



5

TECNOLOGIES
AVANÇADES
EN ESTALVI
I EFICIÈNCIA
ENERGÈTICA



Generalitat de Catalunya
Departament d'Indústria i Energia
Direcció General d'Energia

HIVERNACLES
AGRÍCOLES

TECNOLOGIES AVANÇADES EN ESTALVI I EFICIÈNCIA ENERGÈTICA

HIVERNACLES AGRÍCOLES

**Col.lecció: TECNOLOGIES AVANÇADES EN ESTALVI
I EFICIÈNCIA ENERGÈTICA**

5



**Generalitat de Catalunya
Departament d'Indústria i Energia
Direcció General d'Energia**

Institut Català de Bibliografia. Dades CIP:

Tecnologies avançades en estalvi i eficiència energètica: hivernacles agrícoles
Bibliografia

ISBN: 84-393-1612-7

I. Mitjà i Sarvisé, Albert, dir. II. Catalunya. Generalitat.

Direcció General d'Energia. III. Col·lecció 1. Hivernacles --
631.234:620.9

DIRECCIÓ: Albert Mitjà

AUTORS: Carles Torra

EQUIP DE TREBALL: Alfons Cabezas, Joan Josep Escobar, Joan Esteve
(Servei d'Estalvi Energètic i Energies Renovables)

Ramón Bella, Jaume Claramunt, Toni González
(Col·laboradors externs)

José L. Montero (IRTA)

EDICIÓ: Montserrat Acero

Primera edició: Febrer 1991

Tiratge: 1000

© GENERALITAT DE CATALUNYA

DEPARTAMENT D'INDÚSTRIA I ENERGIA

Direcció General d'Energia

ISBN: 84-393-1612-7

Dipòsit Legal: B-10.035-1991

Disseny coberta: Toni Miret

Il·lustracions: Angeles Atoche

Fotocomposició: Direcció General d'Energia.

Impressió: Viking, S.A. (Barcelona)



**PUBLICACIÓ COFINANÇADA PER
LA GENERALITAT DE CATALUNYA
I LA COMUNITAT ECONÒMICA EUROPEA**

FEDER

FONS EUROPEU DE DESENVOLUPAMENT REGIONAL



**Generalitat de Catalunya
Departament d'Indústria i Energia
Febrer 1991**

Índex

1. INTRODUCCIÓ	3
2. EL CULTIU EN HIVERNACLE.....	9
2.1. Introducció: Evolució històrica i factors que afecten el cultiu intensiu en hivernacle	9
2.2. Factors climàtics exteriors	10
2.3. Modalitats de cultiu	12
2.3.1. Introducció.....	12
2.3.2. Les tècniques de cultiu.....	14
2.3.3. Paràmetres econòmics del cultiu	15
2.4. Factors climàtics interiors	16
2.4.1. Introducció.....	16
2.4.2. Exigències microclimàtiques d'un cultiu	16
2.4.3. La temperatura	19
2.4.4. La humitat ambient.....	19
2.4.5. La llum	20
2.4.6. El CO ₂	20
2.4.7. Conclusions	21
3. TIPUS D'HIVERNACLES.....	25
3.1. Introducció	25
3.2. Tipologia constructiva	26
3.3. L'efecte hivernacle	31
3.4. Materials de coberta	31
3.4.1 Paràmetres característics	31
3.4.2 Materials de coberta rígids.....	33
3.4.2.1 Vidre.....	33
3.4.2.2 Plàstics	33

3.4.3	Materials de coberta flexibles.....	35
3.4.4	Transmissió global de l'hivernacle.....	36
4.	COMPORTAMENT TÈRMIC DELS HIVERNACLES.....	39
4.1.	Introducció	39
4.2.	Fenòmens de transferència de calor.....	39
4.2.1.	Transferència de calor per conducció	39
4.2.2.	Transferència de calor per radiació	41
4.2.3.	Transferència de calor per convecció.....	42
4.2.4.	Transferència global de calor.....	44
4.3.	Balanç tèrmic d'un hivernacle	45
4.3.1.	Introducció.....	45
4.3.2.	Fonts de calor.....	45
4.3.3.	Pèrdues de calor a través del material de coberta.....	46
4.3.4.	Pèrdues de calor latent	47
4.3.5.	Comportament tèrmic del terra de l'hivernacle.....	48
4.3.6.	Balanç tèrmic global de dia i de nit	48
4.4.	Estudi energètic de diversos tipus d'hivernacle a les quatre zones climàtiques de Catalunya.....	50
5.	HIVERNACLES: IMPLANTACIÓ I DISSENY. TÈCNIQUES D'ESTALVI ENERGÈTIC	55
5.1	Introducció	55
5.2	Factors d'implantació.....	55
5.2.1	Elecció del lloc.....	55
5.2.2	Orientació i disposició dels hivernacles	56
5.2.3	Protecció al vent dels hivernacles.....	56
5.3	Factors de disseny i actuacions de rehabilitació	57
5.3.1	Elecció del material de coberta.....	57
5.3.2	Millora de l'estanqueïtat de l'hivernacle	58
5.3.3	Protecció doble temporal	58

5.3.4	Doblament o aïllament de parets	58
5.3.4.1	Introducció	58
5.3.4.2	Doblament de parets i doble coberta.....	60
5.3.4.3	Pantalles tèrmiques.....	61
6.	SISTEMES DE CALEFACCIÓ D'HIVERNACLES	67
6.1	Introducció	67
6.2	Sistemes convencionals.....	68
6.2.1	Combustibles emprats.....	68
6.2.2	Sistemes de convecció.....	68
6.2.2.1	Equips	68
6.2.2.2	Avantatges i inconvenients	69
6.2.2.3	Distribució de l'aire calent.....	70
6.2.3	Sistemes d'irradiació	72
6.2.3.1	Equips	72
6.2.3.2	Avantatges i inconvenients	72
6.2.3.3	Distribució	73
6.2.4	Sistemes per conducció.....	73
6.2.5	Regulació del sistema de calefacció	74
6.2.6	Millores de la instal·lació de calefacció.....	74
6.3	Aprofitament de recursos a baixa temperatura.....	77
6.3.1	Introducció.....	77
6.3.2	Avantatges i inconvenients dels sistemes a baixa temperatura	77
6.3.3	Distribució de la calor a baixa temperatura.....	77
6.3.4	Aprofitament de l'energia geotèrmica per escalfar hivernacles	78
6.3.5	Aprofitament de la calor residual de processos industrials.....	79
7.	CALEFACCIÓ D'HIVERNACLES AMB ENERGIA SOLAR.....	83
7.1.	Introducció	83
7.2.	Captadors solars separats.....	84

7.3	Captadors integrats a l'hivernacle	87
7.4	L'hivernacle com a captador solar	90
8.	REFRIGERACIÓ D'HIVERNACLES	101
8.1.	Introducció	101
8.2.	Ventilació dels hivernacles.....	102
8.2.1.	Introducció.....	102
8.2.2.	Ventilació natural	103
8.2.3 .	Ventilació mecànica.....	108
8.3.	Ombrejament.....	108
8.3.1.	Introducció.....	108
8.3.2	Emblanquinament.....	109
8.3.3.	Pantalles d'ombrejament.....	109
8.4	Refredament d'hivernacles per evaporació.....	113
8.4.1	Introducció.....	113
8.4.2	Refredament per panells evaporadors.....	114
8.4.3	Aspersió i nebulització d'aigua	115
9.	REGULACIÓ DEL CLIMA INTERIOR	119
9.1.	Introducció	119
9.2.	Tipus de regulació i actuacions.....	121
9.3.	Regulació dels equips.....	122
9.3.1.	Regulació de la calefacció.....	122
9.3.2.	Regulació de la ventilació.....	122
9.3.3.	Regulació de la pantalla d'ombrejament o tèrmica	123
9.3.4.	Regulació de sistemes de calefacció amb energia solar	123
9.3.5.	Regulació de la nebulització	123
9.3.6.	Regulació de la injecció de CO2.....	124
9.3.7.	Regulació de la irrigació.....	124

9.4. Gestió climàtica per microordinador	124
9.4.1. Introducció.....	124
9.4.2. Gestió dels equipaments.....	125
9.4.3. Organització del sistema.....	126
 BIBLIOGRAFIA	 129
 RELACIÓ D'EMPRESSES DEL SECTOR	 133
 ADRECES D'INTERÈS	 137

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ

1. INTRODUCCIÓ

El cultiu forçat o protegit és aquell que es realitza en unes estructures productives (hivernacles, proteccions i umbracles) amb la finalitat de crear un microclima favorable per al desenvolupament de les plantes. Els objectius del cultiu protegit són augmentar la producció i millorar la qualitat i la precocitat d'alguns conreus amb relació al seu cultiu a l'exterior, així com produir plantes d'origen climàtic diferent a l'ambient natural on es desitja cultivar-les.

Tot i que és difícil apuntar dades a nivell macroeconòmic, atesa la dispersitat del sector, a Catalunya, d'acord amb les dades publicades en l'anuari estadístic de l'any 1987, es produeixen 22 milions d'unitats de planta ornamental i 27 milions de dotzenes de flor tallada. Com es pot observar a la taula 1.1., la província de Barcelona representa amb relació a la producció total de Catalunya el 82 i el 92 % d'aquests dos tipus de conreus, respectivament. Per les seves condicions climàtiques i la seva proximitat a un centre de consum important com és Barcelona, la comarca del Maresme centralitza pràcticament la totalitat de la producció esmentada, de tal manera que es pot considerar l'àrea de més tradició i densitat de cultiu de Catalunya.

El Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca de la Generalitat de Catalunya, dins

del pla integral del Maresme, va dur a terme l'any 1986 un inventari de les estructures productives d'aquesta comarca (ref. 1) amb l'objectiu d'analitzar i caracteritzar la variabilitat dels models de proteccions i hivernacles i dels equipaments emprats en la seva climatització.

A fi de recollir la informació necessària per realitzar l'estudi esmentat, es van realitzar 429 enquestes en explotacions de cultiu protegit (exceptuant-ne el maduixot), i es van avaluar en 263 ha. la superfície total coberta en la comarca.

A grans trets, les característiques més importants de les estructures productives analitzades són la seva diversitat i el baix nivell de tecnificació existent en els sistemes de control climàtic. Pel que fa al seu ritme d'implantació, s'observa una davallada general (35%) en la construcció d'hivernacles i proteccions durant el període 1981-86 en relació amb el 1975-80, encara que s'ha mantingut el nivell de construcció pel que fa als hivernacles calefactats, més tecnificats, i sembla ser que la tendència actual segueix aquesta mateixa línia.

La integració de l'Estat espanyol en la Comunitat europea representa un repte important, no mancat de dificultats, pel que fa al cultiu en hivernacle, amb problemàtiques diferents segons es tracti d'horticultura, flor tallada o planta ornamental.

Taula 1.1. Producció de flor i planta ornamental a Catalunya, d'acord amb les dades publicades en l'anuari estadístic de l'any 1987.

	Barcelona	Girona	Lleida	Tarragona	Catalunya
Planta ornamental x 1.000	17.790	800	195	3.000	21.785
Flors x 1.000 dotzenes	24.461	500	130	1.460	26.551

El cultiu en hivernacle de productes d'horta i flor tallada presenta a Catalunya una forta competència amb altres grans zones productores de l'Estat, com Andalusia i Llevant. Pel que fa a la flor tallada, aquest gran volum de producció es manifesta en el fet que Espanya és el cinquè país exportador del món, i el segon pel que fa al clavell.

La planta ornamental presenta, en canvi, unes millors perspectives, atès que el mercat no es troba tan saturat a causa de l'augment, en els darrers anys, del consum intern, en especial, dins de l'àrea de Barcelona, tot i que aquest és inferior al d'altres països europeus.

Actualment, tota la planta ornamental verda prové pràcticament d'Holanda, país on el cultiu en hivernacle disposa d'estructures productives força robotitzades i d'una comercialització molt agressiva, la qual cosa implica una bona relació qualitat/preu. Pel que fa a la planta ornamental de flor, la competència no és tan considerable i fins i tot se n'exporta al sud de França.

Les perspectives de futur del cultiu de la planta ornamental i la flor tallada es presenten favorables a causa d'algunes iniciatives que han fructificat en els darrers anys, com ara són:

- la millora de les estructures comercials (cooperatives de productors, Mercat de Flor i Planta Ornamental de Catalunya);

- la canalització de la recerca de l'IRTA (Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentària) atenent les demandes del sector ornamental, mitjançant la creació de l'empresa INORSA (Investigació Ornamental, S.A.).

INORSA és una nova empresa de característiques singulars al nostre país creada conjuntament pel Mercat de Flor i Planta Orna-

mental de Catalunya, a Vilassar de Mar, i per l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA).

L'objectiu d'INORSA és realitzar recerca aplicada que pugui ser transferida als agricultors, amb una estructura àgil i flexible que orientarà la investigació segons les necessitats del mercat. Així es pretén aconseguir una dinamització comercial i una producció de valor afegit més alt que l'estrictament productiu, ja que també es poden comercialitzar les plantes mares de les noves varietats introduïdes.

Pel que fa a les estructures productives, la tendència actual sembla apuntar, com s'ha dit abans, cap a una major tecnificació de les estructures productives, tractant alhora d'obtenir un bon nivell de competitivitat davant les produccions foranes, com pot ser el cas d'Holanda.

En general, les tècniques emprades en el cultiu en hivernacle són complexes i requereixen que l'empresari disposi d'uns coneixements bàsics i un reciclatge constant en noves tecnologies tant d'estalvi energètic com de gestió climàtica de l'hivernacle mitjançant l'ús d'ordinadors. Aquests coneixements són fonamentals per produir qualitat, obtenir bons rendiments, incidir en el mercat en èpoques favorables i ser competitius.

Per tal d'afrontar aquest repte, el Servei d'Estalvi Energètic i Energies Renovables de la Direcció General d'Energia desenvolupa la seva línia de promoció de tecnologies energètiques eficaces en els diferents sectors productius. En el sector agrícola primari aquesta línia es concreta en la promoció de tecnologies paral·leles d'aprofitament dels recursos energètics a l'abast, com la fotovoltaica, el biogàs, els captadors solars, l'as-

secatge i els hivernacles energèticament eficients.

És en aquest marc general que es publica aquest dossier, que exposa els coneixements bàsics sobre l'estat actual de la tecnologia dels hivernacles, el grau d'implantació de les diverses tècniques (específicament al Maresme) i les eines de càlcul per determinar el comportament tèrmic d'un hivernacle i poder avaluar la rendibilitat econòmica tant de les mesures d'estalvi considerades com de les diverses opcions de cultiu proposades.

En un nivell més específic, s'hi incideix en els aspectes temàtics següents:

- *La diversitat dels materials plàstics disponibles, que, juntament amb l'aparició de les formes circulars, han permès disminuir el pes de l'estructura i reduir costos.*
- *Les tècniques d'estalvi energètic, sobretot desenvolupades a partir dels anys setanta.*

- *Les noves tècniques de calefacció d'hivernacles, que permeten disminuir el gradient tèrmic en sentit vertical i horitzontal en incidir sobre la distribució racional de la calor, mitjançant la disposició adient de les conduccions de distribució de l'aigua calenta o la canalització de l'aire calent.*

- *La utilització de fonts de calor a baixa temperatura, i molt especialment l'aprofitament màxim de l'energia solar incident, per tal de dissenyar hivernacles d'alt rendiment energètic.*

- *Les tècniques de refrigeració dels hivernacles per tal de mantenir la temperatura per sota del màxim biològic admissible.*

- *La gestió climàtica d'un hivernacle mitjançant microordinador, que permet mantenir el conjunt de factors climàtics (temperatura, llum, humitat i CO₂) al voltant dels valors de consigna establerts.*

L'objectiu del dossier és, doncs, essencialment pràctic: oferir una guia d'informació i assessorament per millorar la gestió energètica dels hivernacles agrícoles i presentar les tecnologies energètiques innovadores referides a aquest sector.

CAPÍTOL 2. EL CULTIU EN HIVERNACLE

2. EL CULTIU EN HIVERNACLE

2.1. Introducció: Evolució històrica i factors que afecten el cultiu intensiu en hivernacle

El cultiu industrial en hivernacle, de la forma en què és actualment conegut, es va originar probablement a Holanda, durant el segle XVII (any 1600) a l'empara del seu potencial naval. Holanda representava la meitat de l'activitat marítima mundial i Amsterdam era la primera ciutat comercial del món. L'alt nivell de vida juntament amb els canals comercials existents van afavorir les condicions d'un mercat i van donar peu a una indústria que a hores d'ara encara és la líder del sector a tot el món.

El cultiu de flors en hivernacle i la possibilitat d'obtenir productes d'horta comestibles fora de temporada es va desenvolupar inicialment al voltant de les corts reials existents a Europa. Així, a Espanya, els primers hivernacles s'hi van construir en llocs com ara Aranjuez, L'Escorial i La Granja per proveir de flors els jardins existents. Alguns dels hivernacles instal·lats al segle passat en aquests llocs del Patrimoni Nacional encara es conserven actualment i han estat objecte de rehabilitació durant els anys vuitanta.

A Catalunya, els primers hivernacles instal·lats amb finalitats comercials s'han de situar probablement al Maresme. Durant els anys setanta es va experimentar una gran expansió a causa de la introducció en el mercat d'una gran varietat de plàstics destinats al forçat de cultius. A la taula 2.1. s'hi mostra la distribució a Catalunya del cultiu protegit existent d'acord amb les dades publicades l'any 1978 (ref. 2). Com s'hi pot ob-

servar, la comarca del Maresme representa el 72 % i el 93 %, respectivament, de la producció d'horta i flors.

Altres dades d'aquesta comarca, referides a l'any 1986, d'acord amb l'estudi abans esmentat (ref.1), assignen una superfície de proteccions i d'hivernacles freds i calents de 98, 121,5 i 27 hectàrees respectivament, o sigui el doble que l'any 1978 (vegeu taula 3.1). Al llarg d'aquest dossier es farà referència a les dades obtingudes, amb molt rigor estadístic, en aquest estudi.

Així, l'anàlisi de l'edat de les estructures productives existents actualment a la comarca del Maresme (263 ha) es mostra a la figura 2.1. S'hi pot apreciar com més del 50 % de la superfície protegida (134,6 ha) va ser instal·lada entre els anys 1975-80. Si es compara el període anterior amb el comprès entre 1981-86, el ritme d'instal·lació de nous hivernacles ha experimentat un descens del 35 %.

Pel que fa a hivernacles més tecnificats, a la mateixa figura 2.1. s'hi observa que la superfície calefactada ha augmentat un 66,7 %



Foto 1: Hivernacle rehabilitat a l'Escorial.

en els últims 10 anys, i que no hi ha gaire diferència entre la superfície del període 81-86 i la de l'anterior (75-80), al contrari del que succeeix amb la superfície coberta total. La tendència actual és, doncs, de construir hivernacles més qualificats tècnicament, i són diverses les empreses que poden oferir un bon nivell tecnològic tant pel que fa als cobriments com als equipaments necessaris per realitzar el cultiu protegit.

Els factors més importants que afecten aquest cultiu intensiu protegit són de dos tipus: climatològics i socio-econòmics.

La utilització d'hivernacles permet millorar la microclimatologia en l'entorn de les plantes augmentant la seva producció. El manteniment d'aquest clima interior òptim per al cultiu intensiu, requereix un consum energètic que serà més alt o més baix segons les característiques constructives i les condicions climàtiques del lloc d'ubicació de l'hivernacle.

Els factors socioeconòmics més importants són:

- *Potencial humà i tecnològic.*
- *Proximitat a nuclis de consum importants.*
- *Bona infraestructura de transports i comunicacions.*

A Catalunya, ambdues condicions s'han donat al Maresme que, com s'ha pogut observar, concentra, juntament amb altres comarques de clima mediterrani, la major part dels cultius intensius existents. De tota manera, qualsevol de les altres zones climàtiques pot oferir perspectives de rendibilitat, sobretot quan es tracta de revaloritzar terrenys ben situats tant microclimàticament com pel que fa a les comunicacions.

En aquest capítol, s'hi analitzen els conceptes bàsics i els factors a considerar a l'hora de plantejar el cultiu a realitzar de forma intensiva en un hivernacle.

2.2. Factors climàtics exteriors

Els paràmetres climàtics del lloc d'emplaçament d'un hivernacle són un criteri de disseny important atès que en funció dels valors que adquireixin variaran les condicions del disseny i els consums energètics ocasionats per mantenir unes determinades condicions de confort ambient dins de l'hivernacle.

La diversitat climàtica de Catalunya és gran a causa de l'altitud, la distància al mar, la disposició del relleu i la latitud. A aquesta diversitat s'hi ha d'afegir la gran variació climàtica en petits sectors de l'espai sobretot als llocs de fort gradient altitudinal, on és difícil diferenciar i definir clarament totes les varietats climàtiques i d'establir-ne els límits.

La temperatura ambient, la velocitat i la direcció del vent i la radiació solar incident són els paràmetres climàtics que afecten

Taula 2.1. Superfície dedicada al cultiu en hivernacle d'horta i flor d'acord amb les dades referides a l'any 1978 (ref. 2).

Comarca	Horta (Ha)	Flors (Ha)	Total (Ha)
El Maresme	37	87	124
Baix Llobregat	6	2	8
Baix Camp	3	3	6
Delta de l'Ebre	5	1	6
Total	51	93	144

més directament el disseny constructiu i tèrmic d'un hivernacle.

La radiació solar que rep una superfície depèn, a part de les condicions atmosfèriques, de l'orientació d'aquesta superfície amb relació al Sol. En qualsevol cas, la quantitat de radiació solar incident sobre una superfície ve donada per la suma de tres components:

- *Radiació directa: prové directament del Sol, i arriba a la superfície sense cap canvi de direcció.*
- *Radiació difusa: incideix sobre la superfície amb direcció aleatòria, car és resultat de les reflexions i refraccions de la radiació directa en l'atmosfera, núvols, partícules de CO₂ i vapor d'aigua, etc.*
- *Radiació reflectida: procedeix de la reflexió sobre el terra o edificis dels voltants.*

El valor de la radiació global sobre una superfície pot ésser obtingut per mesura directa o mitjançant mètodes de càlcul basats en correlacions analítiques. En general, a les estacions radiomètriques es mesura la radiació global i difusa incident sobre una superfície horitzontal. Per a altres superfícies, amb

qualsevol orientació i inclinació sobre l'horitzontal, la radiació es determina a partir dels angles que defineixen l'orientació de la superfície sobre el Sol. Aquests angles són la inclinació respecte a l'horitzontal i l'azimut respecte al sud.

L'estudi de la radiació solar a Catalunya és un treball recent i encara incomplet. Una de les primeres aportacions a aquest estudi va ser la publicació l'any 1982, del llibre "Energia Solar a Catalunya. Radiació solar i insolació", on es recullen les dades de radiació solar existents fins al moment, a diferents llocs de Catalunya, així com un estudi teòric sobre el fenomen (ref. 3).

Com a conseqüència d'aquest treball es plantejà la necessitat d'endegar l'Atles de Radiació Solar de Catalunya, i es va establir una xarxa formada per un conjunt de deu estacions radiomètriques -la instal·lació de les quals es va iniciar l'any 1986- repartides al llarg del territori català.

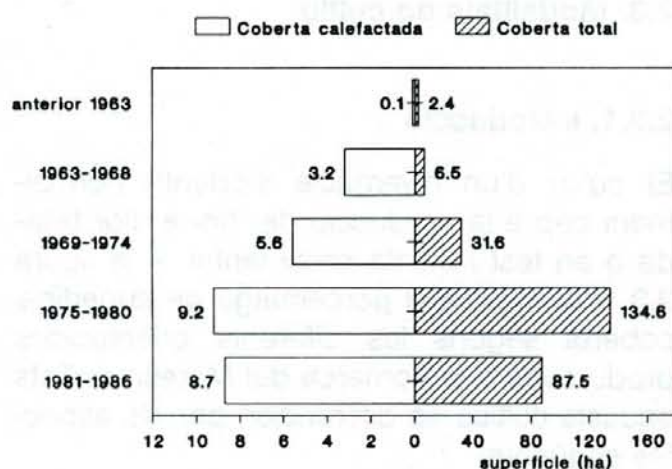


Fig. 2.1. Període de construcció de la superfície coberta total i de la calefactada existent actualment a la comarca del Maresme.



Foto 2: Estació de mesura de radiació solar. Detall del piròmetre de radiació global.

La temperatura és l'altre paràmetre bàsic a utilitzar en l'avaluació de les pèrdues tèrmiques per dimensionar el sistema de calefacció.

Les dades tèrmiques mensuals disponibles de 118 estacions repartides per Catalunya són: temperatura mitjana, temperatura mitjana de les màximes i les mínimes i temperatura màxima i mínima absoluta, totes elles adquirides durant períodes de temps variable. Un recull d'aquestes dades es pot trobar en el llibre *Agroclimatologia d'Espanya* (ref. 4).

A l'hora de dissenyar un hivernacle és molt important realitzar el seu balanç tèrmic a partir de les característiques, forma i dimensions de la coberta i de les temperatures obtingudes en l'estació d'adquisició de dades més propera al lloc d'ubicació de l'hivernacle.

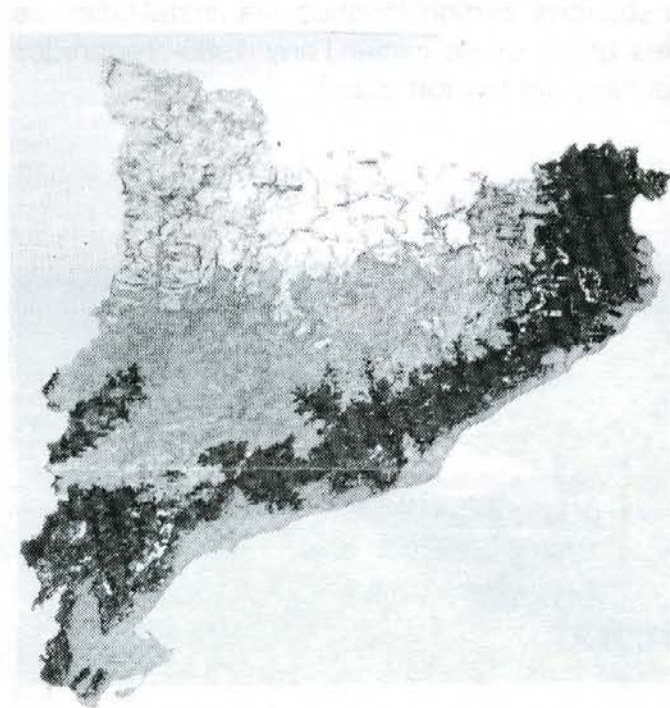


Fig. 2.2. Zones climàtiques de Catalunya.

En aquest estudi, per tal de simplificar l'anàlisi comparativa de les demandes de calor d'un hivernacle, s'han utilitzat les dades representatives de les quatre zones climàtiques establertes en la norma sobre aïllament tèrmic NRE-AT-87 que s'utilitza en la construcció d'edificis. El mapa climàtic que s'hi mostra a la figura 2.2. es divideix en quatre zones climàtiques: litoral mediterrani, mediterrani interior, central i pirenaic. A la taula 2.2. s'hi mostren les temperatures mitjanes mensuals de les poblacions representatives de cada zona climàtica. També s'hi mostren els valors diürns i nocturns determinats d'acord amb les equacions que s'exposen a la taula. Per a la zona del litoral mediterrani s'han tabulat les temperatures de dues poblacions diferents: l'una és Cabrils i l'altra Tortosa. La primera és molt representativa d'una zona com el Maresme de gran tradició en el cultiu en hivernacles. La segona representa una zona com el Delta de l'Ebre que presenta un gran potencial futur d'aplicació.

2.3. Modalitats de cultiu

2.3.1. Introducció

El cultiu d'un hivernacle s'orienta normalment cap a la producció de: horta, flor tallada o en test i planta ornamental. A la figura 2.3. s'hi mostra el percentatge de superfície coberta segons les diferents orientacions productives a la comarca del Maresme. Tots aquests cultius es diferencien per els aspectes següents:

- el material vegetal
- la intensitat de cultiu

El material vegetal és l'espècie, raça i conjunt de característiques que determinen unes exigències ambientals semblants per al seu desenvolupament. Per definir les característiques pròpies del material vegetal es parla d'espècies, famílies de flors, fruits o plantes, i de classes. Espècies vegetals són, per exemple, el gerani, que té diverses classes, com el "gerani zonal" o el "gerani peltargonium".

La intensitat és, en termes econòmics, el nivell d'inversió per unitat de superfície que es materialitza en els aspectes següents:

- *Hivernacle o protecció: estructura i material de coberta.*
- *Equipaments: ventilació, calefacció, irrigació, pantalles, etc.*
- *Despeses d'explotació: tècniques de cultiu, necessitats climàtiques interiors.*

Taula 2.2. Temperatures mitjanes mesurades de les poblacions representatives de cada tipus de clima.

			CLIMA1			CLIMA2			CLIMA3			CLIMA4			
MESOS	TORTOSA			CABRILS			FIGUERES			MANRESA			VIELLA		
	T	Td	Tn	T	Td	Tn	T	Td	Tn	T	Td	Tn	T	Td	Tn
GENER	9,2	11,6	6,8	9	11,3	6,7	7,2	9,9	4,5	3,9	6,7	1,1	2,6	5,2	0
FEBRER	10,3	12,9	7,7	9,1	11,5	6,7	8,2	11	5,4	5,7	9,1	2,3	3,2	6,3	0,1
MARÇ	12,9	15,7	10,1	10,6	12,8	8,4	11,2	14,1	8,3	9,8	13,4	6,2	6,8	10	3,6
ABRIL	15,4	18,2	12,6	13,2	15,3	11,1	13,9	16,7	11,1	12,3	16,1	8,5	8,3	1,4	5,2
MAIG	18,3	21,1	15,5	16,2	18,2	14,2	17,1	19,9	14,3	16,3	20	12,6	11,8	15,2	8,4
JUNY	22,2	25	19,4	20,2	22,1	18,3	20,6	23,3	17,9	20,6	24,4	16,8	15,5	18,6	11,6
JULIOL	24,9	27,7	22,1	23,1	25,2	21	23,3	26,1	20,5	23,5	27,4	19,6	17,8	21,5	14,1
AGOST	25,1	27,9	22,3	22,9	24,9	20,9	22,7	25,4	20	23	26,7	19,3	17,7	21,4	14
SETEMBRE	22,6	25,3	20	20,8	22,9	18,7	20,1	22,6	17,6	20,2	23,7	16,7	15,5	18,7	11,5
OCTUBRE	17,8	20,4	15,2	17	19,1	14,9	15,7	18,1	13,3	14,6	17,9	11,3	11,1	14,4	7,8
NOVEMBRE	13,3	15,7	10,9	12,7	14,8	10,6	11,1	13,6	8,6	8,3	11	5,6	6	8,7	3,3
DESEMBRE	9,9	12	7,8	10,9	13	8,8	8,1	1,6	5,6	4,6	7,22	2	3,1	5,4	0,8

T = Temperatura mitjana diària Td = Temperatura mitjana diürna Tn = Temperatura mitjana nocturna

$Td = T + 0,27(T_{\text{màx.}} - T_{\text{mín.}})$ $Tn = T - 0,27(T_{\text{màx.}} - T_{\text{mín.}})$

on

Tmàx. = Temperatura mitjana de les màximes Tmín. = Temperatura mitjana de les mínimes

L'activitat productiva concretada en el binomi material vegetal-intensitat de cultiu defineix la modalitat de cultiu.

La modalitat de cultiu vindrà, doncs, determinada per uns aspectes que fan referència al tipus de cultiu escollit, caracteritzat per un material vegetal, unes tècniques de cultiu i unes exigències climàtiques determinades i per altres aspectes que es refereixen a les característiques de l'hivernacle i als equipaments necessaris per assolir dites exigències climàtiques.

La inversió inicial vindrà donada pel cost de l'hivernacle i dels equipaments instal·lats. El cost de desenvolupament o de manteniment del cultiu s'avaluarà a partir del cost del material de base del cultiu i de les despeses d'explotació existents. Per determinar a priori aquests costos d'explotació per any i per metre quadrat de superfície d'hivernacle serà important definir les tècniques de cultiu implicades en cada orientació productiva

que es vulgui analitzar per tal d'establir l'estratègia de cultiu considerada més adient.

2.3.2. Les tècniques de cultiu

Les tècniques de cultiu consideren els diferents aspectes no energètics implicats en l'explotació de les plantes. Aquests aspectes són:

- la duració i el cicle de cultiu
- les etapes de cultiu
- la densitat de cultiu
- les tasques bàsiques de manteniment del cultiu

Els tres primers caracteritzen els requeriments d'espai i temps del cultiu.

La duració del cultiu és el temps transcorregut des de l'inici del creixement de la planta o flor fins al moment en què està preparada per a la venda.

S'ha de diferenciar clarament la duració d'un cultiu del cicle de cultiu. Així com la duració d'un cultiu és un temps fix en dies, el cicle de cultiu es refereix a l'època en què s'ha d'iniciar un cultiu.

L'inici d'un cicle de cultiu, no està tan sols sotmès a condicionants climàtics sinó també als condicionants del mercat. Aquest és poc uniforme, i hi ha èpoques o fins i tot dies en què el preu o la demanda d'un fruit, flor o planta ornamental, és més gran. Aquest és el cas dels cultius d'horta ben pagats fora de temporada, la qual cosa rendibilitza el seu cultiu en hivernacle o com a millor exemple, el cas de la típica "**poinsettia**" amb gran demanda per Nadal, mentre que la resta de l'any es manté a nivells més baixos.

