gris de la imatge original se li calcularà el valor del paràmetre adimensional θ i se li assignarà, a la imatge de sortida, el nivell de gris que li correspongui per al valor calculat.

Amb el procés descrit obtindrem una nova imatge en la que podrem identificar fàcilment, a partir dels nivells d'intensitat de gris, la distribució dels valors de θ a la secció transversal de l'hivernacle. A la figura IV.2 es mostra el mapa de transició utilitzat per una de les imatges, així com la imatge esmentada abans i després de la transformació (a la imatge inicial se li ha

hagut d'augmentar en un valor constant la intensitat de gris de tots els píxels per tal de fer identificable a simple vista el seu contingut).

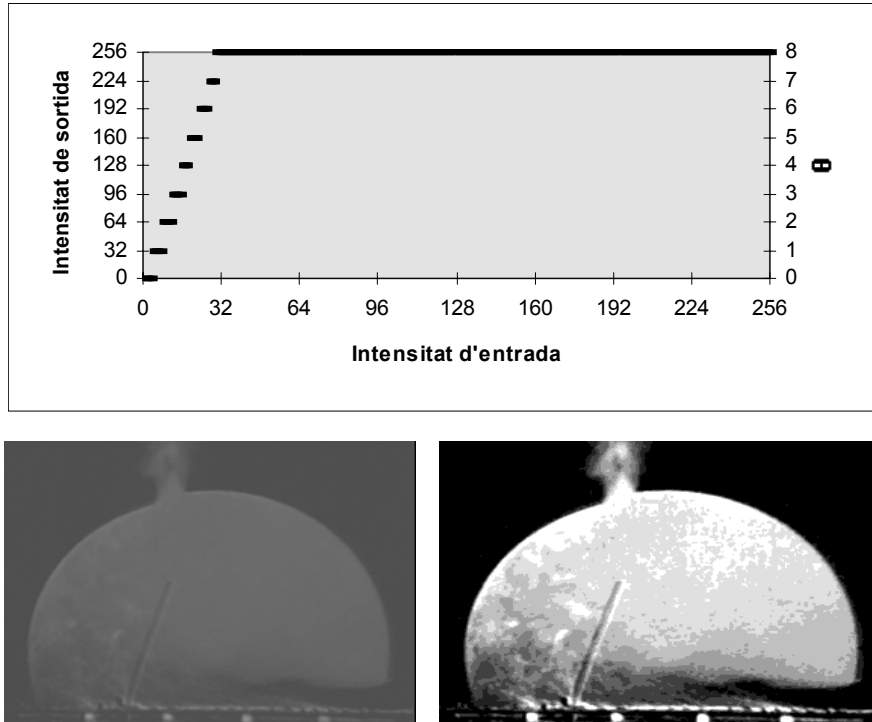


Fig IV.2: mapa de transició utilitzat per una de les imatges, on s'assigna a cada intensitat d'entrada una intensitat de sortida que es correspondrà amb un interval de valors del paràmetre adimensional θ . A la part inferior, la imatge esmentada abans i després de la transformació (a la imatge inicial se li ha augmentat en un valor constant la intensitat de gris de tots els píxels per tal de fer identificable a simple vista el seu contingut).

IV.6. Plantejament d'un model teòric per l'estimació dels increments de temperatura esperats

En les experiències amb maquetes d'hivernacle-túnel es calculen els increments de temperatura corresponents als increments mitjans de densitat obtinguts al laboratori per una potència (W) de 200, 350 i 500 W per metre quadrat de sòl. Els resultats obtinguts es contrasten amb els obtinguts per aplicació d'un model teòric construït a partir del procediment proposat per Bruce (1978) per al càlcul del número de renovacions, segons el qual, en el cas de dues finestres contínues amb la mateixa obertura (h), amb un increment de temperatura entre l'aire interior i exterior ΔT i una diferència d'altura entre el centre d'ambdues (H), molt superior a l'altura de la finestra inferior h ,

el cabal per unitat de longitud que entraria a través de la finestra inferior de l'hivernacle (Q_{in}) el podríem determinar a partir de:

$$Q_{in} = C \cdot h \cdot \left(g \cdot \frac{\Delta T}{T} \cdot H \right)^{1/2} \quad (\text{IV.12})$$

On C és el coeficient de descàrrega de les obertures que segons Bot (1983) i De Jong (1990) serà de l'ordre de 0,75 per finestres amb una longitud molt superior a la seva alçada.

Si anomenem A a l'àrea de la secció transversal de l'hivernacle, la taxa de renovació (R) pel cas estudiat serà:

$$R = C \cdot \frac{h}{A} \cdot \left(g \cdot \frac{\Delta T}{T} \cdot H \right)^{1/2} \quad (\text{IV.13})$$

D'altra banda, si designem amb w el flux net de calor aportat a l'aire interior de l'hivernacle per unitat de superfície de sòl, la relació entre ΔT i R per un determinat valor de w vindrà determinada per l'expressió:

$$R = \frac{b \cdot w}{A \cdot c_p \cdot \rho \cdot \Delta T} \quad (\text{IV.14})$$

On b és l'amplada de la secció transversal de l'hivernacle

El flux de calor w considerat a l'equació serà el resultat de restar a la radiació neta total absorbida pel sòl de l'hivernacle, el flux de calor per conducció a través del sòl i el flux de calor a través del material de coberta i dividir el valor obtingut per la superfície del sòl de l'hivernacle.

Amb les dues equacions plantejades, es pot calcular el número de renovacions per unitat de temps i l'increment de temperatura per qualsevol valor de w .

Finalment, per tal de valorar la importància relativa que podrien assolir les pèrdues de calor a través de la coberta (w_{cb}) en front de w , calcularem aquestes a partir de l'anàlisi realitzat per