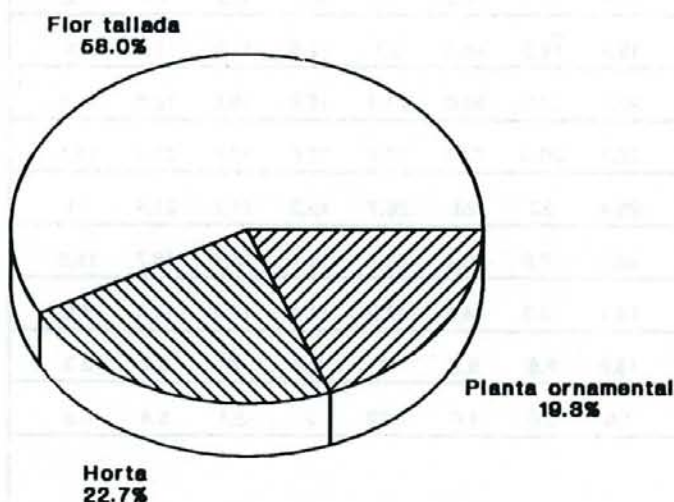


Fig. 2.3. Percentatge de superfície coberta al Maresme segons les diferents orientacions productives (ref. 1).

El mercat és, doncs, un determinant de l'època en què s'ha de començar el cicle de cultiu, tenint en compte la seva durada.

Les etapes del cultiu fan referència a les diferents fases per les què passa un cicle de cultiu.

Generalment hi ha tres formes bàsiques d'iniciar un cultiu:

- a partir de llavors

- a partir d'un esqueix. Aquest esqueix s'adquireix a l'exterior o es produeix en el mateix hivernacle a partir de les plantes "mares"

- l'altre via utilitzada és la compra de la planta o flor un cop iniciat el seu desenvolupament

L'elecció d'una o altra modalitat depèn dels objectius proposats i de les disponibilitats existents.

La densitat de cultiu es defineix com el nombre de plantes o flors per metre quadrat de superfície d'hivernacle. Aquest paràmetre sol variar durant el cicle de cultiu i minva a mesura que creixen i es desenvolupen els vegetals.

Pot considerar-se que existeixen solament dues densitats:

- la densitat mitjana de la primera fase de creixement

- la densitat final, més petita que l'anterior

Aquest factor resulta important per determinar la producció total d'un hivernacle.

Les tècniques de cultiu també consideren tot el conjunt de tasques implicades en el manteniment del cultiu com són la irrigació, els tractaments químics o biològics, el repicat, la poda, etc. i, en definitiva, totes les tasques que impliquen algun tipus de manipula-

ció per part del personal encarregat de l'explo-tació de l'hivernacle.

2.3.3. Paràmetres econòmics del cultiu

Els paràmetres econòmics són bàsics per poder realitzar una anàlisi prèvia sobre la rendibilitat d'un cultiu en hivernacle. D'aquests paràmetres econòmics, n'hi ha que fan referència al cost de la inversió inicial de l'hivernacle i dels equipaments a instal·lar; altres vénen donats per les tècniques de cultiu implicades i finalment n'hi ha que estan condicionats per les exigències climàtiques del cultiu. La suma d'aquests paràmetres referits al metre quadrat d'hivernacle donarà el cost total del cultiu. Independentment, coneixent el preu de venda del material vegetal, es podrà establir la rendibilitat del cultiu o els beneficis econòmics a obtenir anyalment.

El conjunt dels paràmetres econòmics que es poden considerar més importants són:

- cost d'amortització de l'hivernacle i equipaments

- cost del material vegetal

- cost de la terra i testos

- cost de l'adob i materials fitosanitaris

- cost del reg

- cost de la mà d'obra

- cost de la calefacció

- preu de venda de les plantes

El cost de la inversió inicial de l'hivernacle i equipaments s'acostuma a repartir al llarg del seu temps de vida per tal d'obtenir el seu cost d'amortització. Aquest cost juntament amb el de la calefacció, que depèn de les exigències climàtiques del cultiu, està lli-

gat als aspectes energètics implicats en l'exploració, que són els que mereixen un tractament específic subsegüent.

2.4. Factors climàtics interiors

2.4.1. Introducció

La microclimatologia d'un hivernacle afecta les funcions vitals (nutrició, fotosíntesi, etc) que permeten desenvolupar les plantes.

La temperatura ambient influeix sobre la respiració, la fotosíntesi, la circulació de la saba, la transpiració i la multiplicació cel·lular.

La temperatura del subsòl afecta l'absorció reticular, la respiració i el creixement dels òrgans soterranis.

La llum influeix sobre la respiració, la fotosíntesi, la transpiració i la multiplicació cel·lular.

La humitat intervé sobre la intensitat de la fotosíntesi i de la transpiració.

2.4.2. Exigències microclimàtiques d'un cultiu

Les exigències microclimàtiques d'un cultiu es caracteritzen per diversos valors: letals, mínims, màxims i òptims. Aquests valors es tenen en compte quan s'estableixen les consignes per regular el clima interior de l'hivernacle. Les consignes poden diferir lleugerament dels valors òptims que caracteritzen les necessitats de les plantes i són les que defineixen l'estratègia de cultiu.

Els valors letals són aquells valors extrems alts o baixos més enllà dels quals la planta

sofreix danys irreparables fins a la seva mort.

El mínim biològic és aquell valor per sota del qual la planta interromp el seu creixement. En el cas de la temperatura també s'anomena zero vegetatiu.

El màxim biològic és aquell valor per sobre del qual el cultiu manifesta desequilibris fisiològics i la producció empitjora.

L'òptim biològic és un valor intermedi entre el mínim i el màxim, en el qual la planta presenta les millors condicions de creixement i desenvolupament.

Els valors de consigna mínims acostumen a ser superiors al mínim fisiològic. Aquesta consigna posa en marxa equipaments com la calefacció, pantalles, etc.

La consigna màxima és inferior al màxim fisiològic i determina actuacions com la ventilació i l'ombrejament, etc.

Els valors de consigna òptims són un conjunt de valors, moltes vegades considerats els uns respecte dels altres, per tal d'obtenir les millors condicions de creixement i desenvolupament dels cultius.

Les necessitats fisiològiques de les plantes varien segons les espècies i dins de cada espècie segons les varietats. Hi ha espècies o varietats amb exigències de temperatura baixes que permeten limitar la potència i el consum de calefacció. D'altres, poc exigents en llum, suporten les densitats elevades millorant l'índex d'ocupació de l'hivernacle; les resistents a la calor també milloren l'ocupació a l'estiu en la regió mediterrània. A les taules 2.3. i 2.4., s'hi mostren els nivells de temperatura, humitat, CO₂ i llum de diverses espècies de cultiu.

Taula 2.3. Nivells tèrmics (mínims, òptims i màxims) de diferents tipus de cultiu.

Espècie	Temper. mínima letal	Temper. mínima biològica	Temperatura òptima		Temper. màxima biològica	Temperatura de germinació	
			nit	día		Minima	Òptima
HORTALISSES							
Tomàquet	0-2	8-10	13-16	22-26	26-30	9-10	20-30
Cogombre	0-4	10-13	18-20	24-28	28-32	14-16	20-30
Meló	0-2	12-14	18-21	24-30	30-34	14-16	20-30
Carbassa	0-4	10-12	15-18	24-30	30-34	14-16	20-30
Mongeta	0-2	10-14	16-18	21-28	28-35	12-14	20-30
Pebrot	0-4	10-12	16-18	22-28	28-32	12-15	20-30
Albergínia	0-2	9-10	15-18	22-26	30-32	12-15	20-30
Enciam	(-2)-0	4-6	10-15	15-20	25-30	4-6	20
Maduixa	(-2)-0	6	10-13	18-22	-	-	-
FLORS I PLANTES ORNAMENTALS							
Clavell	(-4)-0	4-6	10-12	18-21	26-32	-	-
Rosa	(-6)-0	8-12	14-16	20-25	30-32	-	-
Crisantem	-6-8	13-16	20-25	25-30	-	-	-
Conillets	0	-	8-12	14-18	-	-	18-20
Lliri	0-2	5	10-12	16-20	-	6-8	-
Tulipa	-	4-6	12-18	22-25	-	-	-
Lliri blau i narcís de muntanya	-	3-5	8-15	15-20	-	-	-
Lilà	-	6-8	10-16	18-24	-	-	-
Ciclamen baleàric	-	2-4	12-18	-	-	15	18-20
Lliri d'aigua	-	-	10-13	20-25	-	-	-
Azalea i neret	-	6-8	12-14	14-20	-	-	-
Begònia	-	-	15-18	18-21	-	-	20-30
Gloxínia	-	-	18-20	20-25	-	-	20-25
Prímula i calceolària	-	-	10-14	15-25	-	-	20-25
Gerani	-	6-10	14-16	20-25	-	-	20-25
Hortènsia	-	-	10-18	20-25	-	-	-
Gardènia	(-8)-0	-	15-17	21-23	-	-	-
Eufòrbia	-	-	16-18	20-25	-	-	-
Orquídies d'hivern:							
- calenta	-	-	16-18	18-21	28-30	-	-
- templada	-	-	13-16	16-18	23-25	-	-
- freda	-	-	10	13-16	18-22	-	-
Cròton, Ficus	-	-	15-20	23-24	35-40	-	-
Philodendron Anturi, Disfenbànquia	-	20-23	25-30	35-40	15	25-30	-
Falguera	-	-	15-18	-	-	-	-

Taula 2.4. Nivells òptims de CO₂, humitat relativa, temperatura del substrat i llum, de diferents tipus de cultiu.

Espècie	Temp.òpt. Substrat	CO ₂ ppm	H.R. %	Intensitat Llum (lux)	Duració
HORTALISSES					
Tomàquet	15-20	1000-2000	55-60	10000-40000	D.L.
Cogombre	10-21	1000-3000	70-90	15000-40000	D.L.
Meló	20-22	-	60-80	-	D.L.
Carbassa	15-20	-	-	-	D.L.
Mongeta	15-20	-	-	-	D.L.
Pebrot	15-20	-	65-70	-	D.L.
Albergínia	15-20	-	65-70	-	D.L.
Enciam	10-12	1000-2000	60-80	12000-30000	D.L.
Maduixa	12-15	-	60-70	-	D.C.
FLORS I PLANTES ORNAMENTALS					
Clavell	15-18	500-1000	70-80	15000-45000	D.L.
Rosa	15-18	1000-2000	75-75	ple sol	D.L.
Crisantern	18	400-1200	60-70	75-95	D.C.
Conillets	-	-	60-70	-	D.L.
Lliri	18-21	-	-	ple sol	D.L.
Tulipa	10-14	-	-	ple sol	D.L.
Lliri blau i narcís de muntanya	-	-	60-70	ple sol	D.L.
Lilà	-	-	60-70	ple sol	D.L.
Ciclamen balearic	-	-	60-70	penombra	D.L.
Lliri d'aigua	15-18	-	60-70	penombra	D.L.
Azalea i neret	15-18	-	80-95	ple sol (hivern) penombra (estiu)	D.L.
Begònia	18-20	-	60-70	penombra	D.L.
Gloxínia	-	-	60-75	20000	D.L.
Prímula i calceolària	-	-	60-75	ple sol	D.L.
Gerani	-	-	60-70	ple sol	D.L.
Hortènsia	18-20	-	70-80	ple sol	D.L.
Gardènia	19-22	-	-	ple sol	D.L.
Eufòrbia	-	-	60-70	ple sol	D.C.
Cymbidium i cipripedi	-	-	80-90	(6000 el 1er 15-18000 el 2on)	D.L.
Cròton y ficus	21-24	-	80-90	ple sol	-
Philodendron Anturi.Disfenbànquia	18-20	890-1200	85-90	ple sol	-
Falguera	-	-	85-95	ombra	-

Els elements climàtics que es poden regular són la temperatura, la humitat, la llum i la concentració de CO₂.

2.4.3. La temperatura

Les temperatures d'un hivernacle es caracteritzen per una consigna mínima i una màxima. La primera determina la potència de la calefacció i com més s'allunya del valor òptim, més s'allarga la durada del cultiu. La segona influeix sobre la qualitat del cultiu. Per una altra banda, s'ha de considerar la temperatura de la part aèria de les plantes i la temperatura del substrat. Aquests valors condicionen l'emplaçament de la distribució de calor que pot ser aèria, en el subsòl o mixte.

Finalment, s'han d'establir unes consignes de dia i de nit. Durant el dia, la temperatura de consigna s'ha d'apropar al valor òptim per tal d'afavorir particularment la fotosíntesi. Durant la nit, la funció bàsica és la respiració, que serà més o menys activa, segons que el període diürn anterior hagi estat més o menys assolit (més o menys activitat fotosintètica). Normalment tot i que la temperatura de consigna de nit és uns 2 a 5 °C inferior a la de dia, el consum de calefacció nocturna pot representar més del 70% del consum total.

Les temperatures de consigna màxima, actuen sobre les funcions encarregades de limitar l'elevació de la temperatura interior de l'hivernacle. Aquestes funcions són: la ventilació, l'ombrejament i les tècniques de refredament per evaporació.

2.4.4. La humitat ambient

La humitat de l'aire pot ser avaluada de dues maneres:

- *La humitat absoluta és la quantitat de vapor d'aigua present en l'aire, expressada en grams d'aigua per metre cúbic d'aire.*

- *La humitat relativa és la relació entre la quantitat de vapor d'aigua present i la que com a màxim podria estar continguda en aquest aire a la mateixa temperatura. Aquesta taxa d'humitat s'expressa en tant per cent i varia amb la temperatura de forma que quan més calent és l'aire més vapor d'aigua pot contenir. Així, quan es refreda l'aire (normalment a la nit), la seva humitat relativa augmenta i quan s'arriba al 100% el vapor d'aigua es condensa sobre les superfícies més fredes que l'aire com ara la coberta, l'estructura i, de vegades, les plantes. Una humitat relativa alta pot reduir la transpiració, la circulació de la saba i el creixement de les plantes. També afavoreix, com s'ha dit, la condensació sobre la coberta, responsable del degoteig sobre les plantes, i l'origen de certes malalties.*

A la taula 2.4. s'hi mostren els valors d'humitat relativa d'una sèrie d'espècies de cultiu. Aquests valors es refereixen al procés normal de fotosíntesi durant el període de creixement. Durant la florescència els valors òptims són inferiors als tabulats en un 10-20%.

L'excés d'humitat es pot evitar facilitant la circulació de l'aire entre les plantes, escalant de forma localitzada, ventilant i regant també de forma localitzada unes hores abans de la posta del Sol, preferentment amb gota a gota i cobrint el terra amb un plàstic per evitar la difusió del vapor d'aigua. Per evitar el degoteig del vapor d'aigua condensat es poden utilitzar plàstics antigoteig o disposar d'uns canalons interiors per evacuar l'aigua de condensació.

Una humitat relativa baixa frena l'activitat fotosintètica així com la circulació de la saba.

Aquest fenomen acostuma a produir-se durant el període diürn quan la temperatura arriba als seus valors màxims.

El defecte d'humitat es pot evitar vetllant perquè la temperatura no augmenti massa durant el dia (ombrejament) i regant suficientment. Un sistema molt eficient és la nebulització que en projectar microgotes d'aigua afavoreix una ràpida vaporització sense mullar els cultius.

2.4.5. La llum

La llum solar té una importància fonamental sobre la fotosíntesi i la fotoperiodicitat de les plantes. Aquesta llum no varia la seva composició sinó que redueix la seva intensitat quan penetra dins de l'hivernacle. És, doncs, important afavorir aquesta penetració. Malgrat això, la llum pot ser un factor limitatiu, particularment a l'hivern i la il·luminació artificial segons el tipus de cultiu, és un recurs (encara que car) que permet arribar a un nivell suficient d'intensitat lumínica. La intensitat lumínica s'expressa en lux. Un dia de ple sol pot tenir de 40.000 a 90.000 lux; en condicions de cel parcialment ennuvolat de 10.000 a 30.000 lux i amb cel cobert, de 500 a 5.000 lux.

Per una altra banda, les plantes tenen diferents sensibilitats al fotoperíode, o sigui, a la duració en hores de la llum solar. Així, hi ha plantes que requereixen més de 12 hores de fosc per poder diferenciar la flor i el fruit (DC). D'altres exigeixen dies llargs per poder florir (DL) o una alternància de dies llargs i curts o a l'inrevés. Finalment, hi ha plantes que són indiferents al fotoperíode (DI). A la taula 2.4 s'hi mostren els nivells d'intensitat i de duració de llum de diversos tipus de cultiu. Per als cultius de dia llarg, es

pot perllongar artificialment la durada del dia. El nivell de llum requerit és unes 10 vegades més petit que per a la fotosíntesi.

Per als cultius de dia curt, l'ocultació es pot realitzar mitjançant pantalles opaques. El nivell d'intensitat lluminosa i la temperatura estan molt relacionats atès que la radiació solar aporta llum i calor dins de l'hivernacle. Per a certs tipus de cultiu o durant certs períodes de l'any, s'han d'utilitzar pantalles d'ombrejament que redueixin la intensitat de llum o la temperatura.

2.4.6. El CO₂

La temperatura, la humitat relativa i la llum solar són els tres factors bàsics a controlar en el cultiu intensiu en hivernacle. Un altre factor a controlar és el CO₂ que intensifica més el cultiu, permetent valoritzar millor l'hivernacle i els seus equipaments com també totes les despeses d'explotació implicades i entre elles les energètiques.

El CO₂ és absorbit durant el dia en el procés fotosintètic. Però n'hi ha una part que es produeix en respirar tant de dia com de nit. El balanç de CO₂ és negatiu i s'ha de reposar sia de l'atmosfera sia mitjançant la seva injecció artificial.

La taxa de CO₂ atmosfèric és de l'ordre de les 340 ppm i el valor òptim per a molts cultius està comprès entre 600 i 800 ppm. Així, doncs, la fotosíntesi en condicions atmosfèriques no arriba al seu nivell màxim. La injecció de CO₂ permet mantenir el nivell de CO₂ de l'hivernacle en el seu valor òptim. Aquesta injecció es pot realitzar injectant CO₂ líquid, o utilitzant uns cremadors de gas que alliberin CO₂ i vapor d'aigua.

2.4.7. Conclusions

En general, a l'hora de plantejar l'estratègia d'un possible cultiu a realitzar de forma intensiva en un hivernacle és indispensable:

- *Escollir el material vegetal: espècies, varietats, en funció dels factors socio-econòmics implicats.*

- *Conèixer en profunditat les necessitats dels cultius escollits.*

- *Determinar els valors de les consignes en funció dels objectius: producció fora de temporada, producció en dates concretes, producció semiprecoç.*

- *Recordar que és poc interessant millorar un factor si els altres són insuficients (llei del factor limitant).*

CAPÍTOL 3. TIPUS D'HIVERNACLES

3. TIPUS D'HIVERNACLES

3.1. Introducció

El cultiu protegit és una activitat de l'agricultura que permet, mitjançant la utilització de l'hivernacle o d'una protecció senzilla, la modificació del clima natural de la zona. A grans trets, aquestes estructures productives poden ser de tres tipus: umbracles, proteccions i hivernacles, totes elles caracteritzades pels paràmetres coberta, estructura i forma, encara que les seves finalitats són diferents. Així, mentre els umbracles estan coberts amb un material capaç de fer disminuir la intensitat de la llum, les proteccions i els hivernacles modifiquen el clima mitjançant l'efecte hivernacle i el resguard dels vents exteriors.

Les proteccions són estructures productives desproveïdes de sistema de ventilació i, per tant, no tenen possibilitat de ser climatitzades. A la comarca del Maresme representen el 37,3 % de les estructures productives existents. (vegeu taula 3.1.)

Els hivernacles, en canvi, estan dotats de sistema de ventilació (manual o automàtic) i poden ser climatitzats. En funció del règim tèrmic poden ser classificats en hivernacles freds i calents. Els primers, segons la taula 3.1, representen el 46,3 % de la superfície coberta i només posseeixen sistemes de ventilació i, en alguns casos, sistemes antigela-des (5,2 % de la superfície coberta). Els hivernacles calents representen el 10,2 % de la superfície coberta i són les úniques estructures productives que controlen la temperatura i altres factors climàtics durant les diferents fases del cultiu.

El nivell d'inversió tecnològica d'un hivernacle depèn, entre d'altres factors, del clima de la zona i de l'espècie de cultiu. Ambdós factors condicionen el grau de regulació bioclimàtica, o sigui d'harmonització de les variables climàtiques (temperatura, humitat relativa, CO₂ i llum), segons les diferents fases del cicle vital de la planta.

La diversitat d'estructures productives pel que fa a proteccions i hivernacles és molt gran, sobretot a partir de la seva introducció en països en vies de desenvolupament. En aquest sentit, la introducció en el mercat dels films plàstics ha jugat un paper molt important en l'expansió dels cultius protegits.

Les finalitats bàsiques del cultiu protegit són:

- *Proporcionar protecció de les baixes temperatures (per sota del mínim o òptim biològic).*
- *Protegir dels vents forts.*
- *Disminuir el consum d'aigua.*
- *Millorar l'ambient protegint la planta de plagues i malalties.*

Taula 3.1. Distribució de la superfície protegida segons les estructures i orientacions productives (ref. 1).

ESTRUCTURES PRODUCTIVES	ORIENTACIONS PRODUCTIVES			TOTAL (ha)
	Flor tallada (ha)	Horta (ha)	Planta ornamental (ha)	
Hivernacles freds	52,8	52,8	15,9	121,5
Proteccions	86,2	6,1	5,7	98,0
Hivernacles calents	9,2	0,5	17,3	27,0
Umbracles	4,4	-	11,8	16,2
TOTAL	152,6	59,4	50,7	262,7

Prenent-les en consideració, doncs, es poden classificar els hivernacles, des del tipus més senzill fins al més sofisticat, de la manera següent:

*** Encoixinat plàstic ("mulching"):**

És l'hivernacle més primitiu i s'utilitza amb diferents finalitats:

- a) Escalfar el terra, la qual cosa permet avançar la germinació d'alguns cultius.
- b) Evitar el creixement d'altres llavors, quan s'utilitza plàstic negre.
- c) Reduir el consum d'aigua.

Atès que tots els encoixinats plàstics augmenten la temperatura del terra (especialment l'encoixinat transparent), es poden considerar com la forma d'hivernacle més senzilla. Els films utilitzats són de 0,03 a 0,1 mm de gruix.

*** Túnels petits:**

Aquests senzills hivernacles de 0,3 a 0,8 m de radi són utilitzats, fonamentalment, per a cultius que requereixen protecció estacional. Quan la temperatura ambient augmenta, es tallen petits forats o es retira la coberta durant el dia i s'hi col·loca a la tarda.

*** Túnels grans:**

Aquests hivernacles no disposen de fonaments i utilitzen uns suports en forma d'arc des d'una amplada de 4 m i una alçada de 1,5 - 2 m fins a túnels de 9 m d'ample i 3 - 3,6 m d'alt. Els més sofisticats estaran equipats amb obertures de ventilació als extrems (s'utilitzen llargades de fins a 30 m), a la part alta o als dos costats. La proporció d'obertures respecte a la superfície de terra és del 15 al 25 %.

*** Hivernacles permanents:**

Un pas més enllà cap a la sofisticació dels hivernacles és la utilització de construccions permanents normalment amb fonaments de ciment. Són tan diverses les formes que es poden donar i els materials que s'hi utilitzen, tant pel que fa a l'estructura com al material de coberta, que seran exposats en els apartats següents.

3.2. Tipologia constructiva

La tipologia constructiva d'un hivernacle es caracteritza per la forma, els materials de l'estructura i la coberta.

Pel que fa a la seva forma, els hivernacles es poden classificar bàsicament de la manera següent:

- Hivernacles a dues vessants o capella.
- Hivernacle circular.
- Hivernacle pla o "parral".

Els hivernacles capella amb dues vessants són els més utilitzats, representant a la comarca del Maresme el 73 % del total construït. L'amplada de cada capella oscil·la normalment entre els 6,4 i els 13 m d'amplada, encara que hi ha empreses que ofereixen amplades de fins a 21 m. L'hivernacle circular representa un 21,6% del total d'hivernacles existents en dita comarca, amb amplades que oscil·len entre els 6,4 i els 12 m com a màxim. A la figura 3.2. s'hi mostren

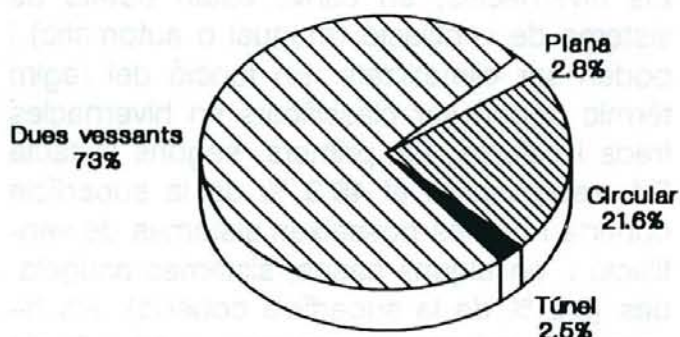


Fig. 3.1. Distribució percentual de la superfície protegida segons la forma dels hivernacles i proteccions (ref. 1)

les dimensions característiques d'un exemple d'hivernacle capella i un altre de túnel.

L'hivernacle amb coberta plana, també anomenat "**parral**", és molt característic d'Almeria, on aproximadament n'hi ha 13.500 Ha (ref. 4). A la comarca del Maresme, aquest tipus només representa el 2,8 % del total.

Altres tipus de forma, com el túnel, corresponen tant a proteccions que no disposen d'equips de climatització com a hivernacles més o menys equipats.

Finalment, cal esmentar alguns dissenys realitzats amb estructures especials en forma de capella, però asimètrica -o sigui amb les dues vessants de dimensions i inclinacions diferents-, com també els hiverna-

cles inflables, que utilitzen la pressió de l'aire com a medi resistent de suport.

La forma d'un hivernacle influeix sobre la quantitat d'energia lluminosa que hi penetra. A la figura 3.3. s'hi pot observar com la diferència en la quantitat d'energia lluminosa entre dues formes diferents pot arribar a ser del 20 %. Els hivernacles baixos, de menor volum en disposar de menys inèrcia tèrmica, són més fàcils d'escalfar; però són més sensibles a les variacions climàtiques exteriors. Els hivernacles alts no es mostren tan afectats per les variacions de la temperatura i la humitat. Els equipaments, com les pantalles tèrmiques o d'ombrejament, són més fàcils de col·locar encara que el seu preu és més elevat.



Foto 3: Interior d'un hivernacle multicapella.

L'estructura d'un hivernacle pot ser de materials tan diversos com fusta, acer, formigó, alumini o mixta. A la comarca del Maresme, una gran majoria dels hivernacles estan construïts amb estructura de fusta (63,4 %). L'avantatge d'aquest material és, principalment, de tipus econòmic, encara que addi-

cionalment, des d'un punt de vista energètic, la fusta té determinades propietats aïllants que redueixen els ponts tèrmics que es poden originar. El desavantatge més important, a part del manteniment que requereix, és el volum que ocupa, el qual redueix la quantitat d'energia lluminosa que penetra

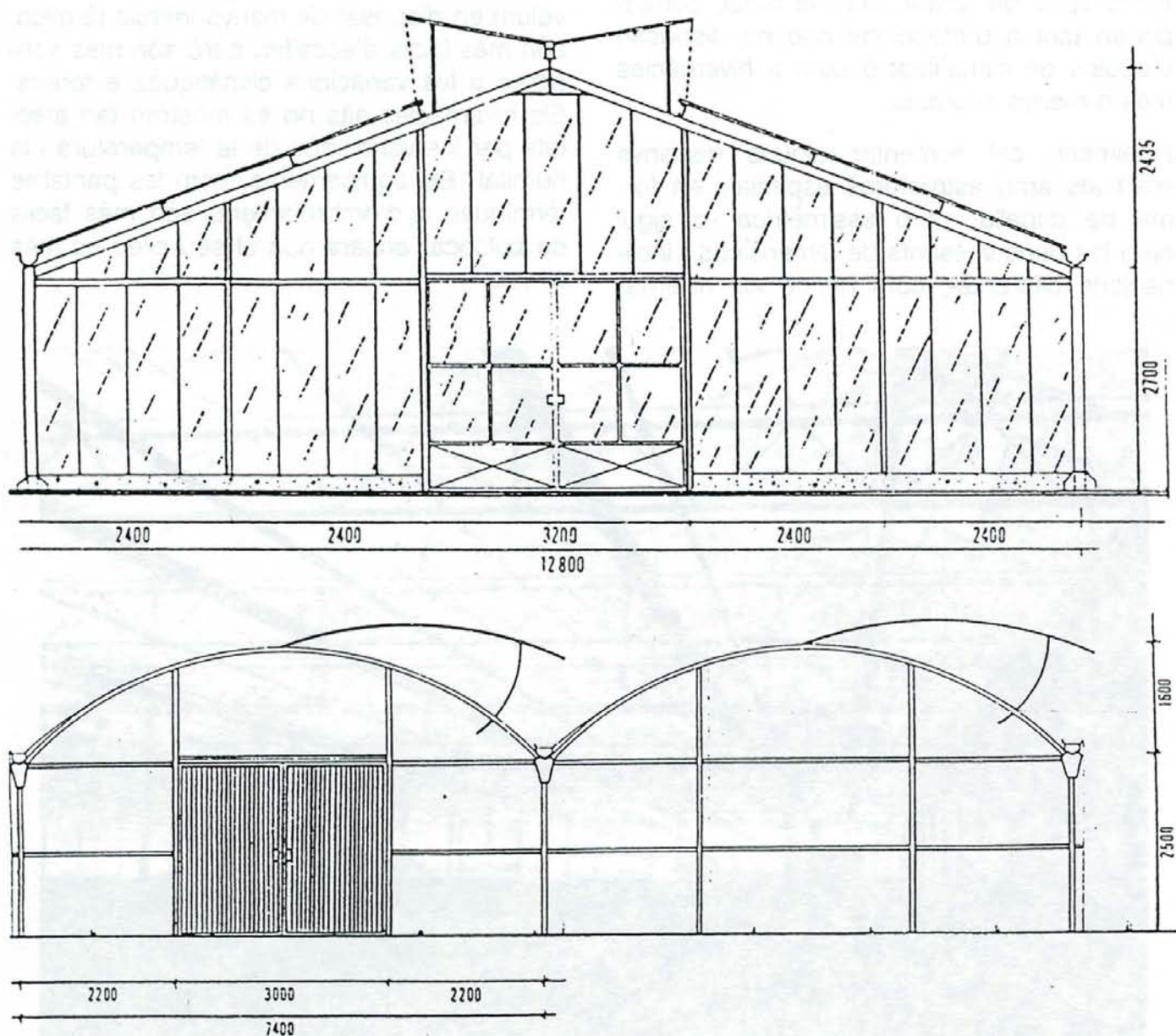


Fig. 3.2. Dimensions característiques d'un hivernacle a dos vessants i d'un hivernacle circular.

dins de l'hivernacle. A grans trets, l'àrea ocupada pels bastiments d'un hivernacle d'acer és de l'ordre del 12 %, mentre que en un hivernacle de fusta o formigó se sobrepassa el 20 %.

Per una altra banda, les estructures metàl·liques permeten disposar d'elements de ventilació més ajustables i fàcils de maniobrar. Altres tipus de materials, com l'alumini i el formigó, són poc utilitzats. L'alumini és car i només s'utilitza en els hivernacles adossats a habitatges (verandes) com a jardí d'hivern. El formigó representa tan sols el 0,8 % dels hivernacles construïts al Maresme.

En general, des d'un punt de vista energètic, per tal d'augmentar la quantitat d'energia lluminosa, s'ha de reduir al màxim la superfície dels elements estructurals i d'altres elements accessoris com els canals de recollida d'aigua, etc. També s'han d'evitar els ponts tèrmics, responsables de pèrdues de calor per conducció, mitjançant l'aïllament exterior dels perfils estructurals amb neoprè.

L'estructura resistent d'un hivernacle pot ser longitudinal i transversal. La primera és paral·lela a l'eix longitudinal i s'utilitza amb materials econòmics com la fusta. La segona, és perpendicular a l'eix longitudinal i presen-

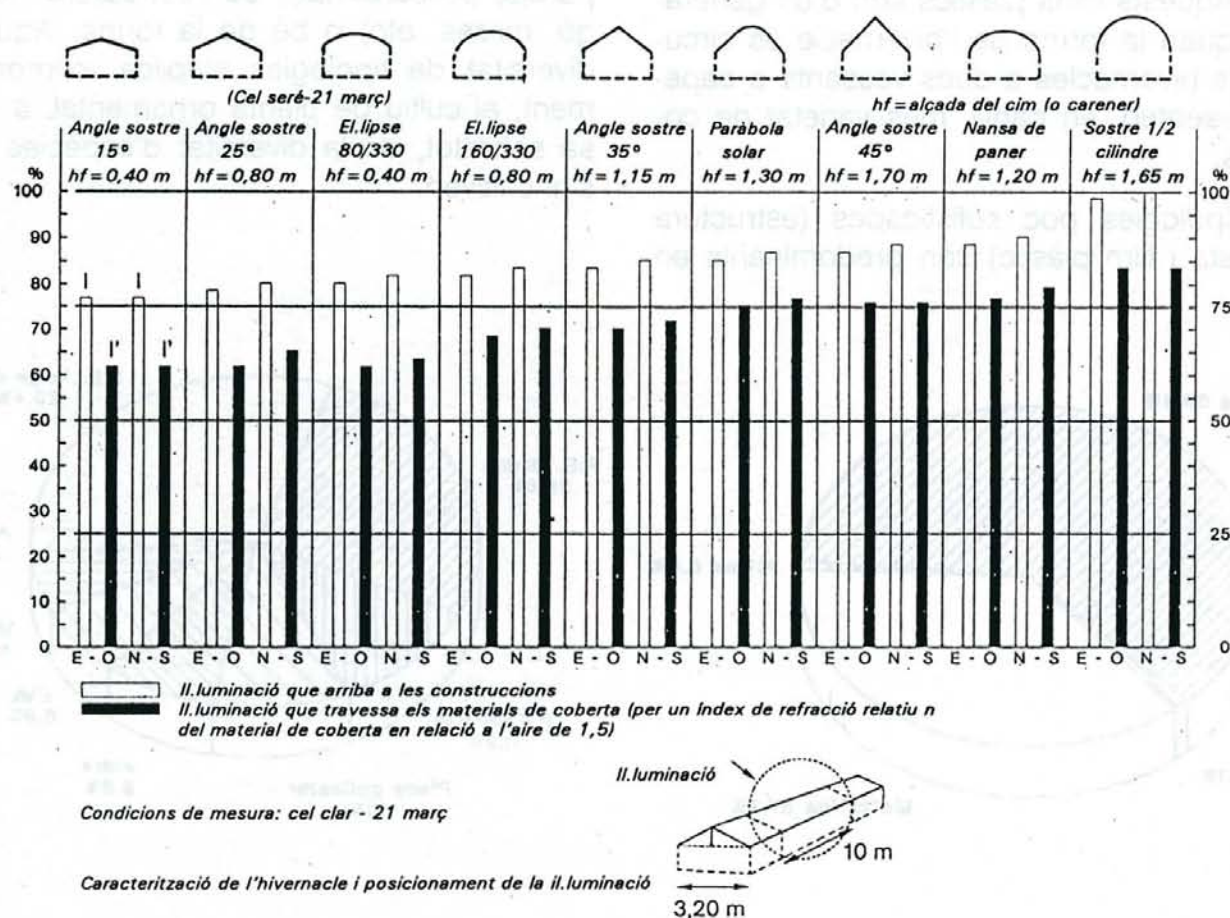


Fig. 3.3. Energia lluminosa per diverses formes d'hivernacle. (Nisen-Bèlgica) (ref. 6).

ta respecte a la primera una major resistència al vent i una superfície de cultiu més gran pel fet d'estar lliure de pilars.

Els materials de coberta existents al mercat són molt nombrosos i es dona una gran diversitat d'ús pel que fa als hivernacles enquestats a la comarca del Maresme.

En general, es poden agrupar en tres grans grups: el vidre, els plàstics en forma de film i els plàstics rígids.

Els films representen el 73,4 % de la superfície total protegida del Maresme i s'utilitzen, majoritàriament, sobre estructures de fusta; el polietilè de llarga durada és el més emprat. Aquests films plàstics són d'ús generalitzat quan la forma de l'hivernacle és circular. Els hivernacles a dues vessants o capella presenten, en canvi, més varietat de cobertes.

Les tipologies poc sofisticades (estructura de fusta i film plàstic) són predominants en

els cultius d'horta i flor tallada. Per contra, les més sofisticades - que comporten una inversió econòmica elevada, com les d'estructura metàl·lica i coberta de vidre o policarbonat - són minoritàries i s'utilitzen bàsicament en el cultiu de planta ornamental.

D'acord amb l'estudi realitzat a la comarca del Maresme, hi ha un total de 55 models de tipologia constructiva diferents. D'ells, n'hi ha 33 que tan sols cobreixen un 4 % de la superfície protegida. Aquests 33 models de gran diversitat tenen en comú que cap d'ells està representat al Maresme per una superfície superior a una hectàrea, sia a causa de la seva coberta (dobles i triples parets, policarbonat), de l'estructura (formigó, mixtes, etc) o bé de la forma. Aquesta diversitat de tipologies s'aplica, primordialment, al cultiu de planta ornamental, a causa sobretot, de la diversitat d'espècies que s'hi cultiven.

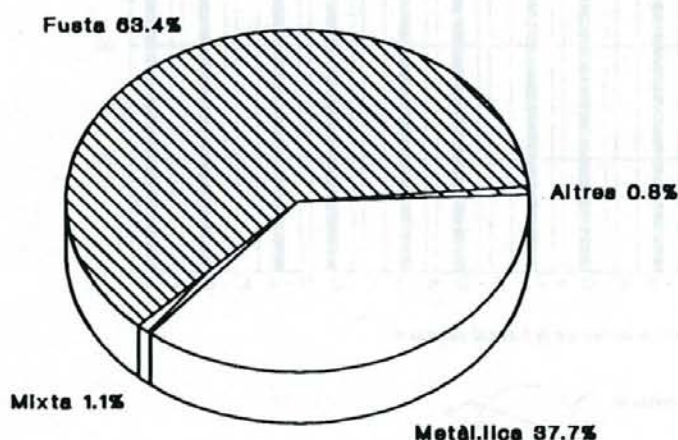


Fig. 3.4. Distribució percentual de la superfície protegida segons el material de l'estructura dels hivernacles i proteccions (ref. 1).

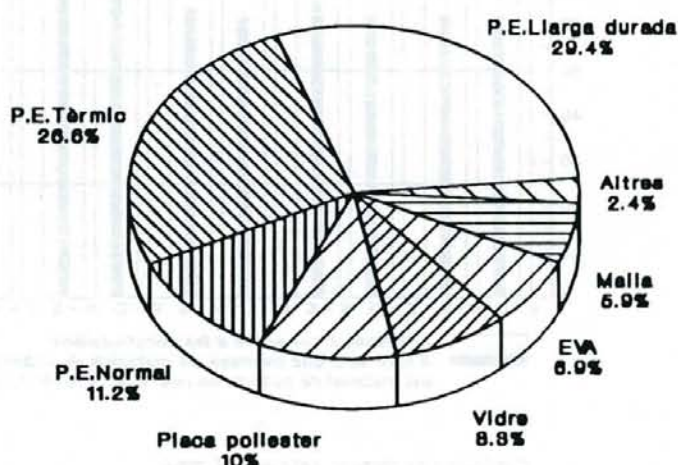


Fig. 3.5. Distribució percentual de la superfície protegida segons el material de la coberta dels hivernacles o proteccions (ref. 1).

3.3 L'efecte hivernacle

Un hivernacle funciona com una màquina de produir calor a partir de l'efecte hivernacle. Aquest efecte és el resultat d'interposar entre l'atmosfera i el sòl un material transparent a la radiació solar, però que limiti les pèrdues de radiació cap a l'exterior. La radiació solar que penetra dins d'un hivernacle escalfa el terra, les plantes i les parets. Aquests cossos emeten radiacions infrarooges de longitud d'ona llarga cap a la coberta. El material de coberta absorbeix, reflecteix i transmet en proporcions desiguals aquesta radiació d'ona llarga de forma similar a com ho fa respecte a la radiació solar incident provinent de l'exterior.

Segons les característiques del material de coberta, varia la proporció de radiació que és remesa cap a l'interior de l'hivernacle. La radiació, en ésser atrapada dins d'aquest espai interior, escalfa l'aire que està en contacte amb el terra, les plantes i les parets

rescalfades i aquest aire calent resta emprisonat per la coberta de l'hivernacle.

3.4 Materials de coberta

3.4.1 Paràmetres característics

Els materials de coberta es caracteritzen per les seves propietats òptiques, tèrmiques i físiques. Poden ser rígids com el vidre i alguns plàstics o flexibles com els films de plàstic.

Les propietats òptiques es defineixen a partir de tres coeficients: transmissió, reflexió i absorció o emissió.

Els valors d'aquests coeficients poden ser determinats per una longitud d'ona donada, com, per exemple, en la zona de radiació activa a la fotosíntesi de 400 a 700 nm (PAR), en la de l'infraroig d'ona curta 700 a 2.500 nm o en la del infraroig tèrmic (3.000 nm). Aquests coeficients també depenen de l'angle d'incidència del raig solar i de la natura de la radiació considerada (directa o difusa).

Les propietats tèrmiques es defineixen a partir del coeficient de transmissió calòrica o d'intercanvi tèrmic K, expressat com la quantitat de calor que passa a través d'un m^2 de gruix determinat en una hora i per una diferència de temperatura d'un grau. Aquest coeficient K varia amb les condicions climàtiques, augmenta amb el vent i disminueix quan el cel està cobert de núvols. S'expressa en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ i com més baix és el seu valor més aïllant és el material.

Les propietats físiques es defineixen a partir del coeficient de dilatació, temps de vida, sobretot pel que fa al manteniment de les

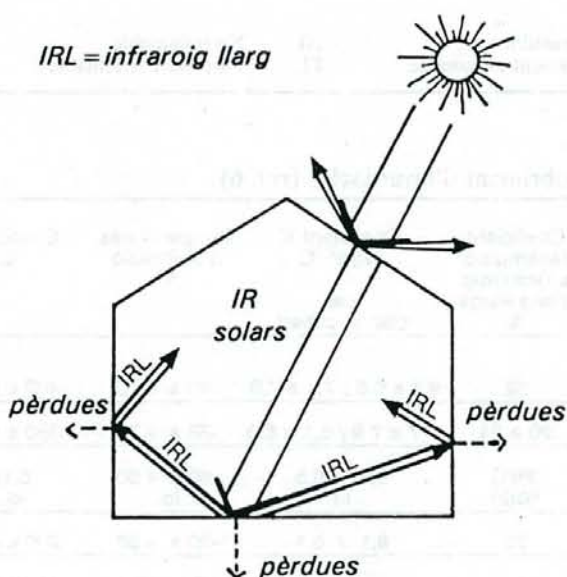


Fig. 3.6. L'efecte hivernacle.

dels materials de coberta rígids i flexibles existents al mercat.

3.4.2 Materials de coberta rígids

3.4.2.1 Vidre

El vidre hortícola, normalment de 4 mm, és el material clàssicament emprat. Presenta l'avantatge de realitzar perfectament l'efecte hivernacle i l'inconvenient de ser pesant i poc resistent als xocs mecànics o tèrmics.

El vidre gravat (catedral) és interessant per les seves propietats difusores de la llum, encara que el seu balanç lluminós global és pitjor que el del vidre normal.

El vidre de baixa emissivitat està recobert en una cara amb una fina capa d'estany o d'òxid de cobalt. El coeficient d'emissivitat és 0,3 en la banda de l'infraroig tèrmic comparat amb el valor 0,9 del vidre normal. Aquesta propietat permet reduir les pèrdues de radiació en un 70 % i aconseguir un estalvi energètic del 25 al 30 %. Presenta l'inconvenient de reduir la transmissió solar en la regió activa fotosintèticament (400 a 700 nm).

El doble vidre amb una cambra aïllant plena d'aire, CO_2 o SO_2 , presenta unes propietats aïllants molt bones, en reduir en un 50 % les pèrdues de calor respecte al vidre normal, però la seva transmissió a la radiació solar es redueix en un 8 %.

També cal esmentar alguns dels materials emprats en els prototipus d'hivernacles solars constituïts per un doble vidre per on circula aigua. La cara interior és òpticament selectiva amb una transmissió elevada en la banda activa a la fotosíntesi i una alta absorbència en la regió de l'infraroig proper (700 a 2.500 nm).

3.4.2.2 Plàstics

Els plàstics rígids són emprats com a substituïts del vidre i àmpliament comercialitzats, encara que el seu ús és encara força restringit.

El polimetacrilat, també conegut per la seva marca de fabricació com plexiglàs, és un plàstic cel·lular amb una doble paret i un gruix de 8 a 16 mm. Malgrat aquest gruix, la seva transmissió és relativament alta (86 % en la banda 400-700 nm per un gruix de 10

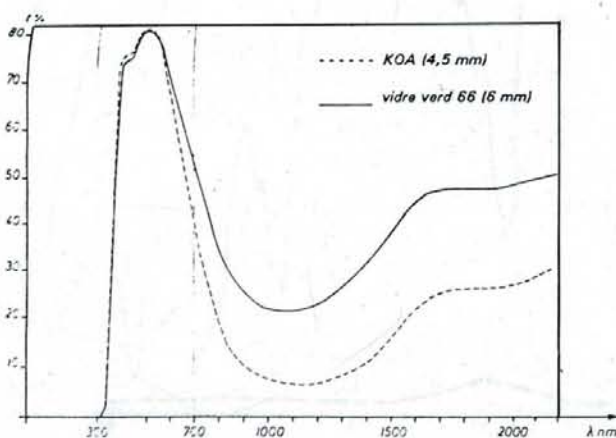


Fig. 3.7. Corbes de transmissió de dos vidres selectius: "KOA" i "vidre verd 66" (ref. 7).

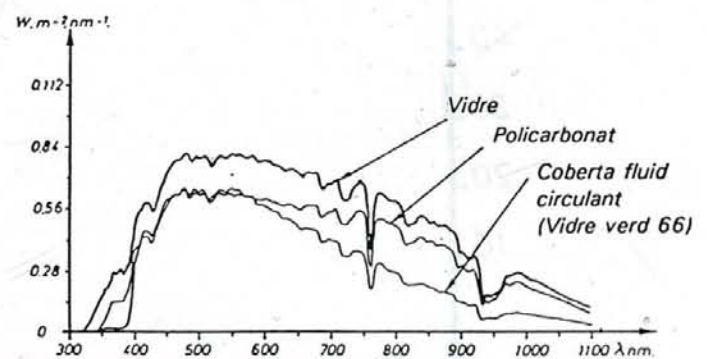


Fig. 3.8. Distribució de radiació en el rang 300-1.100 nm, per a tres hivernacles: vidre, policarbonat i coberta de fluid circulant (amb vidre verd 66) (ref. 7).

mm). Un estalvi d'energia del 50 % i una bona resistència mecànica són els arguments de venda emprats encara que el seu cost elevat és un obstacle per al seu ús.

El policarbonat és menys car que el polimetacrilat, però amb una qualitat inferior pel que fa a la seva transmissió, que és d'un 7 a un 14 % inferior a la del vidre, i al seu temps de vida, ja que perd lentament i contínuament un 1 % de transmissió a l'any. S'han realitzat mesures de policarbonat ple amb aigua, que s'utilitza per a captar l'energia solar incident. Els resultats obtinguts, tal com s'observa a la figura 3.9., mostren que la transmissió augmenta d'un 75 % a un 85% en la banda de 400 a 700 μm quan el policarbonat s'omple d'aigua. Inversament

en la regió de l'infraroig proper (800 a 2.500 μm), la transmissió decreix dràsticament des d'un 87 % a un 30 %. La hidròlisi del policarbonat pot ser un obstacle a la seva utilització com a element per on es faci circular l'aigua.

El PVC biorientat és un material recent fabricat en un procés especial (estiratge de dues làmines de PVC en dues direccions perpendiculars). Aquest material lleuger (1,5 Kg/m²) presenta unes bones propietats òptiques, tant en la banda de la radiació solar com en la de l'infraroig, així com una bona resistència als UV i als agents químics o accions mecàniques, com la calamarsa.

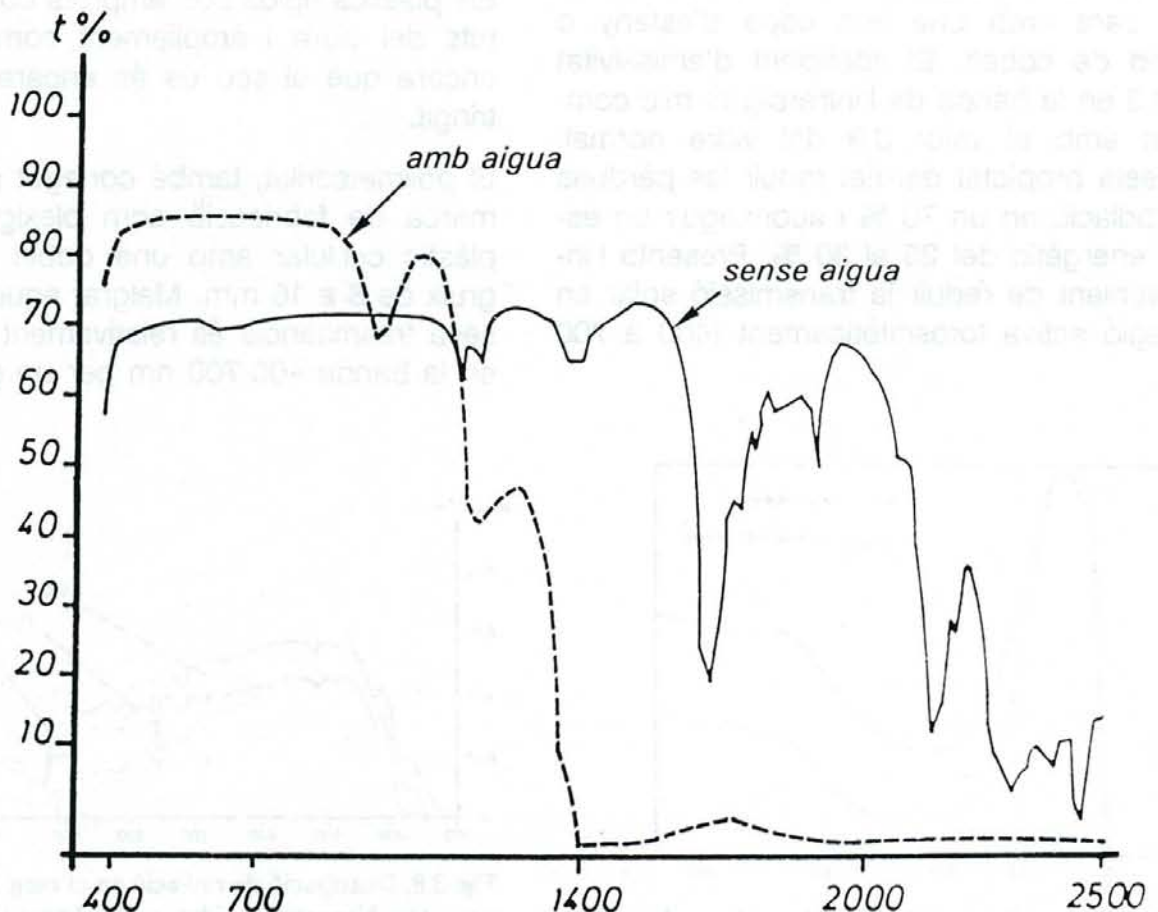


Fig. 3.9. Corba de transmissió d'una planxa de policarbonat plena d'aigua comparada amb una de buida (ref. 7).

El políester armat amb fibra de vidre es presenta en forma de planxes ondulades o nervades, fabricades amb resines de políester armades en un 20 a 30 % amb fibra de vidre. Actualment aquestes plaques van protegides superficialment contra el desfibrament i la degradació als UV. Encara que la seva transmissió lluminosa és inferior en un 2 a 10 % a la del vidre, el seu comportament tèrmic global és millor.

El polipropilè és un material econòmic semblant al policarbonat cel·lular que s'utilitza normalment en la indústria de l'embalatge. La seva transmissió lluminosa és feble (50%) i el seu envelliment és ràpid, per la qual cosa, doncs, no és gaire interessant el seu ús en hivernacles.

3.4.3 Materials de coberta flexibles

Els films de polietilè es presenten de formes molt variades i millorades respecte al polietilè normal de duració molt curta (4 a 6 mesos).

El polietilè de baixa densitat i llarga durada (PEBDLD) presenta una bona transmissió a la llum solar, encara que el seu comportament tèrmic és dolent ja que és transparent en un 65 % a l'infraroig d'ona llarga. Això pot provocar un fenomen d'inversió tèrmica durant nits de cel clar, consistent en què la temperatura a l'interior de l'hivernacle és inferior a la de l'exterior.

El polietilè infraroig (PEIR) millora les característiques tèrmiques respecte al polietilè normal i permet guanyar fins a 5 °C sobre les temperatures exteriors més baixes, encara que el seu balanç lluminós és inferior i la seva durada és una mica més curta.

El polietilè vinil acetat o EVA presenta unes característiques tèrmiques semblants o una mica superiors al polietilè infraroig, però amb un balanç lluminós excel·lent. És un plàstic molt flexible, sobretot quan el contingut d'acetat de vinil és superior al 14 %, i planteja problemes en regions molt ventoses. S'embruta fàcilment a causa de la seva electricitat estàtica, però existeix una qualitat antipols.

El policlorur de vinil (PVC) presenta una excel·lent transmissió lluminosa (al voltant del 91 %) i el seu comportament tèrmic és superior al de l'EVA; és el film que millor realitza l'efecte hivernacle. En contrapartida, envella molt ràpidament i les seves qualitats lluminoses s'alteren ràpidament. Per una altra banda, igual que el film EVA, pel fet de ser molt elàstic, no és aconsellable en zones ventoses i, pel fet de tenir una gran electricitat estàtica, s'empolsa molt fàcilment.

El políester és un film nou, i encara car, que presenta una bona transmissió lluminosa i un comportament tèrmic satisfactori, com també una resistència mecànica i sobretot una resistència als ultravioleta que poden ser considerades excepcionals, ja que el seu temps de vida és de 15 anys.

Alguns dels films plàstics esmentats són els més utilitzats en els cultius protegits del Marisme. Els polietilens de llarga durada (29,4%) i tèrmic (26,6 %) han desplaçat el polietilè normal (11,2 %) pel que fa al seu ús generalitzat. Aquests films presenten unes millores sovint obtingudes en detriment de la seva lluminositat o duració.

El mercat dels films plàstics no s'exhaureix amb aquests materials citats i constantment apareixen o es proposen nous materials. Així, entre els plàstics en fase de proves cal

esmentar l'EBA, a base d'acetat de butil, o els films de dues o tres capes coextrusionats compostos de capes de polietilè i EVA, que permeten d'associar les qualitats tèrmiques de l'EVA amb la menor elasticitat del polietilè. També els fabricants han proposat els films de plàstic "fluorescents" amb la propietat de transferir una part de la radiació blava i verda dins la banda del vermell (560-650 μm).

3.4.4 Transmissió global de l'hivernacle

Sigui quin vulgui el material de coberta emprat, la transmissió global de l'hivernacle no acostuma a ser superior al 70%, a causa d'obstacles com els marcs de l'estructura,

pantalles, conductes de calefacció, pols, etc. Altres factors com l'orientació i la forma també juguen un paper important en la transmissió global, principalment a l'hivern quan l'angle solar és baix. A la figura 3.10. s'hi mostra per a un hivernacle tipus túnel amb dues orientacions diferents (E-O i N-S), la transmissió solar existent en dia ennuvolat i assolellat. Com pot observar-s'hi, les variacions són petites encara que la transmissió és lleugerament superior en dia clar per a un hivernacle orientat EO. Les mesures "in situ" de la transmissió global d'un hivernacle són llargues i tedioses, i és més interessant l'ús de models de simulació sofisticats o simplificats.

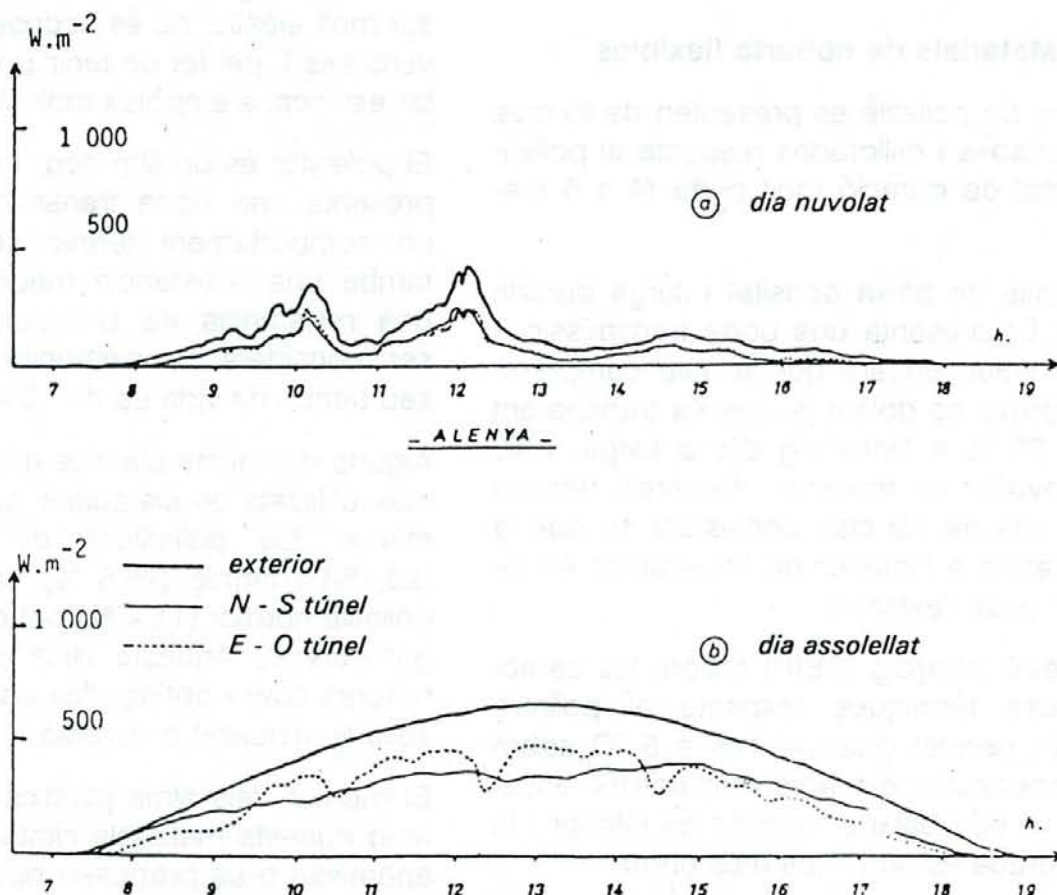


Fig. 3.10. Evolució horària de la radiació solar sota dos túnels orientats N-S i E-O, (ref. 8).

CAPÍTOL 4. COMPORTAMENT TÈRMIC DELS HIVERNACLES

4. COMPORTAMENT TÈRMIC DELS HIVERNACLES

4.1. Introducció

Un hivernacle es presenta com un bescanviador d'energia força complex. El balanç tèrmic té en compte tots els intercanvis existents entre el sòl, el material vegetal, l'ambient i la coberta de l'hivernacle amb el medi exterior. Aquest balanç tèrmic s'expressa mitjançant una equació en la qual s'han d'equilibrar els guanys i les pèrdues de calor.

En absència d'altres aportacions de calor que no siguin la radiació solar, es crea en l'hivernacle un clima espontani caracteritzat per una temperatura diürna molt més alta que a l'exterior i una temperatura nocturna d'un a tres graus per sobre de la temperatura de l'exterior, i fins i tot inferior en el cas de produir-se una inversió tèrmica. Aquest clima espontani es corregeix actuant sobre el balanç tèrmic bé augmentant els guanys bé les pèrdues de calor. Els guanys solars són el resultat de l'efecte hivernacle produït pel material de coberta transparent, tal com ha estat descrit abans. Aquests guanys varien segons el lloc, l'estació de l'any i l'hora del dia, i també segons l'orientació i la inclinació de les parets de l'hivernacle, les característiques òptiques del material de coberta i la importància de l'estructura.

La calor retinguda per l'efecte hivernacle tendeix a escapar-se per radiació, conducció, convecció i per infiltracions o renovacions d'aire, com també per evaporació de l'aigua existent sobre les superfícies de les plantes, el terra o la coberta interior.

Per tal d'identificar les àrees de l'hivernacle on es produeix la major part de pèrdues de calor és útil conèixer alguns dels càlculs emprats en la predicció d'aquestes pèrdues tèrmiques.

En aquest capítol, s'hi exposen primerament els tres fenòmens de transferència de calor existents en un hivernacle amb les equacions que permeten quantificar-los. En segon lloc, a partir de l'equació de balanç s'hi analitzen els focus potencials tant de guanys com de pèrdues de calor i les diferents formes més o menys complexes de resoldre l'equació de balanç i determinar entre altres paràmetres el consum i la potència de la calefacció a instal·lar. Finalment, per a les quatre zones climàtiques establertes a Catalunya s'analitza el comportament tèrmic anual de dues tipologies d'hivernacle i sis tipus de coberta.

4.2. Fenòmens de transferència de calor

4.2.1. Transferència de calor per conducció

La conducció és la transferència de calor que es produeix a través d'una substància o entre objectes físicament en contacte directe com, per exemple, a través del material dels conductes de calefacció o el material de coberta (vidre, plàstic, etc.). La velocitat de transmissió de calor per conducció depèn de l'àrea, secció, diferència de temperatures i propietats físiques de la substància, com ara la seva densitat. Les pèrdues per conducció es redueixen en interposar un element poc conductor en el trajecte de la transferència de calor. Les pèrdues de calor per conducció poden ser calculades amb l'equació següent:

$$Q_{cd} = \lambda / e \cdot A \cdot (T_i - T_e) \quad (\text{Eq. 4.1.})$$

on:

λ és la conductivitat tèrmica del material (w/m/°C)

e és el gruix del material (m)

A és la superfície d'intercanvi (m²)

T_i i T_e són, respectivament, les temperatures interior i exterior

La relació λ/e és el coeficient de transferència de calor d'un material d'un gruix determinat. És també interessant de conèixer la resistència al flux tèrmic (R), que és l'invers d'aquest coeficient. Aquest factor és tabulat moltes vegades per donar el valor d'aïllament d'un material. Així, al valor baix inferior a 0,1 °C.m²/kW de resistència tèrmica (R) dels materials transparents, hi ha el valor alt

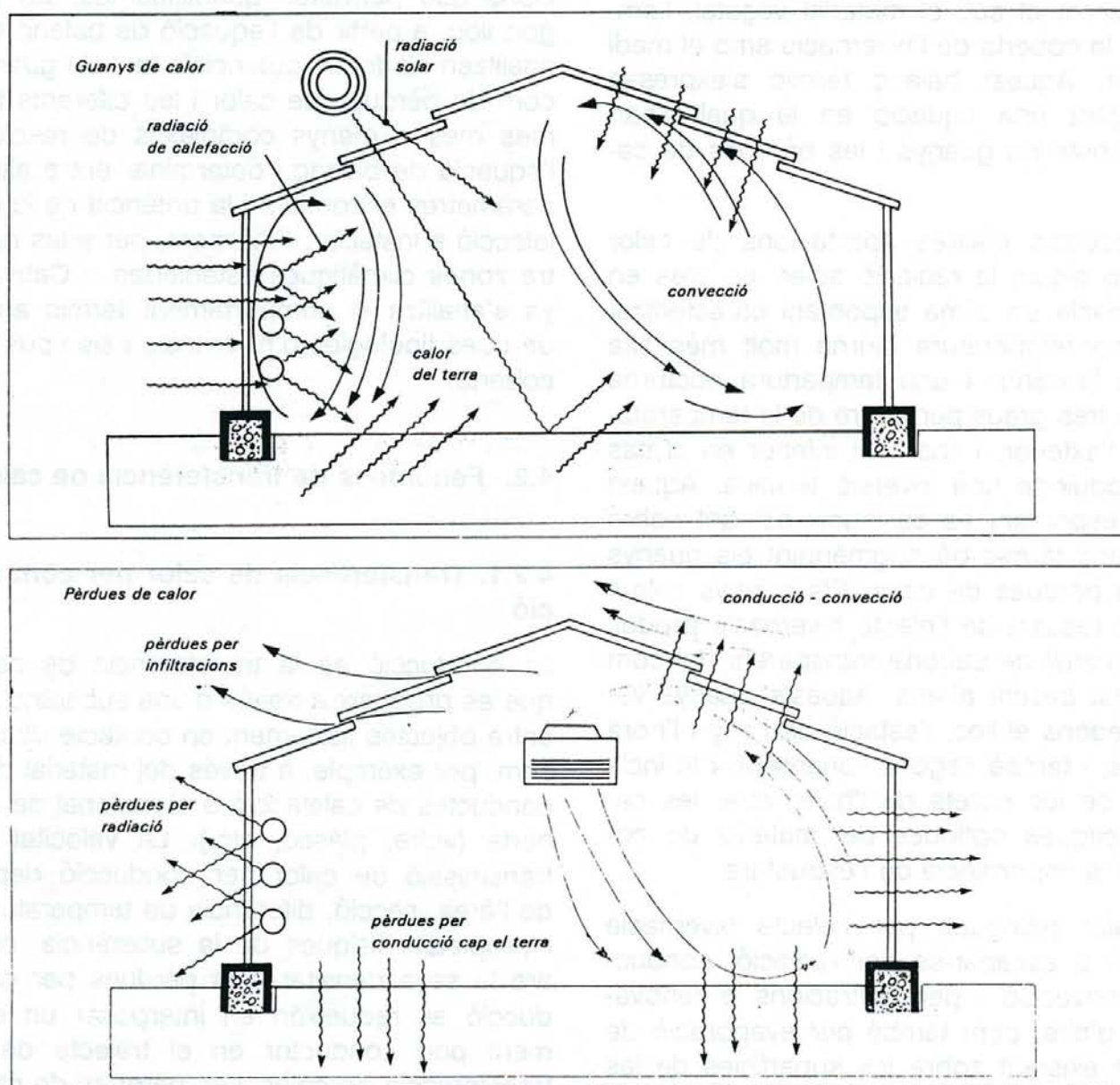


Fig. 4.1. Intercanvis de calor en un hivernacle.

dels materials aïllants que amb mides de gruix estàndards arriben a resistències tèrmiques de $2\text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{kW}$.

4.2.2. Transferència de calor per radiació

La radiació és la transferència de calor existent entre cossos que no estan en contacte, sense necessitar tampoc d'un altre medi de transport de la calor. L'energia emesa depèn de la temperatura i de la natura del cos. De la mateixa manera que la radiació solar, la calor radiant emesa per un cos segueix una línia recta i pot ser reflectida, transmesa o absorbida després d'incidir sobre un altre objecte.

L'energia radiant ha d'ésser absorbida per ser convertida en calor. Així, l'hivernacle rep l'energia radiant del Sol, que es converteix en calor en ser absorbida per la coberta, l'estructura i el seu terra. L'energia que llavors irradia aquestes superfícies i el sistema emissor de la calefacció es perd cap a l'exterior de forma més o menys intensa segons el material de coberta i les condicions atmosfèriques. La velocitat de transferència de calor per radiació depèn de l'àrea, les temperatures i les característiques dels dos objectes implicats. D'acord amb les seves característiques superficials, un cos pot ser

un bon emissor o absorbidor d'energia. En general, els objectes, exceptuant els tractats superficialment de forma selectiva, quan són bons absorbidors de radiació són també bons emissors. Aquest és el cas de les superfícies negres. Altres com els materials reflectants són pobres emissors i absorbidors de la calor. Tenint en compte aquests aspectes, les pèrdues de calor d'un cos per irradiació poden reduir-se envoltant aquest objecte amb una barrera opaca que sigui reflectant, com és el cas de les pantalles tèrmiques aluminitzades que s'utilitzen de nit a l'hivern.

La transferència de calor per radiació es produeix entre el cel i les plantes de l'interior o la coberta de l'hivernacle. Aquesta transferència de calor és funció de la diferència de temperatures expressada de la forma següent:

$$Q_{rd} = \sigma \cdot A \cdot \tau_r (\varepsilon_r T_r^4 - \varepsilon_e T_e^4) \quad (\text{Eq. 4.2.})$$

on:

σ és la constant de Boltzmann igual a $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$

A és l'àrea de la superfície que irradia a l'atmosfera (normalment es considera tota la coberta)

τ_r és la transmissió de la coberta a la radiació tèrmica

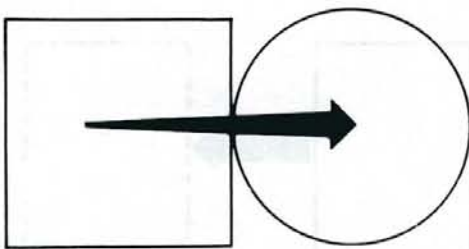


Fig. 4.2. Transferència de calor per conducció. Els objectes estan en contacte.

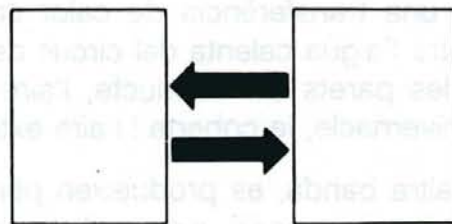


Fig. 4.3. Transferència de calor per radiació. Els objectes estan separats.

ε_r és l'emissivitat de la superfície que irradia a l'atmosfera

ε_a és l'emissivitat aparent de l'atmosfera

Pel que fa a la radiació solar que penetra dins de l'hivernacle cal dir que es determina de la forma següent:

$$Q_{so} = \alpha_s \cdot \tau \cdot A_s \cdot I \quad (\text{Eq. 4.3.})$$

on:

α_s és l'absorbància de les plantes o de la superfície del terra. Segons Geiger (ref. 8), pot presentar un valor compès entre 0,7 i 0,85.

τ és la transmitància de la coberta en %

A_s és la superfície de coberta captadora (m^2) (tan sols es consideren les superfícies orientades a S, E i O)

I és la radiació solar incident en W/m^2

4.2.3. Transferència de calor per convecció

La convecció és la transferència de calor que s'origina pel moviment d'un gas o líquid calent cap a un lloc més fred. Les pèrdues de calor per convecció estan lligades al moviment de l'aire a l'interior i a l'exterior de l'hivernacle. Aquestes pèrdues es produeixen per una banda en refredar-se l'aire que entra en contacte amb superfícies més fredes, com les parets, el terra, les plantes, etc. Així, en un hivernacle calefaccionat es produeix una transferència de calor consecutiva entre l'aigua calenta del circuit de distribució, les parets del conducte, l'aire interior de l'hivernacle, la coberta i l'aire exterior.

Per una altra banda, es produeixen pèrdues de calor per convecció directament (sense intervenir-hi la coberta) a causa de les infiltracions i la ventilació. Les infiltracions són el moviment natural de l'aire que es produeix a través d'esclotxes i obertures existents en la

superfície de l'hivernacle. La ventilació és el moviment de l'aire a través d'obertures controlades tant de forma natural com forçada.

La transferència de calor per convecció inclou no solament el moviment de l'aire d'un lloc a un altre sinó també el moviment del vapor d'aigua. Així, quan dins de l'hivernacle s'evapora l'aigua i es converteix en vapor, es consumeix energia de l'ambient; i quan aquest vapor es condensa altra vegada en aigua, se cedeix calor a l'ambient. El vapor d'aigua és, doncs, un transportador d'energia.

En un hivernacle, pel fet de ser la humitat relativa més alta que a l'exterior, quan es produeix un bescanvi per ventilació o infiltracions i es perd vapor d'aigua, també es perd energia de l'interior. Per una altra banda, l'energia despesa en la condensació que es produeix sobre la coberta de l'hivernacle és conduïda a través seu i perduda a l'exterior.

Els intercanvis tèrmics per conducció solen anar acompanyats d'intercanvis per convecció. Així, a la conducció existent en una coberta, cal afegir-hi la convecció de les corrents d'aire interiors i la provocada pel vent a l'exterior.

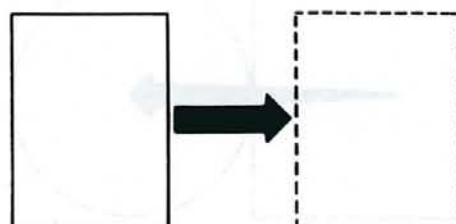


Fig. 4.4. Transferència de calor per convecció. La substància calenta es desplaça cap a un lloc més fred.

Generalment, les pèrdues de calor per conducció, convecció i radiació (lleï Stefan-Boltzman linealitzada) s'expressen amb una única equació.

$$Q_{cc} = K \cdot A \cdot (T_i - T_e) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

on:

K és el coeficient de transmissió de la calor expressat en $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ i calculat a partir de:

$$K = 1 / (1/h_i + e/\lambda + 1/h_e)$$

on:

h_i i h_e són els coeficients superficials de convecció i radiació interior i exterior respectivament.

En els càlculs tèrmics aplicats a habitatges, els coeficients h inclouen els efectes de la convecció i la radiació. Així, segons la norma bàsica NBE-CT79 aplicada a edificis (ref.9) $1/h_i$ oscil·la entre 0,09 i 0,17 $\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ segons la posició del tancament i la direcció del flux d'aire i $1/h_e$ és igual a 0,05 $\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. Aquests valors no són reals quan es tracta d'aplicar-los a hivernacles pel fet que donen, sorprenentment, el mateix coeficient k per al vidre i el film de polietilè quan en realitat el coeficient K d'aquest material pot arribar a ser el doble que el del vidre. En la indústria de la construcció, els materials acostumen a ser gruixuts i opacs a la radiació d'ona llarga; però en els hivernacles els materials de cobriment són prims i parcialment transparents a aquesta radiació.

L'altre intercanvi de calor important per convecció és el que es produeix per infiltracions d'aire exterior. L'equació que determina les pèrdues de calor sensible per renovació d'aire és:

$$Q_{rv} = V \cdot R \cdot C_a \cdot (T_i - T_e) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

on:

V és el volum de l'hivernacle (m^3)

R són les renovacions del volum d'aire per hora (1/h)

C_a és la calor específica volumètrica de l'aire ($0,3 \text{ Wh / m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$)

El nombre de renovacions o intercanvis d'aire per hora depèn del tipus i estat de l'hivernacle, com també de la quantitat de vent existent. Normalment, en un hivernacle tancat el nombre de renovacions pot variar entre 0,5 i 3 volums per hora. Alguns autors aconsellen adoptar valors de R de 1 en absència de vent i de 3 amb un vent superior als 5m/seg.

Com ha estat esmentat abans, la transferència de calor per convecció entre l'interior inclou no solament el moviment de l'aire, sinó també el del vapor d'aigua. Les pèrdues de calor originades són en forma de calor sensible i de calor latent.

Per avaluar aquestes pèrdues s'ha de conèixer la temperatura i la humitat de l'aire a l'interior i a l'exterior. Ambdós paràmetres, estan íntimament relacionats i quan s'actua sobre l'un s'obtenen repercussions en l'altre, però en sentit oposat. Així, per exemple, per portar una massa d'aire d'1 kg a $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ i perfectament seca fins a $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ amb el 70 % d'humitat es necessiten 6 kcal per escalfar l'aire i 8,5 kcal per escalfar a $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ els 14 grams d'aigua necessaris per elevar la humitat relativa fins al 70 %. Un 60 % de calor és latent, i un 40% és sensible. Aquests valors es determinen utilitzant el diagrama psicromètric, o de Mollier, que es mostra a la figura 4.5.

L'equació completa que determina les pèrdues de calor degudes a la renovació de l'aire interior és:

$$Q_{rv} = R \cdot V \cdot \gamma_a [C_a (T_i - T_e) + C_l (X_i - X_e) + C_v (X_i T_i - X_e T_e)] \quad (\text{Eq. 4.6})$$

on:

γ_a és el pes específic de l'aire ($1,3 \text{ kg/m}^3$)

C_a és la calor específica de l'aire ($0,28 \text{ Wh/kg}^\circ\text{C}$)

C_l és la calor latent de vaporització de l'aigua (692 Wh/kg)

C_v és la calor específica del vapor ($0,53 \text{ Wh/kg}^\circ\text{C}$)

Disposant del diagrama de Mollier per a l'aire humit i coneixent la temperatura i la humitat relativa, es pot conèixer el valor de x , o sigui, el contingut de vapor d'aigua en grams per kg d'aire sec.

4.2.4. Transferència global de calor

Generalment, els diferents tipus d'intercanvi es produeixen conjuntament. Així, per exemple, el pas de la calor a través de les parets de l'hivernacle fa intervenir la convecció i la radiació en les superfícies i la conducció

dins del material. La convecció, que hi juga un paper molt important, augmenta considerablement amb l'agitació de l'aire interior i, sobretot, amb el vent que incideix sobre la superfície de coberta exterior.

En resum, l'hivernacle pot ser considerat com un captador solar i el seu comportament tèrmic es pot expressar mitjançant una equació de balanç en la qual els factors més importants són l'eficiència solar de la coberta i el seu coeficient global de transferència

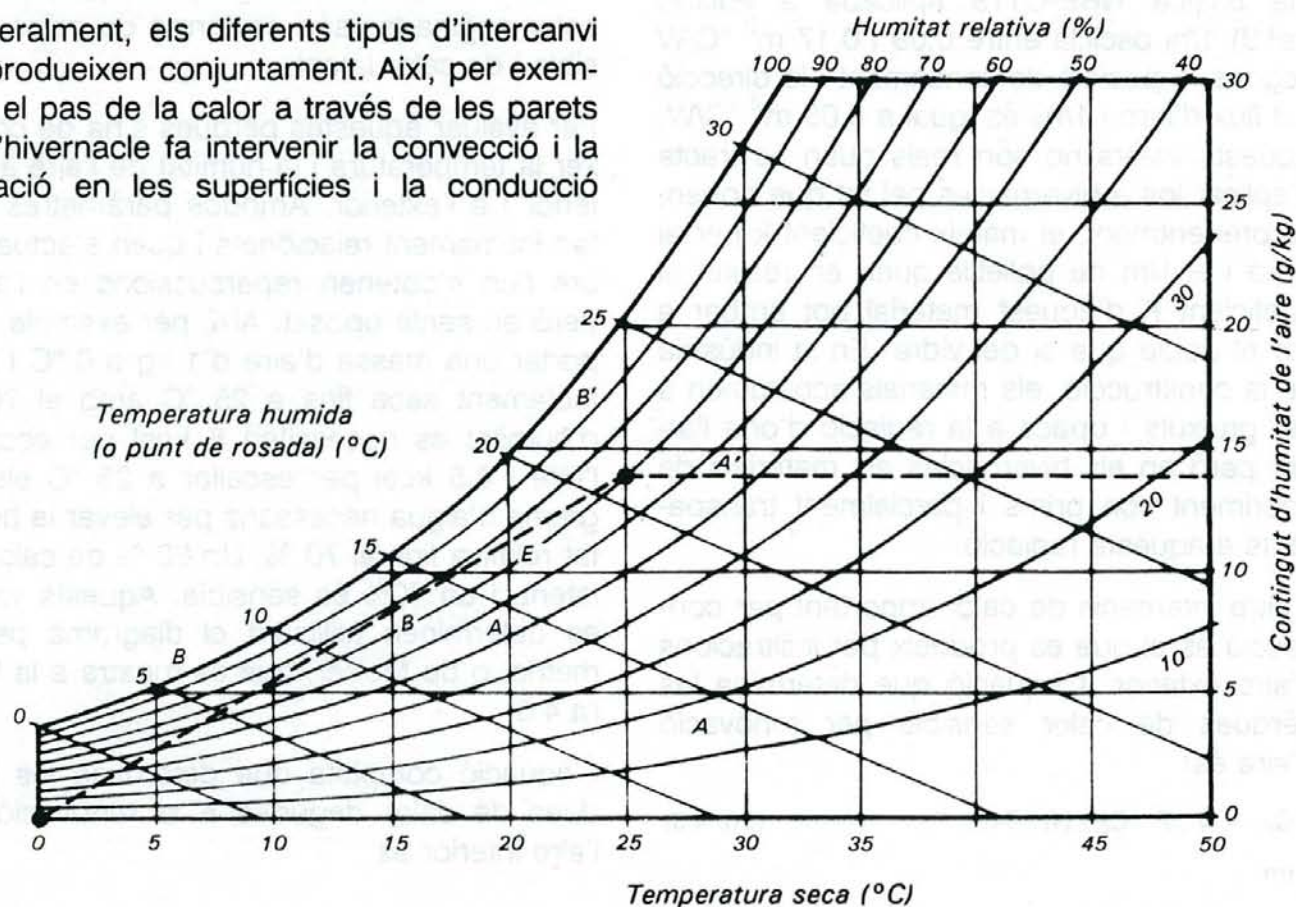


Fig. 4.5. Diagrama psicomètric: humitat relativa com a funció del contingut d'humitat de l'aire i de la temperatura.

de calor per conducció, convecció i radiació com també les pèrdues per infiltracions d'aire exterior. A l'hora de dissenyar un hivernacle s'ha de tractar de millorar la penetració de l'energia lluminosa i l'efecte hivernacle i disminuir les pèrdues de calor. Dins d'aquesta òptica s'ha d'abordar tant la concepció i el disseny d'hivernacles nous com la renovació o rehabilitació dels ja existents.

4.3. Balanç tèrmic d'un hivernacle

4.3.1. Introducció

L'equació de balanç tèrmic d'un hivernacle quan es consideren tots els potencials focus de pèrdues o guanys de calor es pot formular de la manera següent:

$$Q_{ca} + Q_{so} + Q_{re} = Q_{cb} + Q_{rv} + Q_{ev} + Q_{fo} + Q_{te} \pm Q_{em}$$

on:

Q_{ca} és la calor produïda pel sistema de calefacció

Q_{so} són els guanys útils solars

Q_{re} és la calor produïda en la respiració del material biològic

Q_{cb} és la calor perduda per conducció, convecció i radiació a través del material de coberta

Q_{rv} és la calor sensible perduda per la renovació de l'aire interior

Q_{ev} és la calor latent consumida en l'evapotranspiració de les plantes i en la renovació de l'aire interior

Q_{fo} és l'energia solar utilitzada en la fotosíntesi

Q_{te} és la calor perduda per conducció a través del terra

Q_{em} és la calor emmagatzemada

Els potencials focus de guanys o pèrdues de calor considerats es poden agrupar amb relació als conceptes següents:

- *Fonts de calor*

- *Pèrdues de calor a través del material de coberta*

- *Pèrdues de calor latent*

- *Comportament tèrmic del terra de l'hivernacle*

4.3.2. Fonts de calor

El terme Q_{ca} és la calor proporcionada pel sistema de calefacció, en el qual s'inclouen també els diversos equipaments (motors, llums, etc) existents a l'interior de l'hivernacle, que desprenen calor cap a l'ambient interior. La calor que ha de proporcionar el sistema de calefacció és un dels valors més importants a calcular per tal de conèixer la potència del sistema i la demanda d'energia existent durant el període de calefacció.

Els guanys solars (Q_{so}) útils s'obtenen en conèixer la radiació solar incident sobre la coberta, i la seva transmissió a la radiació esmentada (eq. 4.3). Les dades de radiació global obtingudes a partir de les mesures realitzades amb solarímetres s'han de convertir a les diferents pendents que presenta la porció de coberta orientada al sud. Normalment, aquestes pendents són, o poden ser, assimilades (en el cas d'hivernacles circulars) a una superfície vertical i a una altra d'inclinada.

La calor que proporciona la respiració de les plantes (Q_{re}) és, segons Meyer (ref. 10), de l'ordre d'una dècima part del valor de l'energia consumida en la fotosíntesi (Q_{fo}) en condicions de radiació solar intensa. Ja que la fotosíntesi utilitza tan sols un 3% de l'energia lluminosa, la calor de la respiració serà únicament d'un 0,3 a 0,4% de la radiació solar existent en un dia clar. Els valors de la calor de respiració (Q_{re}) i de l'energia de fotosíntesi (Q_{fo}) en ser comparativament petits no

són normalment considerats en el balanç energètic dels hivernacles.

4.3.3. Pèrdues de calor a través del material de coberta

Aquest és el càlcul de pèrdues més important que com ha estat abans esmentat es determina a partir del balanç dels fluxos conductius, convectius i de radiació existents entre la coberta i els medis que separa ($Q_{cb} = Q_{cd} + Q_{cv} + Q_{rd}$).

El flux conductiu, com s'ha esmentat abans, és proporcional a la diferència de temperatures entre els dos costats de l'element. El coeficient de proporcionalitat és el quocient entre la conductivitat (λ) i el gruix del material (e) tal com es mostra a l'equació (4.1). A la taula 4.1. s'hi mostren els valors de la conductivitat tèrmica d'alguns materials emprats en hivernacles.

Els intercanvis de calor per convecció tenen lloc en tres llocs diferents d'una paret múltiple: a l'exterior de la paret interna i externa, entre el medi interior i les parets interiors, i entre les mateixes parets interiors. El bescanvi convectiu amb l'aire exterior està molt influenciat per la velocitat del vent, i són diverses les fórmules per a determinar-lo. En dobles i triples cobertes, el bescanvi entre espais interiors és conductiu quan l'aire és estàtic i convectiu quan està en moviment. El bescanvi convectiu amb l'aire interior està bàsicament influenciat per la diferència de temperatura entre la superfície interior de la coberta i la de l'aire ambient.

El flux de radiació que emet un cos es determina, segons Boltzman, per l'equació (4.2) i la longitud d'ona en què a temperatura (T) majoritàriament emet energia és, segons Wien, igual a $2.898 \cdot 10^{-3} / T$. A tempera-

tura ambient, la longitud d'ona és al voltant de 10 nm.

Adicionalment a l'emissió, la superfície considerada rep radiació emesa pels cossos propers de forma que pot reflectir, absorbir o transmetre aquesta radiació d'acord amb la longitud d'ona implicada. L'energia absorbida és convertida en calor que modifica la temperatura del cos i, consegüentment, el flux energètic emès. La temperatura d'equilibri s'obté quan els fluxos absorbits o emesos són iguals.

Els fluxos conductiu, convectiu i de radiació a través dels diferents elements i costats d'una doble coberta, tal com s'expressa a la figura 4.6, poden ser determinats pel mètode iteratiu proposat per Nijskens (ref. 11). Els tres fenòmens estan, òbviament, interconnectats i en règim estacionari, i l'acció simultània de tots tres genera un equilibri global a cada costat. La solució del sistema

Taula 4.1. Conductivitat tèrmica i transmissió i reflexió a l'infraroig llarg de diversos materials de coberta (ref. 11).

Materials	Gruix (m)	Conductivitat tèrmica (λ) ($W m^{-1} K^{-1}$)	Transmissió a l'infraroig llarg T_0	Reflexió exterior R_1	Reflexió interior R_2
PE	0,00010	0,45	0,77	0,07	0,07
EVA	0,00018	0,45	0,38	0,03	0,03
PVC	0,0001	0,17	0,33	0,05	0,05
PVC reforçat	0,00018	0,17	0,16	0,15	0,15
Vidre hortícola	0,004	0,76	0,00	0,10	0,10
Vidre H11	0,004	0,76	0,00	0,70	0,10
Vidre H12	0,004	0,76	0,00	0,10	0,70
PMMA	0,001	0,19	0,00	0,07	0,07
PC	0,001	0,19	0,00	0,06	0,06
PCT	0,001	0,19	0,10	0,06	0,06
PVC	0,001	0,17	0,08	0,07	0,07
PP	0,001	0,22	0,50	0,05	0,05

s'obté per iteració, fixant els valors d'aquests coeficients en quatre o cinc passos. Un cop conegudes les temperatures, tots els fluxos de la figura 4.6. són fàcilment calculats. El càlcul és més fàcil quan s'analitza la transferència de calor a través d'una coberta senzilla.

Per a l'aplicació d'aquest mètode s'ha de conèixer el gruix de la coberta, la transmissió i reflectància de cada costat a l'infraroig llunyà i la conductivitat tèrmica dels materials. Aquest valor és ben conegut per a tots els materials utilitzats, com també el seu gruix, fàcilment mesurable. La transmissió i reflectància a la radiació tèrmica són també mesurats al laboratori (vegeu taula 4.1.).

Un cop es coneix el flux tèrmic total a través de la coberta, es poden determinar les pèrdues de calor (kWh) durant un període determinat multiplicant-lo per la superfície i el temps. També es pot determinar el coeficient K a partir de $Q_{cb}/(T_i - T_e)$.

4.3.4. Pèrdues de calor latent

Les pèrdues de calor latent d'evaporació de l'aigua (Q_{ev}) es produeixen per renovació de l'aire interior (Q_{rv}) i per la influència de l'evapotranspiració. Per avaluar les pèrdues de calor latent s'ha de conèixer la quantitat d'humitat afegida a l'hivernacle. Aquesta humitat prové de l'evaporació de l'aigua del terra i de la transpiració d'aigua de la superfície de les plantes.

Malauradament, l'evapo-transpiració no està ben definida per les condicions ambientals d'un hivernacle. Els valors més alts coincideixen amb períodes d'alta intensitat lumínica i elevades temperatures. Alguns autors (ref. 12) han mostrat que hi ha un alt grau de correlació entre l'evapo-transpiració i la

radiació solar incident i que el valor màxim probable entre ambdós fenòmens és de 0,5. Considerant aquest fet, les pèrdues per l'evapo-transpiració de les plantes es poden incloure en l'equació 4.3 en introduir un factor de proporcionalitat entre la radiació solar incident i les pèrdues per evapo-transpiració. L'equació 4.3 modificada serà:

$$Q_{so} = \alpha_s \tau A_s I (1 - \Psi) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

on

Ψ és la proporció de radiació solar que es perd per evapo-transpiració

De la mateixa manera, les pèrdues de calor latent per renovació d'aire (Q_{rv}) es poden calcular conjuntament amb la calor sensible tal com s'ha exposat en l'equació (4.6).

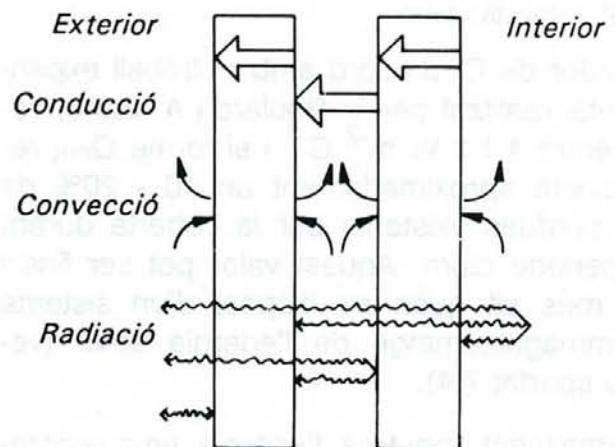


Fig. 4.6. Fluxes conductiu, convectiu i de radiació per a una doble paret.

4.3.5. Comportament tèrmic del terra de l'hivernacle

L'absorció de la calor pel terra s'ha de considerar com un fenomen transitori en el qual intervenen tres processos tèrmics:

- l'emmagatzematge de la calor en el terra durant el període diürn (Q_{em})
- la pèrdua d'una part de la calor emmagatzemada per conducció cap al subsòl (Q_{te})
- la restitució per radiació cap a l'ambient de la resta de la calor emmagatzemada (Q_{em})

Els hivernacles solars, com es veurà posteriorment, tracten de potenciar al màxim l'emmagatzematge i la restitució de la calor. Aquests efectes, deguts a la inèrcia tèrmica del terra o d'altres materials emprats com emmagatzematge de calor, poden ser expressats segons T. Boulard (ref. 13) per:

$$Q_{em} = C' (T_d - T_n) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

on:

C' és un paràmetre que caracteritza la proporció d'emmagatzematge o restitució d'una massa tèrmica que s'expressa en $W/m^2/^{\circ}C$.

T_d i T_n són les temperatures de consigna i interiors de dia i nit. Normalment, de 22 a 25 $^{\circ}C$ i de 12 $^{\circ}$ a 18 $^{\circ}$, respectivament.

El valor de C' d'acord amb el treball experimental realitzat per T. Boulard i A. Baille, varia entre 1 i 3 $W\ m^{-2}\ ^{\circ}C^{-1}$ i el terme Q_{em} representa aproximadament un 10 - 20% de les pèrdues existents per la coberta durant el període diürn. Aquest valor pot ser fins i tot més alt quan es disposi d'un sistema d'emmagatzematge de l'energia solar (vegeu apartat 7.4).

Normalment, no tota l'energia emmagatzemada en el terra durant el dia pot ser restituida a la nit. Una part de la calor es perd per conducció dins del terreny, a menys que

aquest estigui aïllat, com pot ser en el cas d'utilitzar un sistema de calefacció localitzat en el terra.

Segons l'AFME (ref. 5), les pèrdues cap al terra es poden expressar per l'equació:

$$Q_{te} = K_t \cdot A_t \cdot (T_i - T_t) \quad (\text{Eq. 4.9})$$

on:

K_t és el coeficient d'intercanvi tèrmic ($1.5W/m^2\ ^{\circ}C$)

La diferència de temperatures ($T_i - T_t$) entre l'aire i el terra és, per experiència, de l'ordre dels 10 $^{\circ}C$, essent, per tant, les pèrdues pel terra de l'ordre de 15 W/m^2 . Aquest valor pot representar com a molt el 10% de les pèrdues globals existents.

4.3.6. Balanç tèrmic global de dia i de nit

El balanç tèrmic d'un hivernacle, considerant, doncs, els termes energètics més importants, s'ha d'analitzar separatament durant els períodes diürn i nocturn. Durant el dia, l'equació de balanç simplificada s'expressa de la forma següent.

$$Q_{so} = Q_{cb} + Q_{rv} + Q_{em} \quad (\text{eq. 4.10})$$

En condicions normals d'assolellament, per a la majoria de zones climàtiques la calefacció no s'engegarà de dia i serà l'energia solar la que mantindrà l'hivernacle en condicions de confort. Aquest confort en certs pics solars de l'hivern, i normalment a l'estiu, serà assolit augmentant el nombre de renovacions d'aire mitjançant la ventilació i addicionalment, disminuint la radiació solar que arriba a les plantes en utilitzar una pantalla d'ombrejament.

Durant la nit, l'equació de balanç es descriu de la manera següent:

$$Q_{ca} + Q_{em} = Q_{cb} + Q_{rv} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

En aquest període, serà quan la calefacció funcionarà per tal de mantenir la temperatura de consigna establerta.

La resolució de l'equació de balanç durant el període diürn i/o nocturn es pot realitzar de manera més o menys simplificada aplicant les diferents equacions abans exposades utilitzant les temperatures diürnes i/o nocturnes corresponents.

A partir del balanç diürn es pot determinar l'energia solar emmagatzemada utilitzant una temperatura de consigna interior de 22 a 25 °C o l'energia a extreure per a ventilació i ombrejat, etc.

A partir del balanç nocturn es calculen les necessitats de calefacció utilitzant unes temperatures de consigna interiors de 12 a 18 °C segons el tipus de cultiu.

El càlcul de la calefacció és bàsic per tal de determinar el consum d'energia i la potència de la instal·lació. Aquest càlcul pot ser realitzat de forma més o menys simplificada segons es consideri o no la calor latent de l'aigua:

- càlcul de les pèrdues de calor sensible utilitzant les equacions (4.4) i (4.5)

- càlcul de les pèrdues de calor sensible i latent amb les equacions (4.4) i (4.6)

Quan aquests càlculs es realitzen de forma manual, el coeficient de transferència de calor que s'utilitza pot ser obtingut a partir de la conductivitat tèrmica de la taula 4.1. Aquest coeficient o directament les pèrdues globals (conducció, convecció i radiació) a través del material de coberta poden també ser obtingudes aplicant el mètode de càlcul per ordinador proposat per Nijskens esmentat a l'apartat 4.3.3.

Pel que fa a la resolució del balanç diürn, el seu interès es centra a valorar per una banda el potencial d'energia solar susceptible d'ésser emmagatzemada i per l'altre a determinar l'índex de renovacions d'aire o altres paràmetres de climatització durant el període d'estiu tal com s'esmenta al capítol 8.

Tots els mètodes i les equacions de resolució del balanç tèrmic d'un hivernacle descrits fins ara son simplificats i alguns d'ells de resolució manual. Existeixen per una altra banda gran quantitat de mètodes de càlcul molt detallats que es basen en la modelització matemàtica de cadascun dels processos de transferència de calor existents en un hivernacle convencional (ref. 14 i 15). Ni ha alguns d'ells com el de Kimball (ref. 16) que també consideren la possibilitat de modelitzar dissenys d'hivernacles solars.

El model desenvolupat per B.A. Kimball és molt versàtil i permet simular el comportament tèrmic de la majoria d'hivernacles convencionals i solars. El model considera entre d'altres els fluxos energètics de radiació solar i tèrmica, la convecció, la conducció, les infiltracions, la ventilació natural, l'evapotranspiració, etc. Les equacions de balanç amb aquests fluxos es resolen a nivell de les temperatures de coberta, d'aire i humitat ambient, vegetació, cortina tèrmica, terra i emmagatzematge. Els dispositius exteriors considerats inclouen els bescanviadors i jaç de còdols emprats en els dissenys solars, els calefactores, la refrigeració per evaporació ("cooling system") i altres dispositius que bescanvien energia i aigua directament amb l'hivernacle. La versatilitat d'aquest model el converteix en una eina poderosa per preveure el comportament tèrmic i el cost de funcionament de la majoria d'hivernacles solars proposats.

4.4. Estudi energètic de diversos tipus d'hivernacle a les quatre zones climàtiques de Catalunya

En aquest apartat s'hi exposen de forma comparativa alguns dels resultats obtinguts en l'estudi del comportament tèrmic de diferents tipus d'hivernacle, realitzat conjuntament per l'IRTA de Cabrls i la Direcció General d'Energia de la Generalitat de Catalunya.

A la figura 4.7. s'hi mostren les característiques més importants dels tres tipus d'hiver-

nacles analitzats, tots ells orientats al llarg de l'eix longitudinal E-O.

Els materials de coberta analitzats, pel que fa a l'hivernacle en forma de capella i túnel són: el polietilè normal i tèrmic aplicats de forma senzilla i doble (amb 5 cms. de separació), el vidre i el policarbonat cel.lular de 6 mm d'espessor. L'hivernacle asimètric estudiat disposa d'una coberta de policarbonat parcialment aïllada amb 5 cms de poliestirè expandit.

L'anàlisi s'ha realitzat per a les quatre zones climàtiques considerant les temperatures

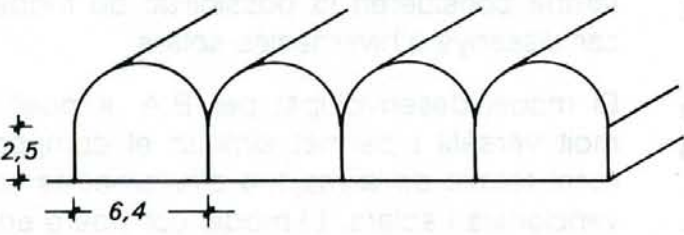
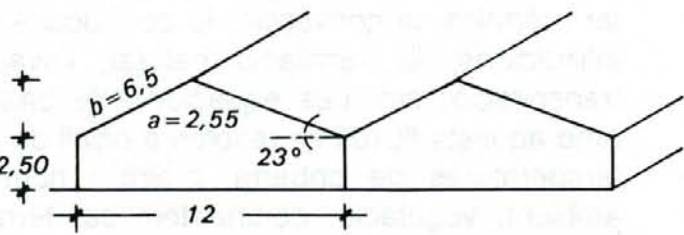
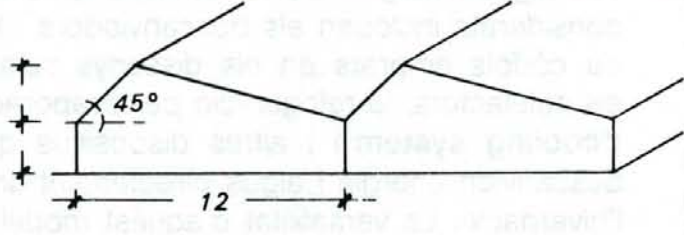
Diferents tipus d'hivernacles	Superfície de planta	Volum	Superfície de coberta	Superfície vertical sud	Superfície inclinada sud
	.024	3.619	1.546	100	582
	960	3.624	1.421	100	520
	967	3.786	1.481(1)	-	443
(1) 852 transparent, 629 opac.					

Fig. 4.7. Característiques constructives dels tres tipus d'hivernacle analitzats.

nocturnes de la taula 2.2. Les temperatures de consigna interior nocturnes emprades en el càlcul han estat 12 i 18 °C.

El càlcul de les pèrdues de calor a través de la coberta s'ha realitzat mitjançant l'aplicació del mètode iteratiu de Rijkard abans esmentat i suposant unes condicions de cel clar i una velocitat del vent de 4 m/s. Els valors de la transmissió i reflexió a l'infraroig d'ona llarga s'han extret de la taula 4.1.

Les pèrdues per renovació d'aire, s'han determinat durant el període nocturn, considerant un índex de dues renovacions del volum d'aire per hora. El balanç de calor latent ha considerat unes condicions de saturació de l'aire (100% HR) tant a l'interior com a l'exterior.

La comparació entre les tres formes d'hivernacles s'ha realitzat considerant que el material de coberta és el policarbonat i que la temperatura de consigna interior és de 18

°C. Com es pot observar a la figura 4.8., les pèrdues de calor nocturnes en la zona climàtica 4 són pràcticament iguals en els hivernacles en forma de capella i túnel i lleugerament inferiors (un 12% menys) en l'hivernacle de forma asimètrica. Aquestes diferències són fins i tot menors quan l'anàlisi es realitza en altres zones climàtiques o quan la temperatura de consigna és de 12°C.

L'anàlisi de les pèrdues de calor nocturna a les quatre zones climàtiques s'ha realitzat per l'hivernacle en forma de capella considerat com el més representatiu. Com es pot observar a la figura 4.9., quan el material de coberta és el policarbonat i la temperatura de consigna interior és de 18 °C, són notables les diferències existents entre zones climàtiques (un 55% més de pèrdues a la zona freda en relació a l'atemperada). Aquestes diferències són fins i tot més notables quan s'utilitzen materials de coberta de

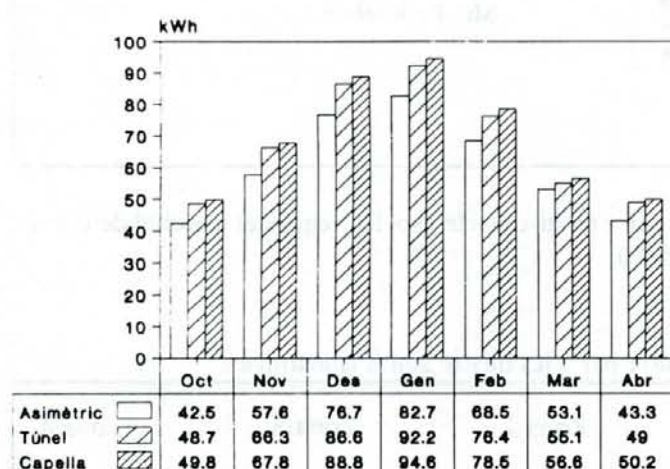


Fig. 4.8. Pèrdues de calor nocturnes dels tres tipus d'hivernacle amb coberta de policarbonat a la zona climàtica 4. (Temperatura de consigna interior: 18 °C).

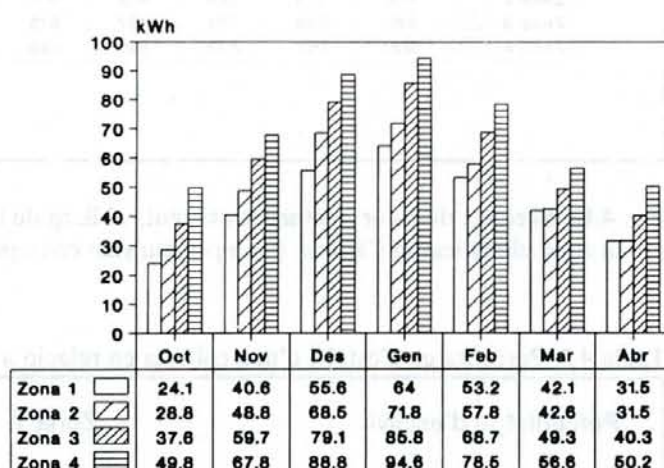


Fig. 4.9. Pèrdues de calor nocturnes d'un hivernacle capella cobert amb policarbonat a les quatre zones climàtiques (Temperatura de consigna interior: 18 °C).

transmissió calorífica més gran. Així, a la figura 4.10. s'hi mostren per a les quatre zones climàtiques i per a una temperatura de consigna interior de 18 °C les pèrdues de calor nocturnes existents en un hivernacle en forma de capella segons el material de coberta emprat. A partir d'aquests valors, s'han determinat els percentatges d'estalvi obtinguts a l'utilitzar un tipus de film o de coberta rígida en comptes d'un altre i una

coberta de film doble en relació a una de senzilla. Així, a la taula 4.2. s'hi mostren aquests valors d'estalvi en cadascuna de les zones climàtiques. Com s'hi pot observar, els valors d'estalvi més grans s'aconsegueixen a la zona climàtica 3, sobretot pel que fa a la utilització de polietilè tèrmic en comptes de polietilè normal, i de policarbonat en lloc de vidre.

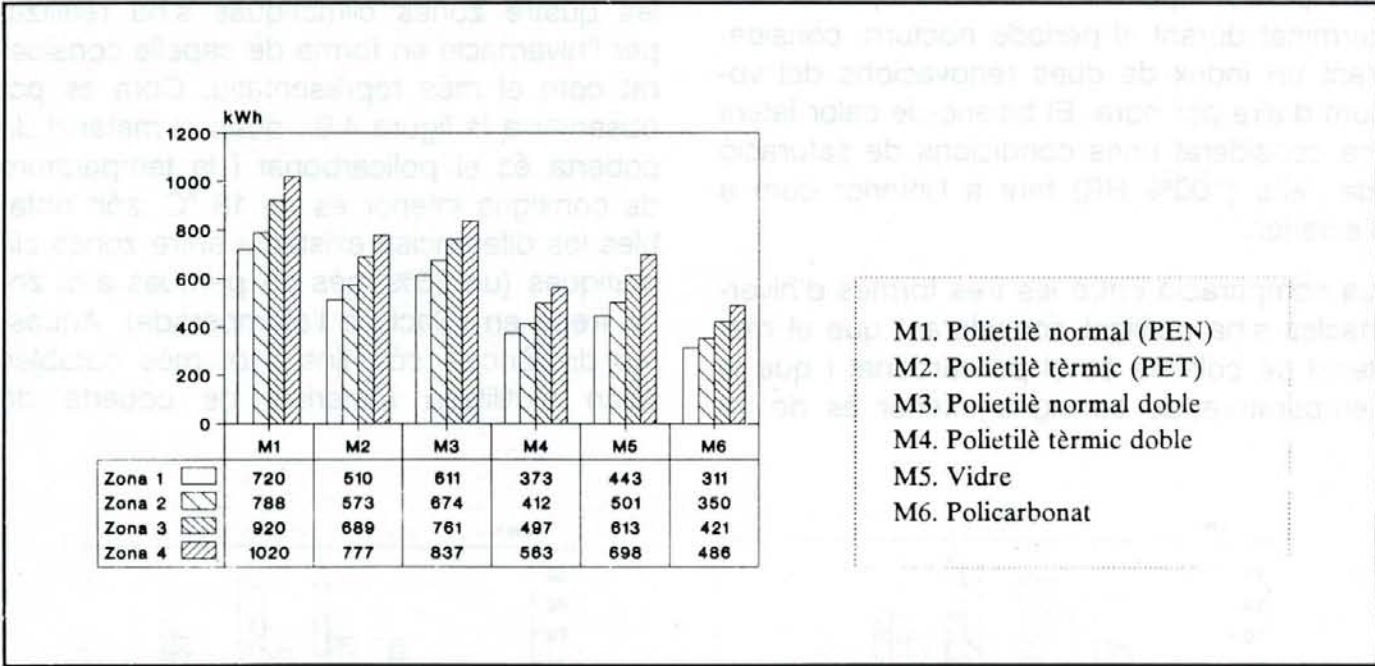


Fig. 4.10. Pèrdues de calor nocturnes existents al llarg de l'any per a un hivernacle capella, segons el material de coberta i la zona climàtica on s'aplica. (Temperatura de consigna: 18 °C).

Taula 4.2. Percentatge d'estalvi d'una coberta en relació a un altre per a les quatre zones climàtiques.

Percentatge d'estalvi	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
PEN doble en relació a PEN senzill	15,0	14,5	17,3	18,0
PET doble en relació a PET senzill	26,9	28,0	27,9	27,6
PET en relació a PEN	29,0	27,3	33,5	31,2
Policarbonat en relació a vidre	29,8	30,1	31,3	30,4

**CAPÍTOL 5. HIVERNACLES: IMPLANTACIÓ I DISSENY.
TÈCNIQUES D'ESTALVI ENERGÈTIC**

5. HIVERNACLES: IMPLANTACIÓ I DISSENY. TÈCNiques D'ESTALVI ENERGÈTIC

5.1 Introducció

L'hivernacle és un mitjà tecnològic destinat a crear un clima adaptat a les necessitats dels cultius. Funciona com un bescanviador de calor entre el medi que crea a l'interior i el seu exterior. Per aquesta raó, el lloc, la disposició de la construcció i les condicions meteorològiques tenen un efecte immediat, com ha estat mostrat al capítol anterior, sobre les necessitats d'energia de l'hivernacle. Aquest ha d'ésser, doncs, concebut i organitzat en funció de les exigències climàtiques del cultiu, del clima del lloc i dels imperatius econòmics.

Per optimitzar l'ús de l'energia als hivernacles hi ha dos camins: millorar la producció i reduir les pèrdues de calor.

La millora de les condicions de producció tracta de treure un millor profit de l'energia solar i de l'energia consumida.

- *Conduint millor el cultiu: fertilització més adaptada irrigació millor aconseguida, ventilació més eficaç, injecció de CO₂, etc.*
- *Canviant les varietats: varietats baixa temperatura varietats més productives.*
- *Introduint espècies noves.*
- *Escalfant millor: escalfant les plantes i no tot l'hivernacle (calefacció localitzada).*
- *Adaptant els períodes de calefacció per produir més i més aviat.*

La reducció de les pèrdues tracta d'eliminar tot malversament, tota sobreconsumació, tota fuga o pèrdua d'energia. Es tracta de consumir estrictament l'energia necessària.

Per optimitzar la utilització de l'energia, s'han de conèixer, doncs, les necessitats de les plantes, dissenyar i construir un hivernacle adaptat, escollir bé la calefacció i l'energia a utilitzar i, en definitiva, gestionar el clima de l'hivernacle.

En aquest capítol, s'hi exposen els criteris i les consideracions de disseny més importants, com també tot un ventall de tècniques d'estalvi energètic, moltes de les quals s'han desenvolupat durant el període de la crisi d'energia. Actualment, moltes d'aquestes tècniques són aplicades o, si més no, considerades en el disseny d'un hivernacle.

5.2 Factors d'implantació

5.2.1 Elecció del lloc

La localització geogràfica d'un hivernacle ha de considerar la proximitat dels circuits comercials o de les vies de comunicació.

Aquesta localització també es caracteritza per unes condicions climàtiques que afecten, juntament amb l'orientació i la disposició dels hivernacles, el clima espontani interior i, consegüentment, l'elecció de cultius, varietats i equipaments.

Encara que les condicions d'implantació vénen molt prefixades per factors de tipus socio-econòmic, és interessant tenir en compte els aspectes següents:

- *Construir en zones ventades augmenta les pèrdues de calor i dificulta la bona gestió del clima interior de l'hivernacle.*
- *Un emplaçament humit origina igualment unes despeses de calefacció més importants.*

5.2.2 Orientació i disposició dels hivernacles

L'orientació est-oest és generalment la millor, sobretot pel que fa a hivernacles d'un sol cos que reben més calor durant l'hivern i menys durant l'estiu. De tota manera, en aquells emplaçaments amb vents predominants de nord, l'orientació nord-sud és recomanable.

La disposició dels hivernacles formant un quadre té menys pèrdues de calor que un bloc de forma allargada. El reagrupament d'hivernacles en bloc multicapella estalvia, doncs, energia. Així, dos hivernacles de 8 x 25 m adossats economitzen d'un 10 a un 15% d'energia en relació a dos hivernacles de la mateixa superfície però separats.

5.2.3 Protecció al vent dels hivernacles

L'acció del vent sobre els hivernacles presenta un doble vessant perjudicial. En primer lloc, els efectes mecànics, com trenca-ment de coberta, anclatges, deformació o destrucció de l'estructura, etc. L'altre efecte perjudicial és l'augment de les pèrdues de calor en incidir sobre:

- els intercanvis de calor per convecció i conducció a nivell de la coberta
- la taxa de renovació d'aire a causa de fuites i infiltracions d'aire

Les pèrdues de calor per convecció i conducció estan en proporció directa al valor del coeficient K de pèrdues de calor del material de coberta. Com es pot observar a la taula 5.1, l'augment del coeficient K és molt important en el cas del polietilè, encara que només es tracta d'un vent de 32,4 km/h. Amb vents més forts la pèrdua de calor es més notable. Per protegir del vent els hiber-

nacles és important d'implantar tallavents. Les magnituds que els defineixen són:

- *Alçada.* Haurà de ser igual o superior als pilars.
- *Permeabilitat.* La porositat òptima en el cas d'utilitzar tallavents artificials és del 80%.
- *Distància en relació a l'hivernacle.* Si la pantalla protegeix el costat nord, pot estar molt a prop de l'hivernacle, excepte si són arbres. En els altres costats, la distància ha d'ésser de 2 a 3 vegades l'alçada.

Els tallavents poden ser de dos tipus:

- *naturals:* conformats per tanques de material vegetal que poden adquirir grans alçades, essent tan sols recomanables a la pared nord de l'hivernacle.
- *artificials:* són normalment de malla de plàstic de característiques predeterminades, amb una durada d'aproximadament 10 anys.

L'efecte dels tallavents pot ésser tan significatiu que, per exemple, la reducció de la velocitat del vent en 1 m/s permet disminuir les necessitats de calefacció en aproximadament 1,2 kcal/hm² per grau de diferència de temperatura respecte a l'exterior. A la taula 5.2. s'hi observen les economies de calefacció que corresponen a una reducció de la velocitat del vent de 1 m/s, segons la dife-

Taula 5.1. Influència de la velocitat del vent sobre el coeficient K. (ref. 17).

Material	K (W/m ² °K) velocitat del vent	
	1m/s	9m/s
Polietilè	5,8	8,3
Polietilè doble paret	5,4	5,9
Vidre	5,5	7,2
Vidre doble amb polietilè	3,4	4,3
Vidre doble paret	3,1	3,4

rència de temperatures entre l'interior i l'exterior i la velocitat de vent existent.

5.3 Factors de disseny i actuacions de rehabilitació

5.3.1 Elecció del material de coberta

L'elecció del material i tipus de coberta s'ha de fer en funció de diversos aspectes a analitzar, com ara són:

- **la forma de l'estructura a cobrir:** quan l'estructura és rectilínia qualsevol material és utilitzable, mentre que tan sols els materials plàstics són possibles per a estructures curvilínies

- **l'estat de l'hivernacle quan es tracti d'una renovació:** en la rehabilitació d'hivernacles s'ha de tenir en compte l'estat de l'estructura, els fonaments i el període d'amortització de la nova coberta amb relació al temps de vida restant de l'hivernacle

- **el clima exterior:** d'acord amb les condicions climàtiques dominants en el lloc d'emplaçament són preferibles unes condicions de disseny a d'altres. Així, les dobles cobertes s'han de col·locar en zones ventades o fredes, i s'ha de prioritzar l'aireig en els llocs molt assolellats

- **les necessitats climàtiques del cultiu:** en els cultius més intensius, de temperatures nocturnes de consigna interior elevades (18-22 °C), són preferibles les solucions que representen un estalvi

d'energia, com la doble coberta o la pantalla tèrmica

- **l'estalvi energètic que es pot assolir:** l'estalvi energètic previst es pot determinar a partir del balanç energètic calculat amb i sense la solució proposada

- **el cost i la durada del material:** en el disseny d'un hivernacle, és important calcular la rendibilitat econòmica de les tècniques d'estalvi d'energia proposades (tipus de material, doblament de parets i coberta, etc.) tot comparant l'estalvi obtingut amb el sobrecost implicat per la mesura d'estalvi analitzada durant el seu temps de vida

Altres aspectes específics a considerar en l'elecció d'un film de plàstic com a coberta de l'hivernacle són:

- Preveure les condensacions, utilitzant plàstics tractats que es poden incorporar sobre estructures lleugeres i econòmiques.

- Escollir un film tèrmic o una doble coberta quan les temperatures interiors han d'ésser elevades.

- Evitar les parets dobles quan les necessitats de llum són importants.

- Evitar les parets dobles i preveure una ventilació suficient quan les plantes són molt sensibles a l'excés de calor.

- En zones ventades, preferir les dobles parets i evitar els films massa flexibles.

- En zones fredes, evitar el PVC, i en llocs amb preponderància de cel clar, evitar el polietilè de baixa densitat i llarga durada.

Taula 5.2. Estalvi de calefacció corresponent a una reducció de la velocitat del vent d'1m/s (ref. 6).

Velocitat del vent:		2.5m/s	5m/s	10m/s
Diferència de temperatura entre l'interior i l'exterior de l'hivernacle	5°	7,2%	6,1%	4,7%
	10°	8,9%	7,3%	5,4%
	15°	9,4%	7,7%	5,6%

Pel que fa als materials plàstics rígids (PVC placa, polièster estratificat, policarbonat i polimetacrilat) tractats per resistir l'envelliment als raigs UV, permeten, pel fet de ser lleugers, allargar els pòrtics. El risc de pèrdues a nivell d'unions és menor i la radiació solar entrant és més gran. És important, però, d'evitar l'ús de planxes ondulades que minvin l'estanqueïtat i augmentin la superfície d'intercanvi i, per tant, les pèrdues de calor.

5.3.2 Millora de l'estanqueïtat de l'hivernacle

Consisteix, essencialment, a evitar que l'aire calent interior s'escapi inútilment cap a l'exterior o que es produeixin infiltracions de l'aire exterior fred.

La millora de l'estanqueïtat d'un hivernacle excessivament permeable pot arribar a minvar les seves fuites d'aire fins a un 50%, i a reduir les pèrdues globals entre un 5% i un 10%. Aquesta estanqueïtat, es refereix tant a la produïda per un bon ajustament de portes i finestres, com a l'absència de defectes de col·locació del material de coberta o del seu trencament. D'una altra banda, és convenient gestionar correctament la ventilació natural de l'hivernacle a través de les obertures de ventilació. Així doncs, mentre la temperatura interior no superi, per exemple, els 25 °C, serà convenient mantenir-les tancades. També serà important tancar la porta sempre que s'entri o se surti de l'hivernacle, o protegir-la en cas de circulació freqüent mitjançant l'ús d'una cortina de plàstic flexible o semirígid, com les normalment existents per a aquest fi.

5.3.3 Protecció doble temporal

Consisteix a col·locar sobre els cultius uns túnels de plàstic amb la finalitat d'aïllar les plantes de l'ambient de l'hivernacle. Generalment, s'instal·len sobre cultius de primavera implantats a l'hivern i es mantenen fins que desapareix el risc de temperatures baixes. Normalment s'utilitzen en hivernacles freds sense calefacció i, com no han de suportar els efectes del vent, no precisen de cercols forts ni d'ancoratges especials. El material de coberta pot ser qualsevol film plàstic: P.E., P.V.C. i E.V.A. Com menys estanc i fred si-

gui l'hivernacle, més interessarà utilitzar els materials de millors propietats tèrmiques, o sigui opacs a l'infraroig llarg i molt transparents a la llum.

D'una altra banda, en hivernacles calents aquestes proteccions poden associar-se de forma avantatjosa amb una calefacció localitzada en el terra.

Es tracta, doncs, d'una solució econòmica que permet, com a mínim, guanyar uns 2 °C en relació a la temperatura de l'hivernacle, de manera que s'aconsegueix un estalvi d'energia pel fet de poder baixar la seva temperatura de consigna o de reduir el volum a escalfar quan s'utilitza un sistema de calefacció localitzat en el terra.

Dels inconvenients, cal destacar-ne la reducció de lluminositat i el risc de condensacions importants en els films no perforats. Com que es tracta d'un cultiu confinat, es produeix un augment ràpid de la temperatura o higrometria, per la qual cosa s'ha de vetllar per l'aireig dels cultius, sobretot en temps assolellat, amb el conseqüent temps de manipulació que això implica.

En definitiva, per a hivernacles tèrmicament deficients, les dobles proteccions temporals són una solució econòmica que permet protegir millor els cultius dels cops de fred en períodes curts (15 o 30 dies).

5.3.4 Doblament o aïllament de parets

5.3.4.1 Introducció

L'aïllament de parets consisteix a doblar de forma permanent o temporal tota la coberta o una part, deixant un coixí d'aire entre les dues parets.

Hi ha bàsicament tres tècniques de doblament o aïllament.

- Aïllament per doblament -on es doblen de forma fixa les parets i coberta amb un film de plàstic transparent- o per doble paret, on la coberta és un material de doble paret.

- Aïllament per pantalla tèrmica mòbil, on es desplega una tela o film de nit per sobre del cultiu.

Aquestes tècniques es poden aplicar en hivernacles multicapella o túnel, essent més rendibles en climatologia freda o quan la temperatura de consigna és elevada.

L'aïllament pot ser parcial (sols parets verticals) o total i realitzat amb materials flexibles o rígids transparents (plàstics o vidre). Com a variant, també es pot considerar l'aïllament parcial de l'hivernacle amb un aïllant opac, com el poliestiré expandit.

En tots els casos s'han de tenir en compte les següents consideracions:

- Les propietats òptiques del material, tant respecte a la llum solar com a l'infraroig.

- Les pèrdues per convecció són més limitades quan el material és menys porós.

- L'aïllament ha d'ésser estanc per tal d'evitar l'intercanvi d'aire entre l'interior i el coixí d'aire empresonat.

Idealment, doncs, els materials de doblament, a més de tenir, quan són fixos, unes bones propietats òptiques, haurien de disposar d'una porositat i un coeficient de transmissió calorífica febles i la seva instal·lació hauria de ser estanca.

L'interès d'aquestes tècniques d'estalvi energètic rau en els següents aspectes:

- El doble gruix reté millor els infraroigs d'ona llarga.

- El coixí d'aire és un material aïllant.

- L'estanqueïtat del material permet reduir les fuites d'aire.

- La temperatura de les fulles és lleugerament superior i el risc de condensacions és menor.

- L'estalvi d'energia varia entre un 10 i un 50% segons l'hivernacle, la zona climàtica i el tipus de doblament.

Entre els inconvenients cal destacar la reducció de lluminositat, l'augment de la humitat relativa, i, en cas de neu, la dificultat de fondre-la amb el risc d'acumulació consegüent.

Taula 5.3. Distribució en percentatge de la superfície d'hivernacles calefactats al Maresme segons el sistema d'estalvi energètic, (ref. 1).

Sistemes d'estalvi	%
Film plàstic (col·locat a l'alçada de la canal)	24,8
Cortina tèrmica blanca	9,0
Doble paret	7,7
Tubs film inflable	3,3
Triple paret	1,2
Doble paret + cortina tèrmica blanca	1,1
Triple paret + cortina tèrmica aluminitzada	0,9
Triple paret + cortina tèrmica blanca	0,9
Cortina tèrmica aluminitzada	0,8
Doble paret + cortina tèrmica aluminitzada	0,7
TOTAL AMB ESTALVI	50,4

A la taula 5.3. s'hi mostra la distribució en percentatge de la superfície d'hivernacles calefactats a la comarca del Maresme, segons el sistema emprat d'estalvi energètic.

5.3.4.2 Doblament de parets i doble coberta

El doblament de parets es realitza amb films de plàstic flexibles i transparents de forma parcial o total. Consisteix a col·locar una segona capa de material de coberta mantenint una separació que pot variar entre 1 i 10cm; l'aire present produeix un efecte aïllant, i permet uns estalvis d'energia d'entre el 15 i el 45% segons el material i les condicions climàtiques.

El doblament es pot fer amb el mateix material de coberta o amb un film plàstic. Així, en el cas d'un hivernacle de vidre, la col·locació d'un altra placa a 1 cm de distància pot arribar a reduir les pèrdues de calor fins un 45%, mentre que, doblant el vidre amb film plàstic, la reducció pot arribar al 35%, encara que el cost de l'operació de doblament és més baix.

És important que la instal·lació de doblament sigui estanca i evitar els ponts tèrmics que pot originar l'estructura.

En general, el doblament de parets és una solució econòmica per estalviar energia que pot ser realitzada pel mateix cultivador, encara que presenta certs inconvenients, com ara són:

- La pèrdua de lluminositat permanent.
- El risc de condensació i acumulació de pols entre el film i la paret.
- És difícil de col·locar en alguns hivernacles.
- Augmenta la humitat relativa de l'aire.

- Redueix l'alçada disponible en doblar el sostre.

Com a conclusió, la solució sembla adient per a les parets verticals, essent més interessant utilitzar la pantalla tèrmica per al sostre.

La doble paret i/o coberta pot ser realitzada amb plàstic flexible o rígid, com els plàstics amb bombolles d'aire i els cel·lulars. A diferència del doblament que s'acostuma a realitzar sobre cobertes ja existents, la doble coberta en material rígid s'instal·la principalment en hivernacles nous.

Els plàstics amb bombolles d'aire han estat originalment emprats en la indústria de l'embalatge. Estan formats per dos films de polietilè, un dels quals disposa d'alvéols tèrmicament conformats. Aquest tipus de material pot ser utilitzat en hivernacles sobretot el de bombolles de gran diàmetre, que garanteixen una millor transmissió de la llum que les de petit diàmetre. Per tal d'augmentar la seva durada s'afegeix per la part inflada un film suplementari de plàstic resistent als UV.

Un altre tipus de doble coberta disposa d'un film doble de plàstic que s'infla amb aire a baixa pressió. Aquest sistema pot adaptar-se a la majoria d'estructures existents si els perfils de sujecció dels films garanteixen l'estanqueïtat de la cambra d'aire.

També existeixen els plàstics rígids cel·lulars que poden ser de polipropilè -també normalment emprats en la indústria de l'embalatge-, policarbonat i plexiglàs. Tots ells es poden subministrar ja tractats o protegits dels UV. El polipropilè té una duració de 3 o 4 anys, i els altres dos poden arribar als 10 anys garantint que la seva degradació òptica -pèrdua de transmissió- serà inferior al 10%.

Moltes vegades, segons la forma i dimensions de l'hivernacle, pot ser interessant doblar o aïllar tan sols les parets verticals de l'hivernacle. Aquesta tècnica menys costosa que el doblament total de l'hivernacle, encara que estalvia menys energia -aproximadament 20%- no minva la seva lluminositat. Altres tècniques d'estalvi consisteixen a aïllar amb poliestirè les parets verticals i parcialment la teulada de l'orientació nord de l'hivernacle. L'estalvi d'energia aconseguit pot ser interessant i, encara que es perdi lluminositat, l'efecte reflectant del color blanc del poliestirè la compensa parcialment pel fet de distribuir-la de forma uniforme.

La doble paret, a diferència del doblament, és una solució cara que presenta una bona

eficiència tèrmica. De la mateixa manera que en el doblament de parets, s'hi presenta el risc de condensacions, les pèrdues de llum permanents i el risc d'acumulació de neu.

5.3.4.3 Pantal·les tèrmiques

Per tal de reduir les pèrdues de calor per irradiació nocturna des dels cultius i el terra de l'hivernacle cap a l'exterior, es pot utilitzar una sèrie d'elements mòbils transparents, translúcids o opacs a interposar entre el cultiu i la coberta per sobre dels conductes de calefacció. Aquests elements poden ser de dos tipus:

- Les pantal·les tèrmiques, la finalitat de les quals serà reduir els intercanvis energètics entre l'hivernacle i l'exterior durant la nit.

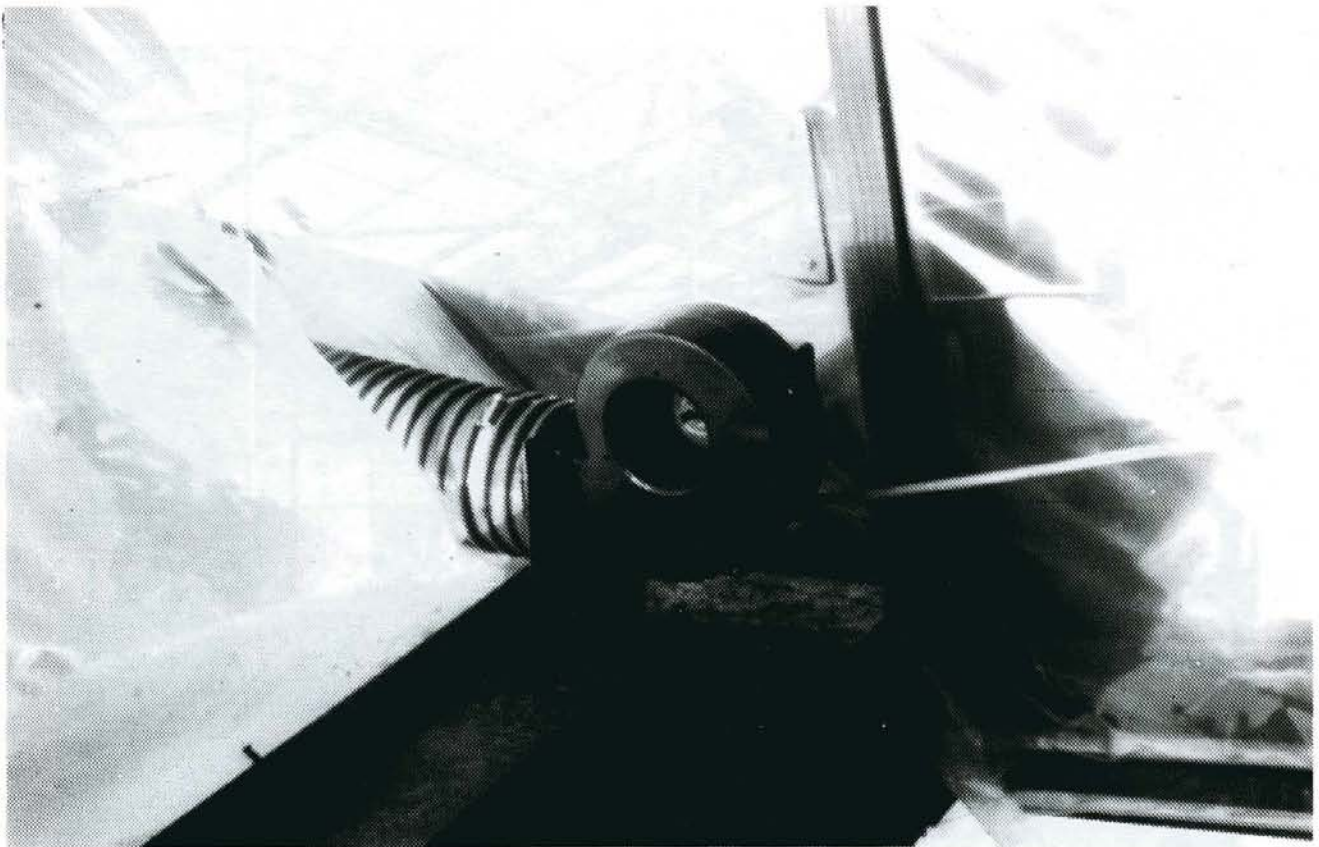


Foto 4: Doble coberta inflada amb aire a baixa pressió: detall del compressor.

- Les pantalles d'ombreament, que essencialment tenen com a finalitat crear un millor microclima lluminós i tèrmic durant el dia encara que n'hi ha algunes que també poden reduir les pèrdues de calor durant la nit.

El comportament de les pantalles tèrmiques depèn de dos factors principals:

- D'una part, les propietats òptiques del material respecte a la radiació infraroja, primordials en la reducció de les pèrdues per radiació.

- D'altra banda, la porositat del material que afecta les pèrdues per convecció i les fuites d'aire.

Hi ha tres categories de materials:

Els films de plàstic transparents: la seva transmissió a l'infraroig llarg redueix la seva eficiència tèrmica (20 a 30 % d'estalvi), però poden ser deixats desplegats durant les primeres i darreres hores del dia, la qual cosa proporciona un estalvi suplemen-

tari (10 a 15 % de més).

Els films de plàstic opacs: el seu comportament tèrmic és millor i s'utilitzen normalment per controlar el fotoperíode. El seu temps de vida és curt i, en ser impermeables, provoquen un confinament atmosfèric amb un augment de la humitat relativa de l'aire i del goteig sobre les plantes.

Els materials teixits: són, en general, poc eficients per reduir les pèrdues per radiació; però poden reduir d'un 40 a 50 % les pèrdues per convecció i les infiltracions. Normalment s'utilitzen com a pantalles d'ombreament durant el dia.

Altres tipus de material són els films plàstics o teixits aluminitzats sobre una o les dues cares. Són molt eficients tèrmicament, encara que la seva resistència mecànica és feble i la capa d'alumini es pot alterar amb la humitat.



Foto 5: Paret nord aïllada.

Els teixits aluminitzats són els que presenten un comportament millor en la reducció de les pèrdues per radiació (60% de reducció), a causa de la seva baixa emissivitat en la regió de l'infraroig. Altres materials de transmissió elevada ofereixen una reducció de pèrdues per radiació del 10 al 20%.

Per tal de tenir la millor eficiència pel que fa a la reducció de pèrdues per convecció i fuites d'aire, les pantalles tèrmiques han de presentar una nul·la porositat, com els films de plàstic, o molt feble, com alguns teixits poc permeables, i poden arribar a una reducció de les pèrdues convectives del 60%.

La combinació d'aquests dos efectes permet d'obtenir, en el cas de sistemes estancs, unes reduccions importants que varien entre el 25 i el 50% segons el tipus de material.

Entre els inconvenients de les pantalles tèrmiques tenim la reducció de lluminositat, tant en el cas que sigui fix com mòbil en posició replegada, i el risc més gran de condensacions en el cas de materials impermeables.

En general, tots els sistemes d'apantallament mòbil presenten l'inconvenient de la seva dificultat de col·locació dins de l'hivernacle, ja que aquests no han estat dissenyats pensant en aquests tipus d'accessoris.

L'elecció del tipus de pantalla tèrmica depèn no tan sols de les funcions d'estalvi o ombrejament que hagi d'assolir i de les propietats tèrmiques dels materials disponibles sinó també de les seves propietats mecàniques i de la durabilitat de les seves propietats òptiques.



Foto 6: Pantalla de lamel·les graduables.

És difícil que una pantalla pugui reunir a la vegada els objectius d'una pantalla tèrmica i d'ombrejament. Així, una pantalla opaca pot controlar el fotoperíode durant el dia i les pèrdues de calor a la nit. Contràriament, la utilització com a pantalles d'ombrejament de teixits poc permeables que funcionin eficientment com a reductors de pèrdues a la nit, pot implicar que donin una temperatura massa alta durant el dia. La pantalla d'ombrejament ha de presentar una porositat suficient que permeti l'aireig de l'hivernacle i aquesta porositat és malauradament incompatible amb els objectius d'una pantalla tèrmica.

Actualment s'intenta compatibilitzar aquests dos objectius desenvolupant les pantalles dobles, l'una per ombrejar durant el dia i l'altra per reduir pèrdues durant la nit, o mিজant la utilització d'elements de lamel·les graduables que permetin ombrejar i aïllar segons estiguin obertes o tancades.

Un altre desenvolupament original consisteix en la utilització de tubs de film de polietilè transparent d'uns 50 cms de diàmetre (com els utilitzats per a la distribució de l'aire calent en la calefacció), que, col·locats longitudinalment en la part alta, s'inflen amb aire per la nit, resten en contacte uns amb els altres i conformen una cambra d'aire que fa la funció d'aïllament. Durant el dia es desinflen, no ocasionant, per tant, pèrdues de lluminositat apreciables.

Un dels desenvolupaments més recents ha estat realitzat a la Universitat de Cornell (EUA) i consisteix en una cortina de quatre capes d'un material aluminitzat anomenat Foylon, que proporciona una resistència tèrmica de $1,5 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{kW}$.

Entre els avantatges de les pantalles tèrmiques cal destacar:

- *L'estalvi d'energia obtingut durant el període en què les pèrdues són més grans, o sigui de nit. Els consums de calefacció nocturns representen del 70 al 80% dels consums totals.*
- *Les mínimes pèrdues de llum existents de l'ordre del 5% per a una instal·lació ben feta.*
- *La reducció del volum a calefactar.*
- *Actualment, es poden utilitzar materials molt eficients per reduir les pèrdues per radiació. Així, les pantalles aluminitzades són interessants per a regions amb preponderància de cels clars.*
- *Es pot automatitzar amb rellotge o cèl·lula fotoelèctrica l'obertura i tancament de les pantalles.*

Entre els inconvenients cal esmentar:

- *L'estalvi d'energia tan sols es produeix de nit, quan la pantalla està posada.*
- *La pantalla i el seu mecanisme representen una inversió addicional a recuperar de l'estalvi produït.*
- *En ésser el volum reduït, l'aire està confinat.*
- *En cas d'avaria, la calefacció ha de proporcionar la potència necessària per garantir el manteniment del cultiu. El càlcul de la calefacció ha de considerar aquesta possibilitat.*
- *Les pantalles poden donar problemes de goteig.*
- *L'obertura de les pantalles pel matí provoca l'arribada d'aire fred. Es pot obrir progressivament i escalfar per homogeneïtzar les temperatures. També es pot utilitzar una pantalla doble: opaca i transparent.*

La pantalla tèrmica mòbil és, en general, una bona solució en hivernacles alts, lliures d'equipaments. És sobretot interessant en regions de vent fort i cel clar, constituint un bon compromís entre l'estalvi d'energia i la pèrdua de lluminositat.

CAPÍTOL 6. SISTEMES DE CALEFACCIÓ D'HIVERNACLES

6. SISTEMES DE CALEFACCIÓ D'HIVERNACLES

6.1 Introducció

Els sistemes de calefacció d'hivernacles es poden classificar de diferents maneres segons que es consideri la seva font de calor, la manera de transmetre-la o distribuir-la, etc.

D'acord amb la font de calor que utilitzen, tenim:

- sistemes convencionals
- sistemes d'aprofitament de recursos locals
- sistemes d'aprofitament de l'energia solar

segons la manera de transmetre la calor:

- sistemes de convecció
- sistemes de radiació
- sistemes de conducció

També es pot considerar que hi ha sistemes centralitzats o separats, o fins i tot sistemes que escalfen tota la massa d'aire, i d'altres més localitzats que pretenen escalfar solament la planta i el seu entorn.

Finalment, d'acord amb el lloc d'emplaçament dels distribuïdors o emissors, es pot parlar de conductes aeris centrals, calefacció perimetral i calefacció sobre terra o sota terra.

A la comarca del Maresme, la superfície calefactada hi representa el 10,3 % del total d'estructures productives existents (vegeu taula 3.1). Per a orientacions productives la planta ornamental i la flor tallada representen el 64 % i 34 % respectivament d'aquestes superfícies calefaccionades. L'hi-

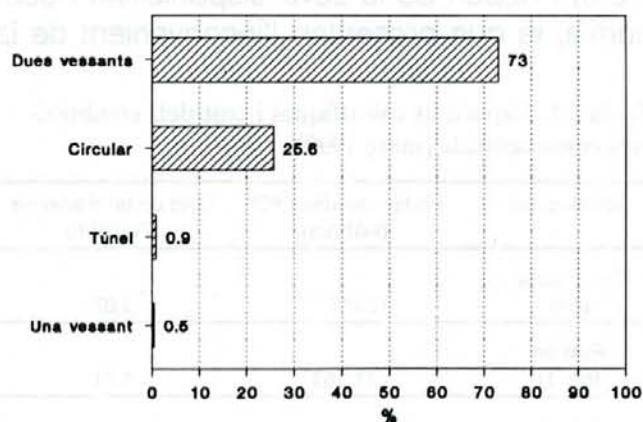
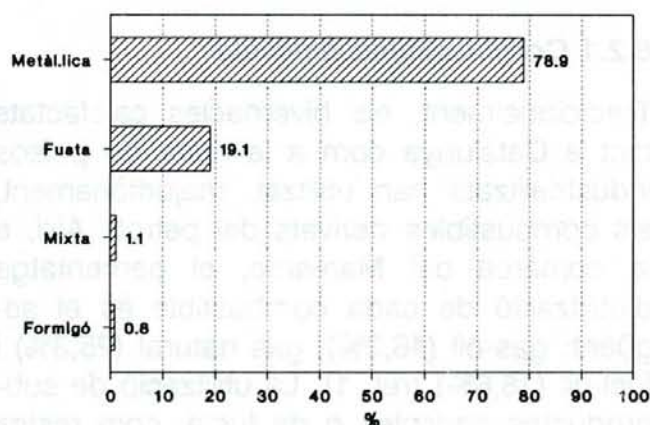
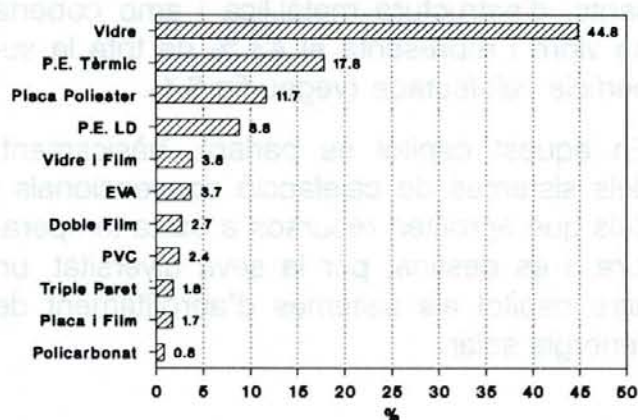


Fig. 6.1. Distribució percentual de la superfície protegida segons els materials de coberta, i d'estructura i la forma dels hivernacles calefactats al Maresme (ref. 1).

vernacle calent característic és a dos vessants, d'estructura metàl·lica i amb coberta de vidre i representa el 43 % de tota la superfície calefactada (vegeu fig 6.1).

En aquest capítol es parlarà, bàsicament, dels sistemes de calefacció convencionals i dels que aprofiten recursos a baixa temperatura, i es destina, per la seva diversitat, un altre capítol als sistemes d'aprofitament de l'energia solar.

6.2 Sistemes convencionals

6.2.1 Combustibles emprats

Tradicionalment, els hivernacles calefactats tant a Catalunya com a la resta de països industrialitzats han utilitzat, majoritàriament, els combustibles derivats del petroli. Així, a la comarca del Maresme, el percentatge d'utilització de cada combustible és el següent: gas-oil (46,2%), gas natural (25,3%) i fuel-oil (18,6%) (ref. 1). La utilització de subproductes agrícoles o de fusta, com restes de poda, és molt més baixa (de l'ordre del 9,8%) i depèn de la seva disponibilitat i economia, ja que presenten l'inconvenient de la

Taula 6.1. Capacitats calorífiques i cost dels combustibles convencionals (març 1990).

Combustible	Poder calorífic (PCI) (kWh/kg)	Cost unitat d'energia (Pta/kWh)
Gas natural (C3)	10.859 ⁽¹⁾	3,07
Fuel oil (no. 1)	11.163	1,71
Gas oil (tipus c)	11.628	4,07
Gasos líquids del petroli	13.012	3,16
⁽¹⁾ (kWh/m ³)		

seva baixa potència calorífica, dificultat de manipulació i emmagatzematge, producció de fums, etc.

L'altra font convencional de calor pot ser l'electricitat, que s'utilitza molt poc (tan sols es coneixen alguns casos d'instal·lacions amb cable elèctric) per raó del seu cost de funcionament elevat, encara que presenta certs avantatges tècnics i que el cost d'instal·lació és econòmic.

A la taula 6.1, s'hi mostren les capacitats calorífiques i el cost dels combustibles i fonts de calor convencionals esmentats.

6.2.2 Sistemes de convecció

Es fonamenten en la creació d'un corrent d'aire calent en l'hivernacle que transmet la calor a tot el recinte. La circulació d'aire pot ser natural o forçada per un ventilador.

Els sistemes de convecció més coneguts són les estufes de combustió, els generadors d'aire calent de combustió directa amb bescanviador de calor o sense i els atermos, que poden funcionar amb aigua o electricitat.

6.2.2.1 Equips

Les estufes són aparells que produeixen un moviment natural de l'aire que les envolta. De fet, no es pot considerar que siguin estrictament aparells de convecció, atès que les parets de la mateixa estufa irradien gran quantitat de calor. Poden utilitzar combustibles sòlids (carbó, fusta, etc.) o líquids (gas-oil, petroli), i els cal una xemeneia que expulsi els gasos de combustió a l'exterior. La potència calorífica de les estufes existents al mercat oscil·la entre les 25.000 i 45.000

kcal/h. Cal remarcar que van ésser utilitzades sobretot antigament, encara que puguin existir actualment algunes com a sistema antigelades.

Els veritables convectors són els generadors d'aire calent, que poden ser amb bescanviador de calor o sense, i els aeroterms. Els generadors d'aire calent de combustió directa (sense bescanviador de calor) consten d'una unitat calefactora i d'una unitat de ventilació que llença a l'ambient de l'hivernacle un raig d'aire calent mesclat amb els residus de la combustió. Quan el combustible és propà o, millor encara, gas natural, els gasos de combustió solament contenen CO₂ i vapor d'aigua, que poden ser beneficiosos quan la calefacció funciona durant el procés fotosintètic, o sigui durant el dia. La utilització de combustibles líquids ha d'estar, en canvi, molt ben regulada. En qualsevol cas, és recomanable que la presa d'aire sigui exterior.

Els generadors d'aire calent amb bescanviador de calor consten de les següents parts:

- cremador, on es produeix la combustió
- cambra de combustió amb xemeneia per a la sortida de gasos
- bescanviador de calor amb aletes, que envolta la cambra de combustió
- ventilador, que fa circular l'aire extraient-lo de l'exterior o de l'interior de l'hivernacle
- sortida d'aire calent mitjançant deflectors, per dirigir l'aire en una o diverses direccions, o per distribuir-lo amb un conducte

Els aeroterms es diferencien dels generadors d'aire calent en què la calor no s'hi produeix per combustió d'un líquid o gas, sinó que s'obté mitjançant un radiador per on circula un fluid calent (aigua, vapor, etc).

Consten de les parts següents:

- radiador o bescanviador de calor de molta superfície (aletejat), per on circula el fluid escalfat a la caldera
- ventilador, que impulsa un corrent d'aire a través del radiador
- deflectors, que dirigeixen el corrent d'aire

Finalment, cal esmentar -encara que no sigui normalment utilitzada en hivernacles a causa del seu alt cost d'adquisició- la calefacció elèctrica per acumulació nocturna de calor en materials refractaris, que es descarrega mitjançant uns ventiladors.

6.2.2.2 Avantatges i inconvenients

Els avantatges de la calefacció per aire calent són:

- Baixa inèrcia tèrmica, cosa que permet una gran velocitat de resposta (l'aire adquireix ràpidament la temperatura desitjada).
- Moderat cost d'instal·lació.
- Pel fet de no precisar de conduccions a nivell del terra, pràcticament no interfereix les tasques de cultiu en l'hivernacle. Els aeroterms i els generadors d'aire calent de tipus lleuger es poden col·locar penjats de l'estructura.
- Les condensacions produïdes en les parets de l'hivernacle es poden eliminar fàcilment a causa de la turbulència de l'aire calent impulsat.

Els inconvenients són:

- La temperatura del vegetal és inferior a la de l'aire, existint, doncs, el perill de condensació sobre el mateix, encara que reduït pel moviment d'aire.
- La pèrdua de calor a través de les parets augmenta pels fenòmens de convecció (el moviment de l'aire fa augmentar el coeficient global de transmissió de calor K).
- Deficient distribució de la calor en l'hivernacle, que fa necessària la instal·lació de conduccions

que canalitzin l'aire calent a tots els racons de l'hivernacle.

- Per tal d'evitar accidents en els cultius (a causa de possibles aturades) és més convenient la instal·lació de diversos generadors de petita potència que la d'un gran generador. Això implica un cost d'inversió més elevat de la instal·lació de calefacció.
- En el cas d'un funcionament perllongat, el nivell higromètric de l'aire pot baixar dràsticament.
- En cas d'avaría, a causa de la seva poca inèrcia tèrmica, la temperatura de l'hivernacle baixa ràpidament.

A la taula 6.2 s'hi observa que un 39,1% d'hivernacles calefactats del Maresme utilitzen sistemes per convecció (tub aeri, aroterms i generadors) com a únic dispositiu de calefacció. Un 21,4% es combinen amb sistemes per conducció.

Taula 6.2. Distribució en percentatge dels sistemes de calefacció emprats al Maresme (ref. 1).

Superfície	%
Tub corrugat enterrat	28,8
Tub aeri	14,8
Aeroterms	11,6
Generador	10,8
Tub llis enterrat	10,7
Aeroterms + llis enterrat	7,5
Generador + corrugat enterrat	6,4
Tub aeri + llis enterrat	4,9
Tub aeri + generador	1,9
Tub aeri + corrugat enterrat	1,6
Aeroterms + corrugat enterrat	1,0
TOTAL	100

6.2.2.3 Distribució de l'aire calent

Per tal de millorar l'eficiència de la calefacció per aire calent, és necessari recórrer a sistemes de distribució de l'aire calent que reparteixin la calor homogèniament per tot l'hivernacle. D'aquesta manera, s'evita la irregularitat existent amb una sola sortida que provoca una excessiva temperatura a prop del raig d'aire, baixes temperatures en els llocs més allunyats i pèrdues de calor en les parets per la turbulència de l'aire calent.

En el cas de sistemes centralitzats de producció d'aire calent, és convenient d'utilitzar longitudinalment, i a una alçada de 2 m, conductes de polietilè d'uns 30 o 40 cms de diàmetre, perforats (20 mm) cada 30 a 90 cms, segons que la distància del generador sigui més llarga o més curta. Normalment és suficient amb un tub quan l'amplada de l'hivernacle és inferior a 9 m, i se'n utilitzen dos o més a una distancia mínima de 5 m quan les amplades són superiors. El tub es dissenya per disposar d'una velocitat d'aire a l'entrada de 5 m/s i a la sortida de 3 m/s. El cabal d'aire a circular per obtenir una bona distribució de temperatures és de 1/4 a 1/3 el volum d'aire de l'hivernacle per minut i la millor distribució s'obté per a longituds de 30 m essent recomanable no excedir dels 80 m.

A la taula 6.3 s'hi mostren els resultats obtinguts en la distribució d'aire d'un hivernacle de 45 m de longitud que disposa d'un conducte amb 4 i 16 orificis en els primers i darrers 2 metres, que totalitzen 418 orificis per tub.

En el cas d'utilitzar aroterms, és més recomanable descarregar horitzontalment que verticalment per uniformar temperatures. En el cas d'hivernacles de menys de 20 m de

llarg, s'han d'utilitzar dos aerotermes localitzats en cantonades oposades i descarregar paral·lelament als costats. Quan l'hivernacle té una longitud d'entre 20 i 40 m, és recomanable utilitzar dos ventiladors o aerotermes addicionals, situats un a cada costat al mig de l'hivernacle, per tal d'ajudar en el desenvolupament d'una circulació d'aire horitzontal.

En els hivernacles multicapella és convenient baixar l'aire d'una capella i portar-lo a una altra, mitjançant la utilització de ventiladors de gran diàmetre.

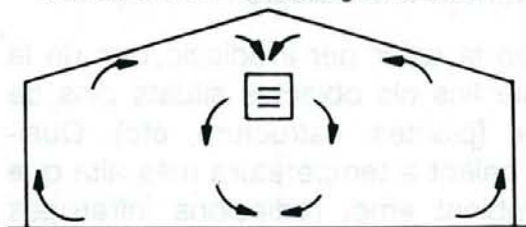
En hivernacles d'una capella, és també convenient utilitzar ventiladors situats a 1/4 d'amplada dels costats per tal de moure l'aire paral·lelament a aquests i millorar-ne la distribució. Els ventiladors han d'anar muntats perpendicularment al terra, a una alçada de 0,5 a 1 m sobre les plantes, i disposar d'una velocitat sobre elles inferior als 80 m/min; amb un cabal de 0,9 a 1,1 m³/min per metre quadrat d'hivernacle.

A la figura 6.2 s'hi mostren les diverses maneres de distribució de l'aire segons el tipus de sistema emprat.

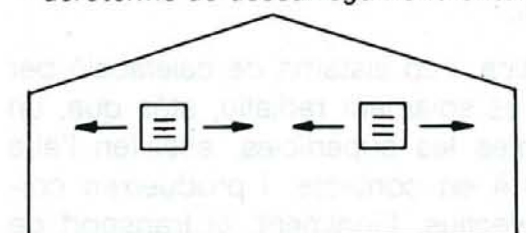
Taula 6.3. Resultats obtinguts en la distribució d'aire d'un hivernacle de 45 m de llarg (ref. 17).

	sense conducte	amb conducte
Velocitat corrent d'aire (m/s):	0,75-1	lleugera-corrent
Gradient longitudinal de temperatura (°C):	4-7	0,4-1,2
Gradient vertical de temperatura (°C):	5-8	1
Gradient d'humitat relativa (%):	5-8	2

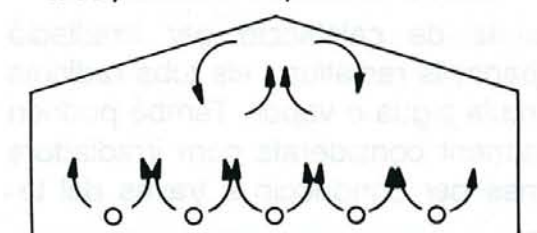
- aerotermes de descàrrega vertical



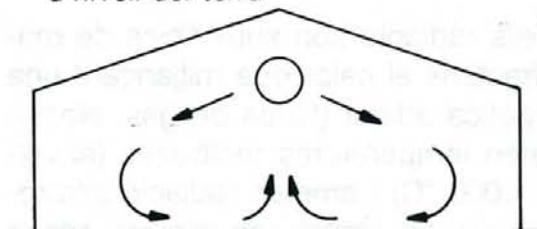
- aerotermes de descàrrega horitzontal



- tubs perforats de polietilè elevats



- tubs perforats de polietilè situats a nivell del terra



- sistema de calefacció en paret lateral i sistema de recirculació

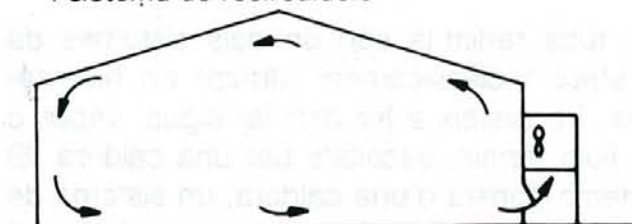


Fig.6.2. Diferents maneres de distribució de l'aire segons el tipus de sistema emprat.

6.2.3 Sistemes d'irradiació

Transmeten la calor per irradiació des de la font calenta fins als objectes situats dins de l'hivernacle (plantes, estructura, etc). Qualsevol cos calent a temperatura més alta que la de l'ambient emet radiacions infraroges de gran longitud d'ona. Aquestes radiacions escalfen qualsevol superfície sobre la qual incideixen.

A la pràctica, cap sistema de calefacció per irradiació és solament radiatiu, atès que, un cop calentes les superfícies, escalfen l'aire que hi està en contacte, i produeixen corrents convectius. Finalment, el transport de calor dins de l'hivernacle serà mixt: radiació i convecció natural.

Els sistemes de calefacció per irradiació són: els panells radiatius i els tubs radiants per on circula aigua o vapor. També podrien ser parcialment considerats com irradiadors els sistemes per conducció a través del terra.

6.2.3.1 Equips

Els panells radiants són superfícies de materials refractaris al calor que mitjançant una font energètica adient (flama de gas, electricitat) agafen temperatures molt altes (al voltant dels 1.000 °C) i emeten radiació infraroja. El seu ús és limitat; en alguns casos s'empren exclusivament com a sistema anti-gelades.

Els tubs radiants són un dels sistemes de calefacció clàssicament utilitzats en hivernacles. Consisteix a fer circular aigua, vapor o un fluid tèrmic, escalfats per una caldera. El sistema consta d'una caldera, un sistema de distribució, bombes i altres accessoris.

La caldera consta d'una sèrie de tubs per on circula l'aigua, que s'escalfa amb els gasos de combustió a una temperatura de 80-90 °C. En instal·lacions antigues s'utilitzava vapor d'aigua i era molt deficient el repartiment de la calor dins dels tubs. Altres sistemes, encara que no utilitzats pel seu preu alt, són els fluids tèrmics, poc volàtils, estables i amb una elevada calor específica.

6.2.3.2 Avantatges i inconvenients

Els avantatges de la calefacció per radiació són:

- La radiació d'infrarojos escalfa solament els objectes sobre els quals incideix: vegetals, terra, etc. i no l'aire. D'aquesta manera la temperatura de les plantes és més elevada que la de l'aire, i, per tant, no produeixen condensacions indesitjables sobre elles.
- Es pot obtenir una temperatura bastant uniforme dins de l'hivernacle sempre que la distribució dels tubs sigui l'adient. Aquesta temperatura es pot regular amb certa facilitat actuant sobre diversos circuits independents separats per vàlvules, variant la velocitat de l'aigua dins dels tubs i mesclant el fluid del circuit d'anada amb el de retorn.
- Després d'aturar-se la caldera, l'ambient temperat es manté durant un cert temps, a causa de la gran inèrcia tèrmica de la instal·lació.
- L'ambient no es reseca gaire per la feble component convectiva existent.

Els inconvenients de la calefacció per radiació són:

- Elevat cost d'instal·lació sobretot pel que fa a canonades i accessoris.
- Quan els tubs estan a un nivell baix, poden molestar en els treballs a realitzar dins de l'hivernacle.
- Quan els tubs van instal·lats en la part alta o perimetralment, poden ombregar els cultius.
- La gran inèrcia tèrmica implica certa lentitud de resposta.

6.2.3.3 Distribució

Normalment la distribució de l'aigua calenta es realitza per una xarxa de conductes d'acer de diàmetre variable. Antigament, l'aigua calenta circulava per termosifó aprofitant la diferència de temperatures. Actualment, es col·loca una bomba que força a circular l'aigua, per la qual cosa el diàmetre de canonades pot ser més estret ja que la pèrdua de càrrega no té la importància que presenta en el cas dels sistemes per termosifó. La col·locació dels tubs és variable d'acord amb la instal·lació i el cultiu a què estigui destinat l'hivernacle. La calefacció perimetral és interessant perquè actua com una barrera al fred. Altres conduccions poden seguir la línia de pilars de l'estructura de l'hivernacle i, finalment, la resta es poden col·locar a diferents alçades segons el tipus de cultiu, com a mínim a 30 cm de la seva part més alta, o també sota les bancaes en el cas d'utilitzar-les.

La longitud total de les canonades es determina a partir de les necessitats de calefacció, fluid termòfor i característiques dels conductes.

Els hivernacles d'amplada inferior als 8,5 m poden ser calefaccionats amb conductes col·locats al llarg del perímetre. Per hivernacles d'amplada superior als 8,5 m es dimensionen els conductes perimetrals d'acord amb les pèrdues de calor de les parets i la resta de tubs es calcula sobre la base de les pèrdues de calor a través del sostre. La circulació natural d'aire que s'indueix proporciona, generalment, temperatures uniformes a l'alçada de les plantes. En cas d'utilitzar ventiladors, s'han d'instal·lar per tal d'ajudar els fluxos convectius naturalment induïts. El dimensionat dels conductes per on es distribueix l'aigua calenta es realitza a

partir del coneixement de les temperatures d'entrada i sortida de l'aigua, temperatura de consigna interior de l'hivernacle i potència real de les necessitats de calefacció de l'hivernacle. Els mètodes de càlcul que es poden aplicar es troben en el llibre *Invernaderos: Diseño, construcción y ambientación* (ref. 5).

6.2.4 Sistemes per conducció

S'utilitzen solament en la calefacció del terra, atès que és l'única manera d'escalfar-lo a una certa fondària. En realitat, el terra no pot ser considerat com un sòlid continu, perquè conté porositats d'aire o aigua. La calor no es transmetrà, per tant, totalment per conducció: un petit percentatge ho farà per convecció. Per una altra banda, si la superfície del terra escalfat està a temperatura més alta que l'aire ambient i que el cobriment que l'envolta, es produirà una transmissió de calor combinada per radiació i convecció.

El tipus de terra influeix en la facilitat per escalfar-lo; un terra sorrenc és sempre més calent que un terra argilós, i un terra humit s'escalfa i refreda més lentament que un terra sec. Així, la calor específica d'un terra amb el 22% d'humitat és de $500 \text{ kcal/m}^3 / ^\circ\text{C}$ i el d'un terra amb el 10% d'humitat és de $380 \text{ kcal/m}^3 / ^\circ\text{C}$.

Els sistemes que s'utilitzen per escalfar el terra són: la calefacció elèctrica i la calefacció amb un fluid calent.

En el primer cas s'utilitza el cable elèctric, que disposa d'una potència de 20 W/m , encara que el seu ús està normalment restringit a planters o hivernacles petits, perquè el seu cost de funcionament és elevat i la potència a instal·lar i contractar és alta. De tota

manera, cal considerar que el seu cost d'instal·lació és relativament econòmic i que, atès que una gran proporció de les necessitats de calefacció es produeix a hores de tarifa reduïda, la seva instal·lació pot ser atractiva en segons quins casos.

La calefacció per fluid calent normalment utilitza aigua, que circula a baixa temperatura (35 °C) dins de tubs de P.V.C. o copolímer de polipropilè, situats a 35 cm de fondària i separats uns 50 cms. aproximadament. Aquest tipus de calefacció, encara que pot funcionar amb els combustibles convencionals constituint un sistema idoni d'estalvi d'energia, és quasi obligatori quan es tracta d'aprofitar recursos locals a baixa temperatura.

En el cas d'utilitzar fonts d'energia convencionals com els combustibles líquids derivats del petroli, s'ha de mesclar l'aigua del circuit d'anada amb la de retorn per calefactar a baixa temperatura. Si el combustible és gas, també es pot utilitzar un sistema de combustió submergida. Finalment, en el cas de l'electricitat, es pot aplicar la bomba de calor.

Per la seva importància, la calefacció a baixa temperatura del terra de l'hivernacle s'ha tractat conjuntament amb altres tipus d'emissors a l'apartat 6.3.

6.2.5 Regulació del sistema de calefacció

La regulació clàssica emprada en un sistema de calefacció és la de **"tot o res"**, que utilitza un termòstat de dues temperatures de consigna, una mínima que engega la calefacció actuant sobre la bomba de circulació i una altra màxima que l'atura.

Si aquestes dues temperatures són molt semblants, el sistema s'engega i atura massa sovint. La major part dels termòstats actuals disposen d'un diferencial que evita aquest problema. En instal·lacions que disposen de diverses zones de cultiu que s'hagin de regular independentment, els termòstats hauran d'actuar sobre vàlvules motoritzades tot o res que independitzen cada circuit.

En el cas d'utilitzar sistemes de calefacció localitzats sota el terra de l'hivernacle, és important regular molt bé la temperatura de l'aigua circulant perquè no sigui massa alta i pugui afectar les arrels del cultiu. Aquesta regulació s'aconsegueix mesclant l'aigua d'anada amb la de retorn, mitjançant la utilització d'una vàlvula mescladora i un regulador proporcional.

La regulació per termòstat ambient interior pot estar complementada amb un termòstat exterior que actua suplementàriament quan es detecta una baixada de la temperatura exterior.

6.2.6 Millores de la instal·lació de calefacció

La majoria de les instal·lacions actuals d'escalfament d'hivernacles funcionen amb combustibles fòssils. Per reduir el consum de combustible és convenient:

- *escollir una instal·lació de calefacció adaptada a les necessitats*
- *regular bé el seu funcionament i supervisar-la*
- *mantenir-la en bon estat i, si és possible, augmentar el seu rendiment*

D'entre les possibles actuacions a realitzar sobre els equips de calefacció abans esmentats, tenim:

- *Recuperació de la calor dels fums mitjançant un bescanviador. L'experiència realitzada en una caldera de 2.000 tèrmies/h de potència, escalfant el terra amb la calor recuperada, va permetre baixar 3°C la temperatura de consigna ambient de l'hivernacle.*

- *Millorar la funcionalitat de la distribució d'aigua calenta, mitjançant l'aïllament dels conductes entre l'hivernacle i la caldera quan aquesta està a l'exterior i millorant la difusió de la calor cap al cultiu utilitzant un film reflectant (alumini) sobre la part superior dels conductes (vegeu fig. 6.3).*

Altres millores en la xarxa de distribució d'aigua calenta són:

- *Apropar els conductes a les plantes utilitzant un circuit secundari mòbil mitjançant unions flexibles o de muntatge ràpid sobre un circuit de distribució primari.*

- *Disminuir la longitud dels conductes que poden ombrejar els cultius, augmentant la temperatura del fluid circulant o, millor encara, complementant la instal·lació amb aerotèrms.*

- *Utilitzar complementàriament un sistema localitzat de calefacció per terra. Les experiències realitza-*

des en aquest sentit han permès baixar, com a mínim, 2 °C la temperatura ambient de l'hivernacle i aconseguir un estalvi de combustible del 10 al 15%.

- *Disposar d'una xarxa de tubs sota les bancades de cultiu, bé sigui en un doble fons aïllat o en un substrat (sorra, terra, etc.) sobre el qual es col·loquen les plantes.*

- *Millorar la distribució d'aire calent impulsat, tal com s'ha esmentat abans, permet d'obtenir un estalvi del 10 al 25% amb l'avantatge addicional de no ressecar tant l'ambient com quan s'utilitza un sol raig d'aire impulsat.*

- *Controlar el clima de l'hivernacle amb un sistema de regulació que permeti governar i harmonitzar la posada en marxa de la calefacció, la ventilació, etc., en el moment que calgui per tal d'evitar pèrdues de calor. Perquè la regulació compleixi el seu paper és important que el funcionament dels diversos elements del sistema de calefacció sigui modulable.*

Quan la regulació utilitza un termòstat absolut (tot o res), la instal·lació d'un rellotge permet fixar una temperatura de dia i una temperatura de nit. D'aquesta manera es pot disminuir el consum de combustible durant la nit sense haver d'intervenir manualment.

Una altra possibilitat de disminuir el consum de combustible en el cas que es disposi d'una forta inèrcia tèrmica interior és augmentar el diferencial entre l'engegada i l'aturada per tal de minvar el nombre de posades en marxa de la instal·lació de calefacció.

Altres possibilitats per reduir les necessitats de calor en un hivernacle són:

** Abaixar la temperatura durant la nit.*

Durant la nit, el procés fotosintètic s'atura i la necessitat de calor disminueix, perquè no cal garantir l'òptim biològic sinó el mínim biològic. Com s'ha esmentat, una de les formes d'actuar sobre el termòstat de regulació pot ser mitjançant un rellotge. Una altra forma pot ser amb cel·lula fotoelèctrica.

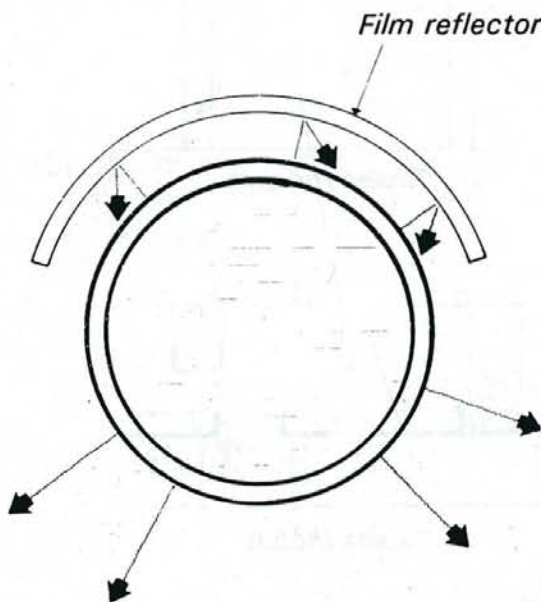


Fig. 6.3. Utilitat d'un film reflector.

*** Utilitzar tècniques de cultiu simples.**

En un mateix hivernacle és important cultivar en la mesura de lo possible material vegetal que tingui sensiblement les mateixes necessitats és a dir compartimentar o zonificar el menys possible.

El nivell d'ocupació és també molt important ja que una mínima ocupació redueix els costos del combustible per vegetal produït. En aquest sentit s'han d'evitar els espais buits, els temps morts entre dos cultius i jugar amb la densitat de cultiu.

Una atmosfera massa humida demana un increment de la calefacció que es pot atenuar per la utilització de :

- un film plàstic col·locat sobre el terra que redueix l'evaporació i, per tant, la humitat de l'aire.
- la irrigació a nivell baix que impedeix humidificar massa l'atmosfera.

Una altra tècnica permet la utilització de petits túnels sobre el cultiu que com s'ha esmentat abans poden ser útils com antigelades en hivernacles freds.

En hivernacles calents aquests túnels permeten baixar la temperatura ambient de l'hivernacle i arribar a obtenir una diferència de temperatura respecte a l'entorn de la planta de l'ordre dels 3 °C. És important que aquests túnels s'aïegin bé i s'utilitzi preferentment un film impermeable a l'infraroig llunyà com el PVC, PE tèrmic i el EVA.

Finalment en relació al nivell d'ocupació de l'hivernacle abans esmentat és important la disposició de les safates de cultiu, sobretot utilitzades en la horticultura ornamental.

La utilització de safates de cultiu permet economitzar energia a nivell de la calefacció que pot ser adaptada especialment en aquest sistema i reduir els espais de circulació improductius. El sistema més interessant és el de safates rodants que consisteix a suprimir els passadissos permanents excepte en un dels costats gràcies a unes safates que poden ser desplaçades deixant solament un passadís cada vegada.

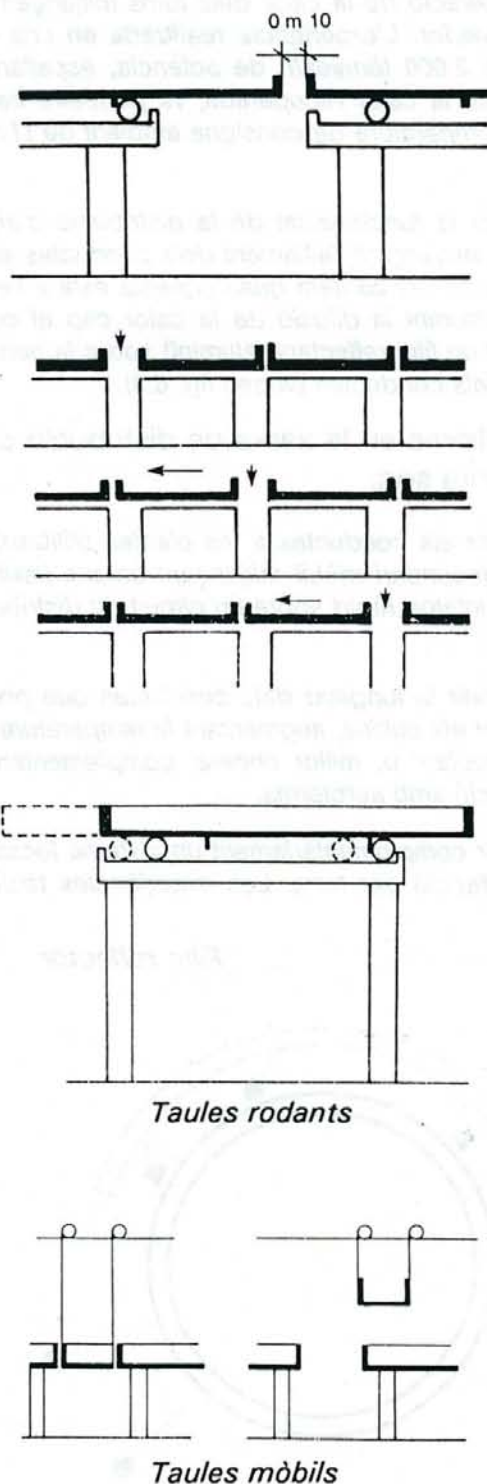


Fig. 6.4. Safates de cultiu mòbils.

6.3 Aprofitament de recursos a baixa temperatura

6.3.1 Introducció

L'aprofitament de recursos a baixa temperatura, entre els 20 °C i els 50 °C, és molt interessant perquè el seu cost és més baix en relació al dels combustibles fòssils convencionals, encara que depèn de la seva disponibilitat ja que es tracta de recursos molt localitzats.

Els més utilitzats són:

- fonts geotèrmiques
- efluent industrial o excedents de calor de plantes termoelèctriques

L'aprofitament energètic de l'energia solar, encara que es tracti d'una font a baixa temperatura, no és un recurs localitzat. Per la seva importància i diversitat tecnològica serà tractada en el capítol següent.

6.3.2 Avantatges i inconvenients dels sistemes a baixa temperatura

La disponibilitat d'aquests recursos ha donat pas al desenvolupament de bescanviadors de calor dissenyats adientment per escalfar hivernacles a baixa temperatura. Independentment del fet que els recursos a baixa temperatura siguin més econòmics que els convencionals, els principals avantatges dels sistemes que treballen a baixa temperatura són:

- Els tubs d'escalfament poden estar a prop del cultiu sense el perill de danyar-lo. D'aquesta manera, l'ambient pròxim al cultiu pot estar millor controlat.
- El risc de malalties per fongs o bacteries estarà reduït (temperatura més alta de la superfície de cultiu).

- Les pèrdues de calor per radiació a través de la coberta són més petites.

- El material dels conductes pot ser de plàstic, en lloc de metall, essent el seu preu més econòmic.

- És possible escalfar independentment la zona de les arrels (o el substrat).

Però s'han d'esmentar alguns desavantatges i limitacions:

- Atès que la diferència de temperatures entre l'aire i l'aigua és petita, és necessari disposar d'una gran superfície de bescanvi. Aquesta gran superfície pot ser un problema i un obstacle per treballar i moure's lliurement dins de l'hivernacle.

- L'evapotranspiració nocturna (terra i cultiu) pot ser superior a la dels sistemes convencionals, augmentant els nivells d'humitat de l'aire.

6.3.3 Distribució de la calor a baixa temperatura

Des d'un punt de vista tècnic, els sistemes de calefacció a baixa temperatura es poden classificar de cinc maneres:

1. Sistemes amb bescanviadors dins del terra (o terra tèrmic), com són els tubs soterrats o els terres de ciment tèrmics: escalfen el terra o el substrat que, alhora, escalfen l'aire.
2. Sistemes amb bescanviadors directament col·locats sobre la superfície del terra o de les bancades: escalfen l'aire i el terra, principalment els deu primers centímetres d'aire i terra.
3. Conductes aeris prop del terra o de les bancades o a diferents nivells dins de la zona de cultiu: escalfen essencialment la part aèria del cultiu; però si estan a prop del terra, també tenen una significativa influència sobre la seva temperatura.
4. Convectors d'aire forçat que impulsen aire calent dins de l'hivernacle, sovint a través de tubs de plàstics perforats col·locats sobre el terra entre filetes de cultius. Escalfen primerament l'aire que, al seu temps, escalfa les superfícies. Generalment amb aquest sistema, en ser més baixa la tempera-

tura superficial que la de l'aire, es dona el fenomen de les condensacions.

5. *Combinació de dos dels sistemes abans esmentats, com, per exemple, els sistemes 1 i 4 o 2 i 4 poden anar associats.*

Actualment la tendència és utilitzar dos sistemes diferents: el primer (o sistema d'escalfament de base) es destina al control de la temperatura del terra o substrat (sistemes 1 o 2); el segon (o sistema d'escalfament punta) es dedica al control de la temperatura de l'aire i a subministrar calor a demandes punta (sistemes 3 o 4).

6.3.4 Aprofitament de l'energia geotèrmica per escalfar hivernacles

L'energia geotèrmica és la calor interna de la Terra que es manifesta per l'increment de temperatura que s'observa en les perforacions que s'endinsen en l'escorça (mines, pous, etc.). Quan aquesta energia és susceptible d'ésser aprofitada per l'home en termes econòmics, es parlarà de recurs geotèrmic. Aquest recurs, pot ser extret del jaciment mitjançant tècniques de prospecció, perforació i aprofitament.

Els jaciments geotèrmics poden ser d'alta (150 °C en amunt), de mitjana (entre 100 i 150 °C) i de baixa entalpia (inferior als 100°C).

El creixement mundial dels aprofitaments de l'energia geotèrmica de baixa entalpia (utilització d'aigua per a calefaccionar) presenta un ritme més ràpid que el d'alta entalpia (per a producció d'electricitat) a causa de la seva localització molt més estesa. Així, el 1975 eren 3.100 els MW (tèrmics) instal·lats, dels quals 500 MW corresponien a hivernacles. El creixement durant els últims deu anys ha estat del 16% anual, de manera que la potència el 1985 era de 13.272 MW (tèrmics).

Catalunya presenta unes perspectives geotèrmiques molt favorables, tal com ho mostren les nombroses manifestacions termals existents.

Malgrat això, no hi ha, de moment, experiències quant a l'aprofitament geotèrmic per escalfar hivernacles, encara que s'estan iniciant en aquest sentit alguns estudis de viabilitat i projectes. Sí que se'n coneixen, en canvi, experiències en alguns països com Hongria, Japó, França, EUA, URSS, Israel, etc.

La utilització d'aigua geotèrmica en la regió d'Arava, Israel, (ref. 19), que disposa d'unes temperatures mínimes exteriors durant la nit de 3 a 7 °C ha permès de mantenir unes temperatures interiors de 10 a 12 °C amb un flux d'aigua de 3,5-5 l/m² hr durant 12-14 hores per la nit. El salt tèrmic ha estat de l'ordre dels 30 °C (60-30°C) i l'aigua de sortida es descarrega en un dipòsit per irrigar.



Fig. 6.5. Ubicació a Catalunya dels projectes de demostració d'energia geotèrmica.

Altres possibilitats d'aprofitament d'aquesta energia excedentària a 30°C són:

- Escalfament de planters.
- Escalfament de plantes d'espàrec.
- Escalfament d'estanys per a la cria de peixos.

El sistema de distribució de la calor utilitzat inicialment consistia en una sèrie de tubs d'irrigació de polietilè de 16 mm de diàmetre instal·lats per sobre dels llits de cultiu. L'aigua circula en circuit tancat sota una pressió de 10 a 20 m columna d'aigua, a través dels tubs col·locats per sobre o per sota dels llits de cultiu per ser transferida a un dipòsit i utilitzada finalment per regar.

El pas següent va ser el desenvolupament d'un sistema més senzill i eficient de baix cost que permetés d'utilitzar l'aigua fins a 40°C - 50 °C (ref. 20). Aquests bescanviadors de calor són tubs de polietilè de 0,2-0,3 mm de gruix d'un diàmetre de 100 a 250 mm col·locats de forma semisoterrada sobre el terra de l'hivernacle. L'aigua circula a una pressió baixa de 1 a 2 m columna d'aigua sortint lliurement per l'altre extrem. El cost d'aquests tubs és d'un 10 a 15% respecte als de diàmetre petit.

Entre els avantatges d'aquest sistema cal destacar:

- El gran diàmetre dels tubs permet d'utilitzar aigua amb un alt contingut de sediments sense perill d'obturacions.
- La regulació del flux és senzilla comparada amb un sistema tancat de tubs de petit diàmetre.
- El sistema disposa d'una gran capacitat d'emmagatzematge, i, per tant, és possible l'emmagatzematge d'energia solar. Aquest fenomen d'emmagatzematge i absorció d'energia solar redueix els problemes de sobreescalfament durant el període diürn. Independentment, el sistema és també

menys sensible als errors dels sistemes de bombament.

Per una altra banda, el sistema presenta certes limitacions :

- Les parets primes dels tubs són més sensibles als punxaments.
- Les temperatures altes per sobre de 49 °C poden afectar les plantes i fruits en contacte amb la superfície dels tubs.

Durant l'hivern 1984-85 es va mesurar el comportament tèrmic de 4 tubs de 200 mm de diàmetre col·locats sobre els llits de conreu d'un hivernacle de 400 m² (2 unitats de 6 x 33 m) per on circulava aigua geotermal a 58 °C amb un cabal de 0,45 m³/hora per tub.

Els resultats obtinguts van mostrar que:

- La temperatura interior de l'hivernacle es mantenia per sobre de 12°C quan la temperatura exterior baixava a 4°C.
- La temperatura del terra al voltant de les arrels era de 20 °C.
- La temperatura de l'aigua a la sortida de les mànigues era d'uns 35 °C.

6.3.5 Aprofitament de la calor residual de processos industrials

La idea d'aprofitar la calor produïda en els processos de refredament de centrals per al cultiu agrari va néixer l'any 1916 quan es va provar d'utilitzar la calor dispersada d'un motor a vapor. Posteriorment, l'any 1925, cal remarcar l'experiència realitzada prop de la central elèctrica que funcionava amb turba a Wesmoor (Anglaterra) amb la finalitat d'escalfar cultius de flors en ple camp i en hivernacle. Cal esmentar el projecte "Agroterm", desenvolupat a Alemanya als anys 60, que utilitzava el terreny com a mitjà de refreda-

ment en substitució de la torre normalment emprada. A partir dels anys 70, experiències similars són desenvolupades als E.U.A., França, Anglaterra, Irlanda, Romania, Holanda, Itàlia, etc.

A Catalunya, hi ha en funcionament un hivernacle dedicat al cultiu de planta ornamental que aprofita l'aigua calenta -entre 25 i 35°C- procedent dels generadors de les centrals nuclears d'Ascó.

A part de l'aprofitament de la calor provinent de les centrals termoelèctriques, hi ha processos industrials que disposen de quantitats considerables de calor residual, com, per exemple:

- grans complexos frigorífics industrials
- sector d'acabaments tèxtils
- indústria conservera
- indústries de la pell i el cuir

De tota manera, les experiències més nombroses s'han dut a terme en centrals termoelèctriques, on la calor residual, encara que variable en temperatura d'acord amb el sistema de refredament emprat, pot ser ben explotada en el cultiu protegit a causa de la flexibilitat del seu cicle de producció, en po-

der utilitzar diferents tipus de cultiu, i a la possibilitat de localitzar els hivernacles a prop de les mateixes centrals.

En el procés de producció termodinàmica de l'energia elèctrica, tan sols una part de l'energia continguda en el combustible pot ser convertida en electricitat. L'energia restant, variable en funció del rendiment de la transformació, se cedeix sota la forma d'energia tèrmica a baixa temperatura a l'aigua utilitzada per refredar el condensador. Aquesta energia és de l'ordre de 1.700 kcal/kWh per a les centrals nuclears i de 1.100 kcal/kWh per a les convencionals. El diagrama de flux energètic d'una central termoelèctrica de fuel de 640 MW elèctrics de potència es mostra a la figura 6.6.

El sistema de refredament d'una central termoelèctrica pot ser en circuit obert o tancat. En el primer cas, s'utilitza aigua de l'ambient (mar, riu, llar, etc.). Per a una central de 1.000 MW en la qual es produeix una dispersió cap a l'ambient de 2.000 MW tèrmics es disposarà de 60 m³/s d'aigua amb un increment de temperatura de 8 a 10 °C. En el segon cas, s'utilitzen torres de refrigeració i la temperatura de l'aigua varia de 20 a 40 °C segons el règim de funcionament de la central i la temperatura de l'àrea humida a la base de la torre. La quantitat d'aigua refusada disponible és d'uns 0,5 m³/s per 1.000 MW elèctrics.

L'experiència obtinguda d'un projecte de demostració de la CEE realitzat a Itàlia ha mostrat que els sistemes amb circuit tancat presenten certs avantatges. L'energia estalviada ha estat de l'ordre de les 300 Teps l'any per hectàrea, essent la gerbera el cultiu que en relació als altres experimentats (maduixes, espàrrecs, etc) ha proporcionat uns beneficis econòmics més favorables.

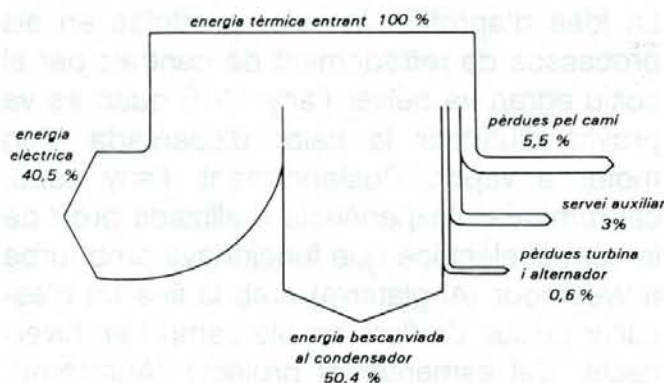


Fig. 6.6. Flux energètic d'una central termoelèctrica.

CAPÍTOL 7. CALEFACCIÓ D'HIVERNACLES AMB ENERGIA SOLAR

7. CALEFACCIÓ D'HIVERNACLES AMB ENERGIA SOLAR

7.1. Introducció

Els hivernacles són antics exemples d'utilització de l'energia solar. La necessitat de calor per protegir les plantes de les gelades i per promoure el seu creixement ha estat coberta durant molts segles mitjançant l'efecte hivernacle característic dels recintes enviadats.

L'energia solar absorbida dins de l'hivernacle durant el dia cobreix una part, o la totalitat, de la calor necessària durant el període diürn si la temperatura exterior és inferior a la interior. Per utilitzar l'energia solar per a l'escalfament de l'hivernacle durant la nit, s'han de resoldre dos problemes:

- La conversió de la radiació solar en calor.
- L'emmagatzematge d'aquesta calor per escalfar durant la nit.

Pel que fa a les aplicacions en hivernacles, la conversió de la radiació solar en calor es pot realitzar de tres formes diferents:

- Captadors solars (d'aire o aigua) separats i col·locats a l'exterior de l'hivernacle.
- Captadors solars integrats en l'estructura mateixa de l'hivernacle.
- El captador solar és el propi hivernacle.

L'emmagatzematge de la calor acostuma a ser a curt termini, o sigui del dia per a la nit, i els materials emprats són tan diversos com la grava, l'aigua, els estanys solars, el terra i els productes de canvi de fase. La grava o els còdols actuen simultàniament com emmagatzematge i bescanviador de calor. Els

altres materials necessiten bescanviadors de calor addicionals.

Per dissenyar un sistema d'emmagatzematge de calor s'han de determinar els aspectes tècnics següents:

- El medi d'emmagatzematge.
- La capacitat d'emmagatzematge en kWh/m³ o kWh/kg.
- La càrrega i descàrrega en energia per unitat de temps.
- L'eficiència o relació entre l'energia utilitzada de l'emmagatzematge i la suma de l'energia introduïda incloent-hi l'electricitat utilitzada per carregar i descarregar.
- L'emplaçament de l'emmagatzematge.
- La configuració de l'emmagatzematge.

Quan es tracta de dissenyar un hivernacle solar és convenient plantejar i evaluar els aspectes següents:

- El concepte de disseny solar.
- Les característiques i dimensions de l'hivernacle i del sistema solar.
- L'energia solar disponible diàriament durant el període de calefacció.
- La proporció d'energia total coberta per l'energia solar.
- El salt tèrmic entre l'interior i l'exterior que es pot aconseguir amb energia solar.
- La rendibilitat econòmica de la solució proposada.

Aquest procés de disseny pot ser iteratiu i requerir l'anàlisi de diverses solucions fins arribar a la més adient.

Les experiències d'utilització de l'energia solar per escalfar hivernacles han estat nombroses, tant en països freds com en països

temperats. En aquest capítol se sintetitzen els aspectes més importants de més de 50 sistemes solars analitzats en un total de 15 països. Un 25% correspon al tipus de captador separat, un altre 25% al de captador integrat, i el 50% restant a l'hivernacle com a captador solar (ref. 21).

7.2. Captadors solars separats

Les instal·lacions analitzades presenten els tres tipus de sistemes següents:

- Sistemes amb circulació d'aigua.
- Sistemes amb circulació d'aire.
- Estanys solars.

Els sistemes de circulació d'aigua es caracteritzen per disposar d'uns captadors plans encarregats de convertir l'energia solar radiant en energia tèrmica, que és transportada mitjançant l'aigua cap a la seva distribució i/o emmagatzematge. Aquest magatzem de calor és, en la majoria de casos, un dipòsit de ciment o metàl·lic més o menys ben aïllat d'acord amb la seva configuració i ubi-

cació. En alguns casos, l'energia solar convertida en calor es distribueix directament al terra de l'hivernacle, on també és parcialment emmagatzemada.

El captador solar pla més estàndard es compon de les parts següents:

- superfície absorbent
- tubs interiors, per on circula l'aigua
- coberta de vidre o plàstic
- material aïllant

En alguns casos, s'han utilitzat captadors sense tubs interiors, en els quals l'aigua baixa per gravetat sobre la superfície absorbent.

El principi de funcionament és, conceptualment, molt senzill: els raigs del sol, en arribar al captador, travessen el vidre i xoquen contra la superfície absorbent, que és pintada de color negre per afavorir el seu comportament absorbent i acostuma a ser metàl·lica per transmetre millor la calor.

L'energia absorbida escalfa la placa negra, la qual transmet la calor cap al fluid que cir-

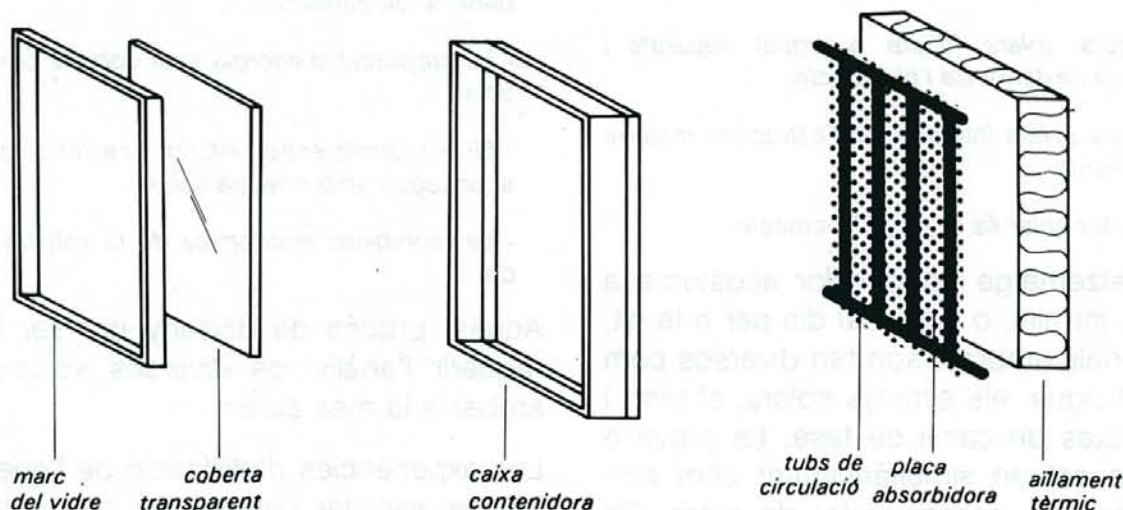


Fig. 7.1. Parts que conformen un captador solar amb circulació d'aigua.

cula pels tubs que s'hi troben en contacte i que és emmagatzemat o utilitzat directament en el lloc de consum. La quantitat d'energia realment transferida al fluid s'anomena **"energia útil del captador"**.

La finalitat de la superfície absorbent és, doncs, captar tanta radiació solar com sigui possible i transmetre-la, posteriorment, en forma d'energia tèrmica, al fluid que circula en contacte amb ella.

Idealment, la superfície absorbent hauria de ser selectiva, disposant d'una alta absorbència a la radiació d'ona curta (radiació solar incident) i d'una baixa emissivitat d'ona llarga. El tractament o la pintura selectiva són cars i normalment s'utilitzen en els captadors plans estandarditzats i homologats al mercat. Si més no, la superfície absorbent és convenient que estigui pintada amb una capa fina de color negre mat (reflectància baixa). D'una altra banda, la superfície ha de tenir una bona conductivitat tèrmica; és per això que normalment són superfícies metàl·liques. En hivernacles s'han utilitzat diferents tipus d'absorbidors i tubs de circulació del fluid, com coure, alumini, plàstic negre i cautxú.

La finalitat de la coberta és reduir les pèrdues energètiques produïdes per la radiació emesa per la placa absorbent, així com les degudes a la convecció de l'aire que està en contacte amb la placa. Ha de ser, doncs, opaca als raigs infraroigs i transparent a la llum solar. El vidre compleix aquestes condicions: transmet poc les altes longituds d'ona emeses per la placa, n'absorbeix una part i reflecteix l'altra -més gran- novament cap a la placa, de manera que es produeixi una sèrie de reflexions successives. Aquest fenomen, ja exposat en el capítol 3, s'anomena efecte hivernacle i és, per una altra banda,

el mateix que es produeix en l'espai de cultiu. Es poden utilitzar, també, cobertes de plàstic. Són més econòmiques que les de vidre però, en general, tenen una duració menor i una transmissió considerable per a la regió de l'infraroig. En definitiva, les pèrdues per convecció i radiació resulten molt disminuïdes amb la col·locació de la coberta transparent. La capa d'aire existent entre el vidre o plàstic i la superfície absorbent actua també d'element aïllant.

En el fons i parets laterals del captador es col·loca un aïllament tèrmic per reduir les pèrdues de calor per conducció. Els materials més emprats són les fibres minerals, el poliuretà i el poliestirè. Cal considerar que les fibres minerals són molt sensibles a la humitat i perden de forma notable les seves característiques isolants quan s'humitegen. El poliestirè pot ser afectat per les temperatures a què arriba el captador i la seva utilització és menys comuna.

En els sistemes de circulació d'aigua analitzats, la relació entre la superfície de captació i la de planta de l'hivernacle oscil·la entre

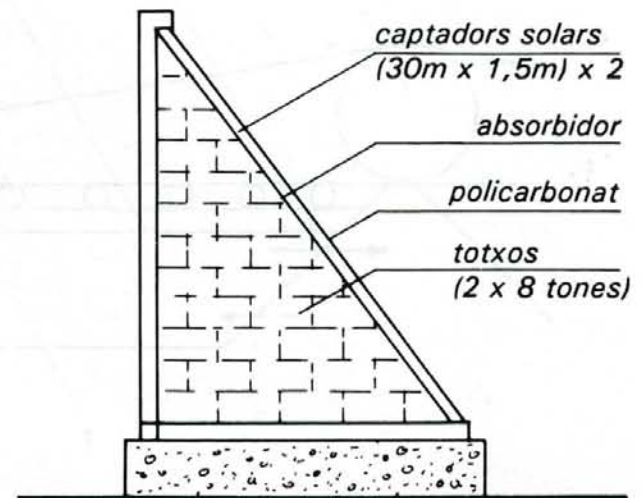


Fig. 7.2. Secció d'un captador solar d'aire.

0,15 per als sistemes acoblats amb bomba de calor, i els 0,5 d'algun hivernacle dissenyat per disposar d'una gran cobertura solar. Els sistemes solars més sofisticats i menys amortitzables corresponen als de països molt desenvolupats i de climatologia freda, com ara Alemanya. Les solucions més senzilles normalment emprades en països de l'àrea mediterrània presenten un retorn de la inversió més favorable, encara que en el seu conjunt la tecnologia dels captadors plans amb circulació d'aigua no sembla ser una solució tan rendible econòmicament com altres solucions solars.

Els sistemes de captació amb circulació d'aire han estat menys utilitzats en hivernacles. Els sistemes emprats han estat senzills, com el que es mostra a la fig. 7.2, construït amb components econòmics com ara estructura de fusta, coberta de policarbonat i poliestirè com a aïllant. L'emmagatzematge de la calor es realitza en totxos dis-

posats en el mateix suport del captador, així com en el subsòl de l'hivernacle, on s'han disposat 300 m de conductes quadrats de 0,3 x 0,3 m a 1,2 m de fons.

Els estanys solars sí han estat, en canvi, força utilitzats en països de l'àrea mediterrània. En aquest sistema, tant la captació com l'emmagatzematge es realitzen en el mateix estany, que pot utilitzar aigua fresca o salada. En el primer cas, l'estany es cobreix amb un film plàstic per tal de realitzar l'efecte hivernacle i la circulació és natural o forçada, tal com es mostra a la fig. 7.3. En el segon cas, en produir-se un gradient de salinitat des de la superfície al fons de l'estany, la capa superior de més baixa densitat actua d'aïllant. Un bescanviador situat dins de la capa inferior de màxima concentració de sal que arriba a temperatures de l'ordre dels 80 °C a l'estiu i 30 °C a l'hivern, transfereix la calor a l'hivernacle que es dissipa mitjançant la utilització de tubs soterrats a 35 cms o

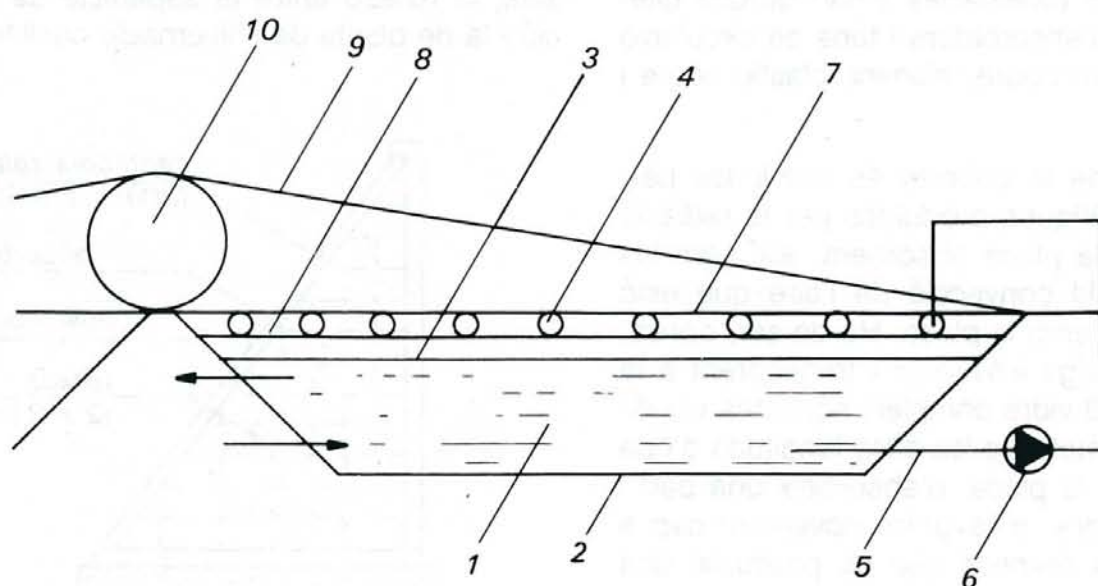


Fig. 7.3. Estany solar d'aigua fresca: 1) Estany; 2) Llàmina de PE; 3) Aïllament de poliestiré; 4) Tubs de PE; 5) Aigua calenta; 6) Bomba; 7 i 8) Llàmina de PE negra; 9) Llàmina transparent de PE; 10) Tub de PE.

tubs de film de plàstic (mànegues sobre el terra).

En general, el cost dels sistemes solars separats és car, sobretot pel que fa als captadors i dipòsits amb circulació d'aigua. En climes de l'àrea mediterrània, algunes solucions senzilles poden ser interessants. A Catalunya, suposen un cost mínim de 10.000 Pta/m² per captadors de cautxú amb circulació directa, la qual cosa representa com a molt un sobrecost de 5.000 Pta/m² planta d'hivernacle. Altres solucions amb dipòsit d'emmagatzematge poden oscil·lar entre les 20.000 i les 40.000 Pta/m² dels sistemes normalment comercialitzats.

7.3 Captadors integrats a l'hivernacle

Els diferents sistemes solars integrats en l'estructura de l'hivernacle es poden classificar de la forma següent:

- Absorbidors (captadors) disposats darrera la coberta, normalment orientada al sud de l'hivernacle.
- Utilització d'una doble coberta o paret transparent com a absorbidor solar.
- L'absorbidor està situat dins de l'hivernacle, integrat amb l'emmagatzematge.

En el primer cas, són diversos els tipus d'absorbidors emprats en hivernacles, com

Taula 7.1. Característiques i resultats obtinguts de tres sistemes de captador integrat.

	Captació (m ²)	Emmagatzematge (m ³)	Fracció solar (%)
Concentradors	51	12 (aigua)	4
Lamel·les aigua	80	20 (aigua)	25
Lamel·les aire	95	100 (grava)	14

ara concentradors i lamel·les mòbils amb tubs de circulació d'aigua i lamel·les com a absorbidors per circulació d'aire. Aquests tres tipus de sistemes han estat comprovats a Alemanya en hivernacles idèntics de 161 m². Les característiques més importants de cada sistema es mostren a la taula 7.1.

La distribució de la calor emmagatzemada i la del sistema d'escalfament auxiliar es realitza mitjançant convectors.

Els tres sistemes són cars i presenten problemes d'ombrejament sobre el cultiu.

La utilització d'una doble coberta o paret transparent com a absorbidor solar es realitza amb aigua estàtica o circulant. En ambdós casos aquesta aigua és tractada amb pigments per tal de convertir-la en un filtre òptic, o és mesclada amb partícules blanques molt petites i lleugeres en concentracions variables d'acord amb la intensitat de llum.

El primer cas (aigua estàtica) és un sistema passiu que utilitza les superfícies verticals de

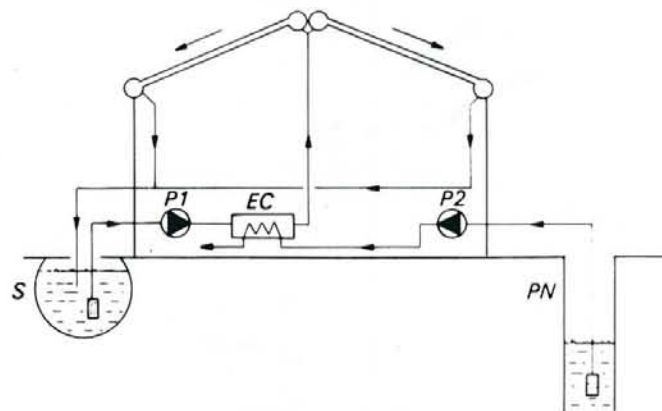


Fig. 7.4. Esquema d'una doble coberta d'hivernacle solar amb circulació de fluid.

l'hivernacle orientades a sud o a est i oest com a parets d'aigua. Les solucions més cares es componen de mòduls de vidre de 10 mm de 120 x 60 x 15 cms. Com a solució econòmica s'hi utilitzen bosses d'aigua de film plàstic de 0,15 mm engabiades en uns mòduls de 140 x 75 x 15 cms fets amb malla metàl·lica de 3.2 mm de fil i 75 mm de forat. La rendibilitat econòmica d'aquests sistemes augmenta molt en llocs de climatologia freda.

Els sistemes dinàmics o actius emprats com a coberta d'hivernacle s'han dissenyat utilitzant doble vidre normal de 2 mm de gruix en la part superior i vidre especial de 4,5 mm en la inferior, així com policarbonat cel·lular d'un mínim de 7 mm de gruix. L'aigua que circula per aquestes dobles cobertes absorbeix la radiació solar i transporta la calor convertida a l'emmagatzematge, que acostuma a ser un dipòsit d'aigua. La distribució de la calor emmagatzemada s'ha realitzat de diverses maneres, utilitzant la mateixa coberta com a emissor de la calor o un sistema d'emissió a baixa temperatura aeri o

soterrat. Un dels sistemes analitzats permet combinar la calefacció i la refrigeració de l'hivernacle mitjançant un emmagatzematge de calor, un de fred i un sistema acurat de regulació, tal com es mostra a la fig. 7.4.

A Catalunya, s'hi ha construït com a mòdul experimental un sistema anomenat "**escut tèrmic**" que combina, tal com es mostra a la figura 7.5, la circulació d'aire amb la d'un líquid selectiu. Aquest sistema ha estat bàsicament dissenyat per ser aplicat en un prototipus d'habitatge solar anomenat VIDA (viuendas invernadero doméstico autosuficiente) com a proposta que permeti disposar en el mateix habitatge d'un espai de producció d'aliments cultivats de forma hidropònica. La coberta d'aquest espai hivernacle és la que capta l'energia solar a utilitzar, tant en l'habitatge com en el propi hivernacle. Aquest sistema integrat emplaçat a l'Escola d'Arquitectura del Vallès (ETSAVS) és objecte de seguiment per tal de conèixer el seu comportament tèrmic.

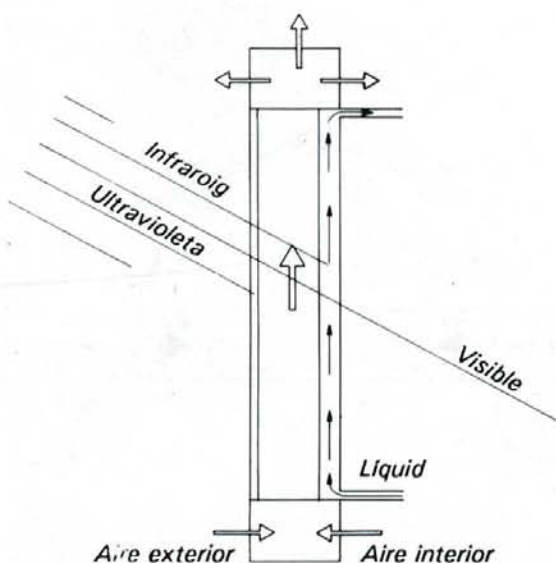


Fig. 7.5. Esquema de funcionament d'un escut tèrmic.



Foto 7: Escut tèrmic.

Els sistemes que consten d'un absorbidor dins de l'hivernacle utilitzen, normalment, mànegues de plàstic transparent col·locades entre les fileres de les plantes. Sota els tubs d'aigua es col·loca un film de polietilè negre, i entre aquest film i el terra es col·loca un aïllant per tal d'evitar les pèrdues cap al terra. Aquest tipus de sistema solar passiu pot ser també considerat dins de la classificació establerta com a sistema que utilitza l'hivernacle com a captador solar.

Les mànegues d'aigua són alhora captador, emmagatzemador i distribuïdor de la calor. Els resultats obtinguts de les experiències realitzades mostren que les mànegues han de tenir un diàmetre de 30 cm, cobrir d'un 35 a un 40% de la superfície de l'hivernacle i contenir de 80 a 100 m³ d'aigua per 1.000 m² d'hivernacle.

A la taula 7.2., s'hi mostren els resultats obtinguts en una instal·lació d'aquest tipus ubicada a Grècia. Es tabulen les temperatures màximes i mínimes de l'aigua i l'energia so-

lar captada i emmagatzemada durant el període del 15 de gener al 31 de maig de 1985. L'experiència es va realitzar en tres tipus d'hivernacles coberts amb PE, PET i doble film de PE. S'hi va observar que les mànegues d'aigua afecten més la temperatura mínima de l'aire (obtinguda com a mitjana del període) en hivernacles coberts amb polietilè tèrmic (6,1°C) i amb doble film de polietilè (6,4°C), essent la temperatura exterior mínima de 0,2°C i la de l'hivernacle de referència de 0,8°C. La temperatura màxima disminueix, en canvi, molt poc en relació a l'hivernacle de referència.

Els avantatges d'aquest sistema són:

- Cost molt econòmic.
- Senzill i efectiu.
- No consumeix energia addicional.
- Pot ser construït pels mateixos cultivadors.

Taula 7.2. Energia solar captada i emmagatzemada des del 15 de gener al 31 de maig, utilitzant mànegues de PE en un hivernacle de 1000 m².

Període de temps	Temperatura màxima mitjana de l'aigua °C	Temperatura mínima mitjana de l'aigua °C	Diferència mitjana de temperatures diària. °C	Energia útil captada kcal
15-31/1/85	13,91	7,24	6,67	9.071.200
1-28/2/85	15,46	6,07	9,39	21.033.600
1-31/3/85	18,80	12,45	6,35	15.748.000
1-30/4/85	26,13	17,87	8,26	19.824.000
1-31/5/85	34,51	23,41	11,10	27.528.000
Total				93.204.800

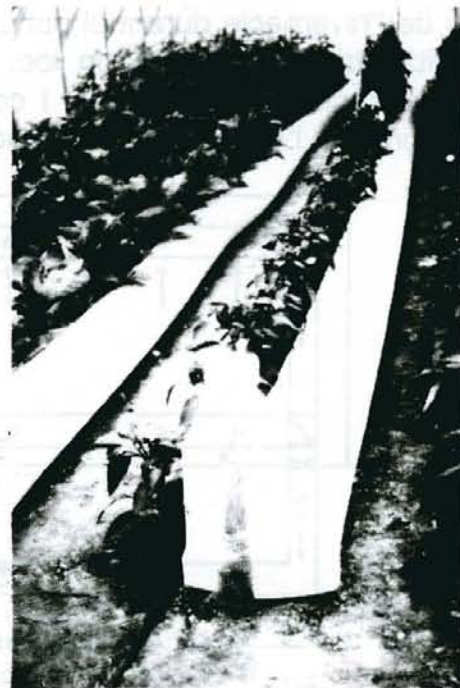


Foto 8: Mànegues d'aigua.

Els inconvenients són:

- Ocupació d'espai.
- Temps de vida curt: 3 anys aproximadament.
- És sensible als punxaments.

A l'IRTA de Cabrils es van disposar mànigues d'aigua sobre un 20% del terra d'un hivernacle tipus túnel, utilitzat per cultivar en pendent. Aquest sistema solar passiu, va permetre mantenir una temperatura superior en uns 2°C a la d'un hivernacle de referència.

7.4 L'hivernacle com a captador solar

Aquesta és la tipologia de sistema solar aplicat en hivernacle que pot presentar una millor rendibilitat econòmica i de la qual s'han realitzat més experiències.

Bàsicament, aquests sistemes tracten, en primer lloc, d'aprofitar part de l'energia solar rebuda dins de l'hivernacle durant el període diürn per utilitzar-la de nit. En segon lloc, alguns sistemes tracten de maximitzar i conservar el màxim de l'energia solar rebuda,

construint l'hivernacle de manera asimètrica amb el pendent de la cara sud optimitzat per captar el màxim de radiació i reduir les pèrdues de calor a través de la coberta.

Els diferents tipus de sistemes analitzats es poden classificar de la següent manera:

- Sistemes que recuperen l'aire calent estratificat a la part alta de l'hivernacle i l'emmagatzemen en totxos, grava, sals químiques o en el mateix terra de l'hivernacle.
- Sistemes que utilitzen un bescanvi aire-aigua i emmagatzemen l'energia recuperada en un dipòsit d'aigua.

Més de la meitat de les experiències analitzades es basen en la circulació de l'aire calent estratificat en la part superior de l'hivernacle a través d'un emmagatzematge sòlid. Els medis d'emmagatzematge són diversos; terra, còdols i productes químics de canvi de fase són els més emprats. També s'han utilitzat els totxos d'obra.

Els sistemes que emmagatzemen la calor en el terra són els més senzills i econòmics. En tots els casos s'aspira l'aire calent de l'hivernacle i es fa circular a través d'uns tubs de

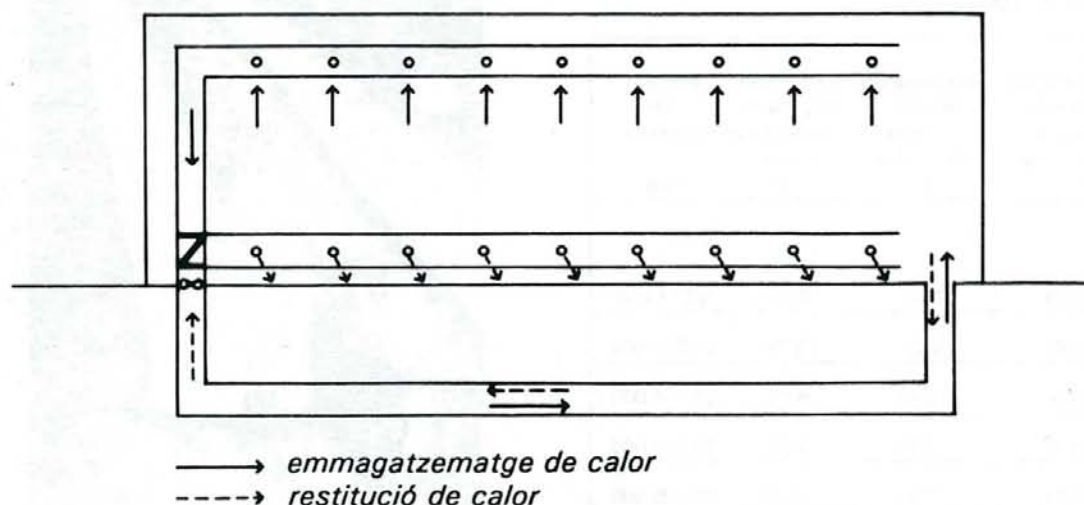


Fig. 7.6. Esquema d'un sistema de calefacció solar d'aire i emmagatzematge en el terra.

PVC de drenatge de 10 a 15 cms de diàmetre, soterrats a diferents fondàries d'entre 40 i 200 cms (vegeu figura 7.6). Per a la climatologia mediterrània s'analitzen diferents tipus de cobriment i dissenys de la part superior de l'hivernacle, tal com es mostra a la figura 7.7. Els resultats no estan encara disponibles, però, per les condicions mediterrànies, les possibilitats sembla que aniran cap

a sistemes senzills que utilitzen l'hivernacle com a captador amb molt poc emmagatzematge tèrmic.

El comportament tèrmic d'un d'aquests sistemes ha estat estudiat a França (ref. 22) pensant en el possible interès d'aplicació en hivernacles de l'àrea mediterrània.

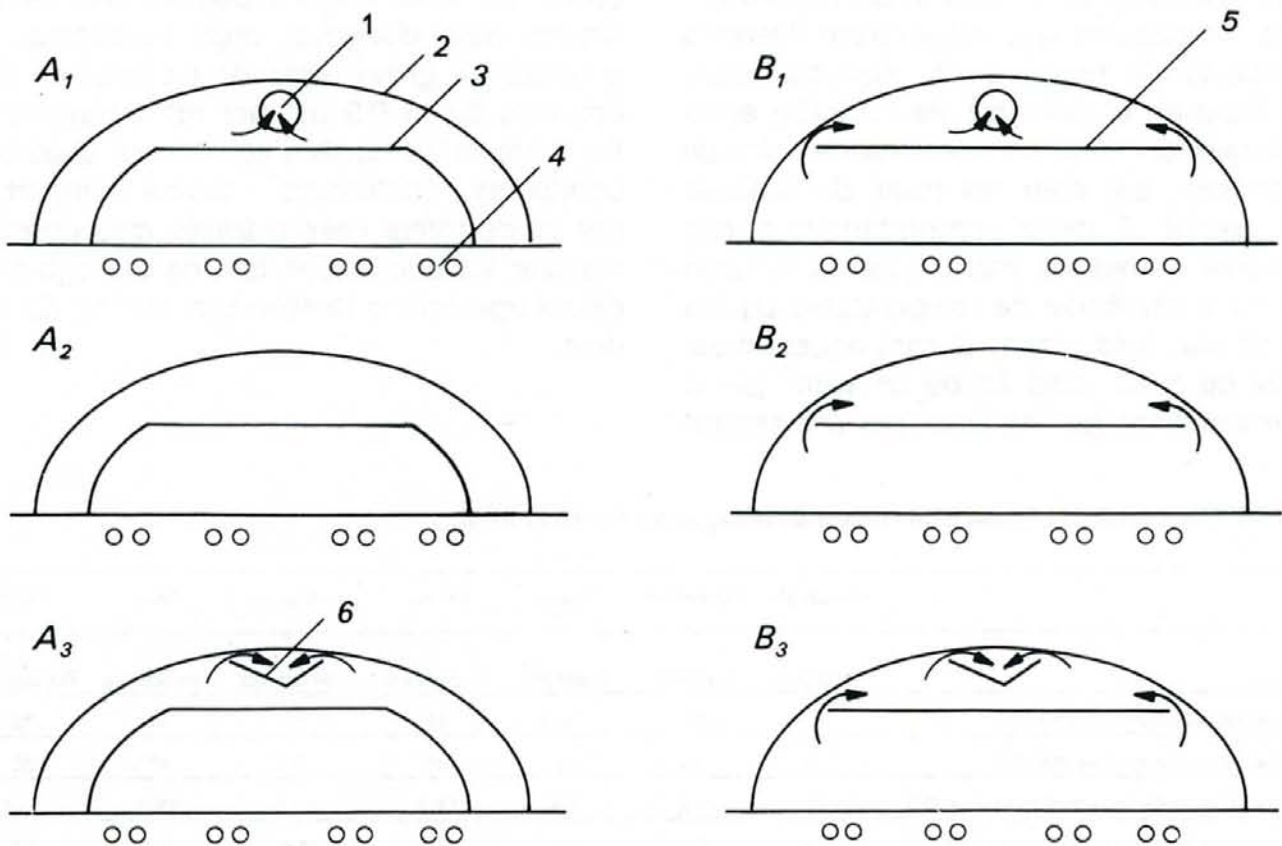


Fig. 7.7. Diferents maneres d'utilitzar un hivernacle com a captador solar.

- | | |
|----|--|
| A1 | (1) Coberta de PE tèrmic.
(2) Tub de PVC amb forats.
(3) Segona coberta de PVC que conforma una cambra tancada a la part superior.
(4) Conductes de PVC soterrats i plens de grava. |
| A2 | El mateix que A1 sense tub de PVC. |
| A3 | El mateix que A2 amb regueró obert (6) de film de PVC. |
| B1 | El mateix que A1 però amb la cambra superior oberta. Segona coberta de film de PVC. |
| B2 | El mateix que B1 sense tub de film de PVC. |
| B3 | El mateix que B2, amb regueró obert de film de PVC. |

L'hivernacle comprovat és semicircular de 8 m d'ample i 22 de llarg (176 m^2). En el seu subsòl, a 40 i 80 cms de fondària s'hi han col·locat 19 tubs de PVC de 12.5 cms de diàmetre i 22 m de llarg cadascun. La superfície d'intercanvi és de 165 m^2 i l'aire circula a un cabal de $7.400 \text{ m}^3/\text{h}$.

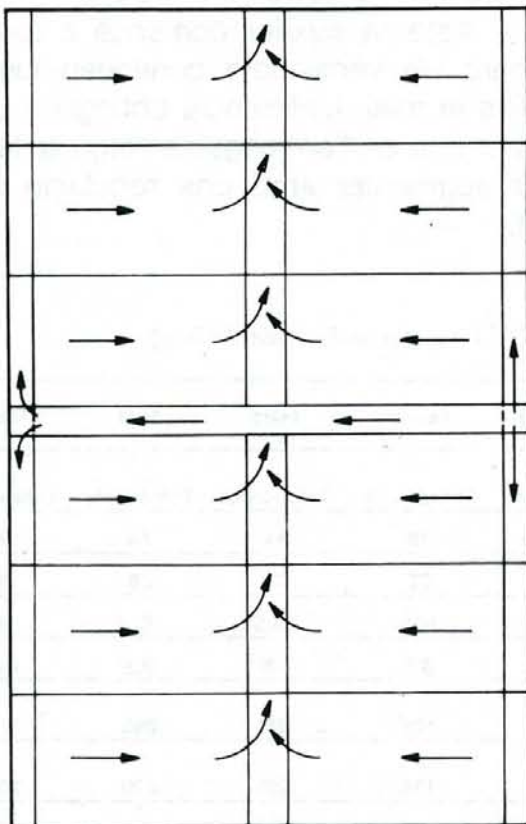
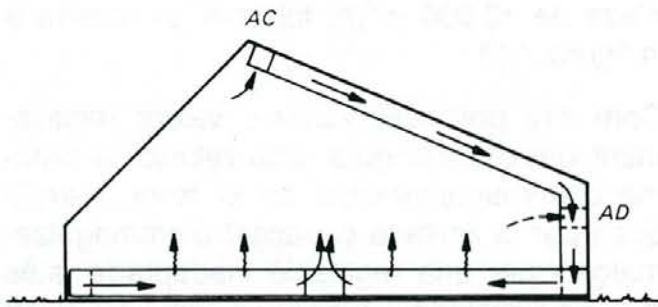
A la taula 7.3 s'hi mostren les dades de comportament obtingudes durant el període novembre-maig, en el qual s'han cultivat enciams i tomàquets que requereixen diferents condicions de temperatura. Aquests resultats depenen àmpliament de l'equilibri entre la temperatura diürna i nocturna de l'aire de l'hivernacle, així com del nivell de radiació solar global. El millor comportament tèrmic s'observa el mes de març, quan la radiació global i la diferència de temperatures de dia i de nit són més grans. Durant aquest mes, el flux de calor mitjà és de 95 w/m^2 per a l'emmagatzematge i 48 w/m^2 per a la restitució.

Una mitjana de $0,43 \text{ kWh/m}^2$ s'extreu cada nit del terra de l'hivernacle. Un 70% d'aquesta energia és en forma de calor sensible i el 30% restant de calor latent. L'energia auxiliar no ha estat utilitzada durant aquest mes de març i el rendiment del sistema (energia restituïda/consum del ventilador) ha estat igual a 3,2.

Els sistemes que emmagatzemen la calor en grava han estat força experimentats, essent alguns dels dissenys força sofisticats. La quantitat de grava utilitzada ha estat de l'ordre dels $0,4$ a $0,9 \text{ m}^3$ per m^2 d'hivernacle. En aquests sistemes s'acostumen a utilitzar conductes i ventiladors, i també comportes, per tal de forçar l'aire a través dels còdols i realitzar les operacions tant de càrrega com de recuperació o descàrrega del jaç de còdols.

Taula 7.3. Comportament tèrmic d'un sistema d'emmagatzematge en el terra.

	Novembre	Desembre	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig
Cultiu	Enciams	Enciams	Enciams	Tomàquets	Tomàquets	Tomàquets	Tomàquets
Temperatura consigna de nit ($^{\circ}\text{C}$)	6	6	4 a 3	11	14	14	16
Temperatura consigna de dia ($^{\circ}\text{C}$)	15	15	15	22	26	26	26
Temperatura mitjana interior nocturna ($^{\circ}\text{C}$)	9	7,2	5,3	11,2	13,5	15,3	16,7
Temperatura mitjana exterior nocturna ($^{\circ}\text{C}$)	6,2	5,0	2,2	3,8	6,6	9,3	9,8
Mitjana de la calor emmagatzemada de dia (W.h.m^{-2})	31	71	159	366	388	396	517
Mitjana de la calor restituïda de nit (W.h.m^{-2})	128	76	147	349	429	361	395
Mitjana de la calor auxiliar de nit (W.h.m^{-2})	0	0	50	257	115	0	0
Potència mitjana de calor emmagatzemada (W.m^{-2})	33	65	67	106	95	96	95
Potència mitjana de calor restituïda (W.m^{-2})	100	94	79	49	48	57	64
Proporció de la calor latent restituïda	0,28	0,30	0,31	0,30	0,31	0,34	0,49
Eficiència	5,5	3,9	2,7	2,0	3,2	3,7	4,4
Mitjana GR/diària exterior (W.h.m^{-2})	1866	1305	1694	2190	3596	4445	6034



AC: aspiració càrrega

AD: aspiració descàrrega

Fig. 7.8. Emmagatzematge de la calor en còdols. Projecte de demostració de la CEE d'un hivernacle d'alt rendiment energètic (A R.E.).

Els avantatges d'aquest medi d'emmagatzematge són:

- Material a l'abast i econòmic.
- Bona superfície d'intercanvi entre l'aire i el medi d'emmagatzematge.

Els inconvenients fan referència bàsicament a la necessitat d'emprar potents ventiladors per vèncer la pèrdua de càrrega a través dels còdols, ja que la quantitat de grava que s'hi utilitza és considerable, i a l'excessiva humitat de l'aire recuperat. El jaç de còdols acostuma a situar-se sota el paviment de l'hivernacle. La recuperació de la calor emmagatzemada es realitza parcialment per irradiació, si la superfície del jaç no està aïllada, essent la major part descarregada per convecció forçada de l'aire a través dels còdols. Aquesta circulació d'aire és convenient de fer-la en sentit contrari a la de càrrega, per tal d'extreure'n l'aire a la temperatura més alta.

Els sistemes que utilitzen materials de canvi de fase presenten l'avantatge de poder reduir el volum d'emmagatzematge tot i man-

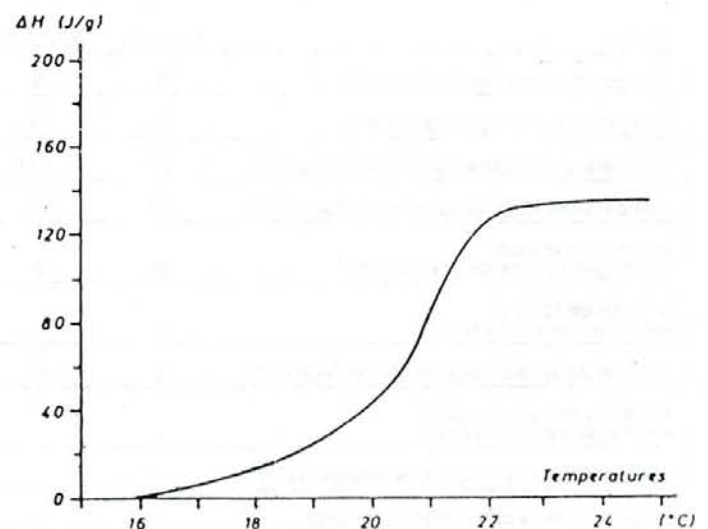


Fig. 7.9. Característiques tèrmiques de la "serrolita".

tenir la mateixa quantitat de calor. Aquests compostos químics tenen la propietat de poder absorbir i, consegüentment, cedir grans quantitats de calor (anomenada latent) a temperatura constant quan canvien d'estat sòlid a líquid, o a l'inrevés.

Normalment, en aplicacions en hivernacles la temperatura de canvi de fase escollida és de l'ordre dels 21 a 24 °C i el component utilitzat que la proporciona és la serrolita ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), de la qual es mostren les propietats tèrmiques a la figura 7.9.

El comportament tèrmic obtingut d'un sistema de canvi de fase s'hi mostra a la taula 7.4. Aquest sistema ha estat estudiat a França en paral·lel i en un hivernacle similar al del sistema d'emmagatzematge en el terra exposat abans. A la figura 7.10 es mostra un esquema del contenidor de serrolita de 3 kg (2,5 kg de producte i 0,5 kg de PVC). Un total de 990 contenidors s'utilitzen amb una

capacitat total d'emmagatzematge de 0,6 kWh/m². Aquests contenidors se situen dins d'un suport de marc metàl·lic de 7 m³ i dos ventiladors de 0,9 kW garanteixen un flux d'aire de 13.000 m³/h, tal com es mostra a la figura 7.11.

Com s'hi pot observar, els valors relativament baixos obtinguts amb relació al sistema d'emmagatzematge en el terra, s'expliquen per la limitada capacitat d'emmagatzematge i per una regulació inadaptada, atès que els ventiladors funcionen fins i tot quan l'emmagatzematge està ple o exhaurit. Així, tal com s'observa a la figura 7.12, el sistema s'exhaureix quasi cada nit a les 2 o 3 hores, quan el sistema auxiliar comença a funcionar; però els ventiladors continuen funcionant fins al matí. L'eficiència obtinguda (4,8, més alta que en l'emmagatzematge al terra) podria augmentar amb una regulació més adient.

Taula 7.4. Comportament tèrmic d'un sistema d'emmagatzematge en MCF (material de canvi de fase).

	Novembre	Desembre	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig
Cultiu	Enciams	Enciams	Enciams	Tomàquets	Tomàquets	Tomàquets	Tomàquets
Temperatura consigna de nit (°C)	6	6	4 a 3	12	14	14	16
Temperatura consigna de dia (°C)	15	15	15	22	26	26	26
Temperatura mitjana interior nocturna (°C)	8,3	7,1	4,9	10,9	13,5	15,05	16
Temperatura mitjana exterior nocturna (°C)	6,2	5,0	2,2	3,8	6,6	9,3	9,8
Mitjana de la calor emmagatzemada de dia (W.h.m ⁻²)	0	0	0	125	296	263	275
Mitjana de la calor restituïda de nit (W.h.m ⁻²)	0	0	0	135	355	290	309
Mitjana de la calor auxiliar de nit (W.h.m ⁻²)	10	37	127	502	158	51	0
Potència mitjana de calor emmagatzemada (W.m ⁻²)	-	-	-	70	63	70	61
Potència mitjana de calor restituïda (W.m ⁻²)	-	-	-	31	52	43	49
Proporció de la calor latent restituïda	-	-	-	0,07	0,08	0,10	?
Eficiència	-	-	-	4	4,8	4,7	4,1
Mitjana GR/diària exterior (W.h.m ⁻²)	1866	1305	1694	2190	3596	4445	6034

L'energia mitjana extreta cada nit és de 0,360 kWh/m² i l'emmagatzemada és de 0,300 kWh/m². Aquesta diferència entre els dos valors s'explica per la radiació solar directament absorbida pels contenidors. L'energia restituïda és, principalment, calor sensible (90%). El valor obtingut de la humitat relativa durant la nit és inferior al de l'emmagatzematge en el terra.

Finalment, s'ha realitzat alguna experiència utilitzant totxos com a medi d'emmagatzematge de calor. El rendiment obtingut amb aquest tipus de sistema és de l'ordre de 3,15.

El segon tipus de sistema catalogat, en utilitzar normalment l'aigua com a medi d'emmagnetitzatge, precisa d'un bescanviador que transfereixi la calor de l'aire a l'aigua. Aquesta aigua pot circular a través de conductes que actuïn de bescanviador, o bé pot ser polvoritzada i bescanviar obertament amb

l'aire calent de la part superior de l'hivernacle.

A les figures 7.13 i 7.14 s'hi mostren alguns dels sistemes dissenyats que polvoritzen l'aigua per escalfar-la i la condueixen a algun

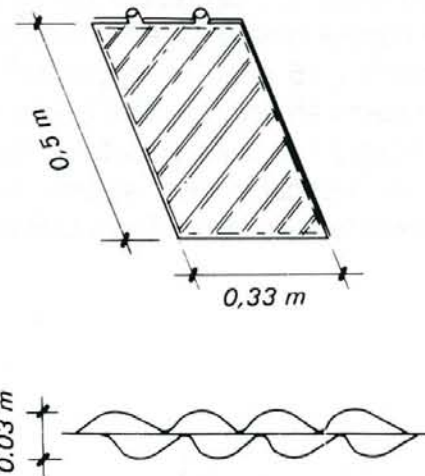


Fig. 7.10. Esquema d'un dipòsit contenidor de material de canvi de fase (MCF).

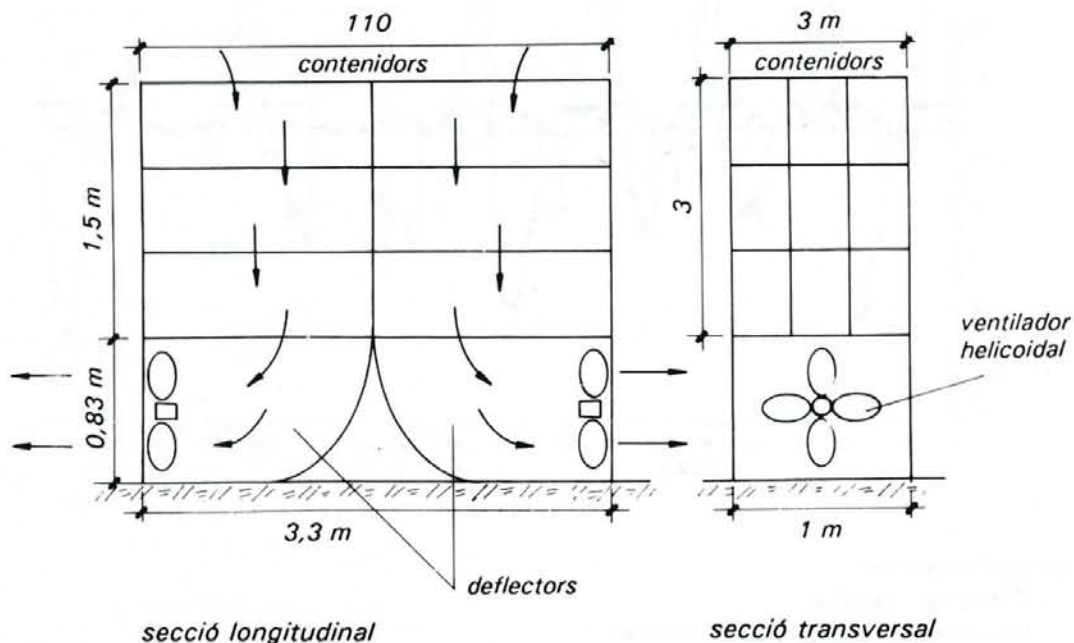


Fig. 7.11. Esquema de la plataforma de contenedors de MCF.

dipòsit d'emmagatzematge. Com s'hi pot observar, l'aire és conduït per la zona de polvorització situada en alguns casos en la part superior de l'hivernacle i en altres en el seu extrem. Aquest concepte de disseny utilitza un dipòsit d'emmagatzematge de l'ordre dels 0,1 a 0,5 m³ d'aigua per m² d'hivernacle i uns cabals de circulació de l'aigua i de l'aire de l'ordre dels 0,02 a 0,12 m³/h per m² d'hivernacle i 15 a 50 m³/h per m² d'hivernacle respectivament. La distribució de la calor es realitza a l'inrevés escalfant l'aire en la cambra de bescanvi. En alguns casos, l'aire absorbeix la calor de l'aigua polvoritza-

da sobre la coberta conjuntament amb l'emmagatzemada en el terra. En qualsevol cas, l'interès d'aquests sistemes hidrosolars rau en la possibilitat de ser utilitzats també per refredar quan les altes temperatures de l'hivernacle s'han de reduir durant la primavera, estiu o tardor.

Els resultats obtinguts mostren que quan la temperatura d'un hivernacle no escalfat de referència era de 0 °C, la temperatura interior de l'hivernacle hidrosolar ha estat de 6 a 8 °C.

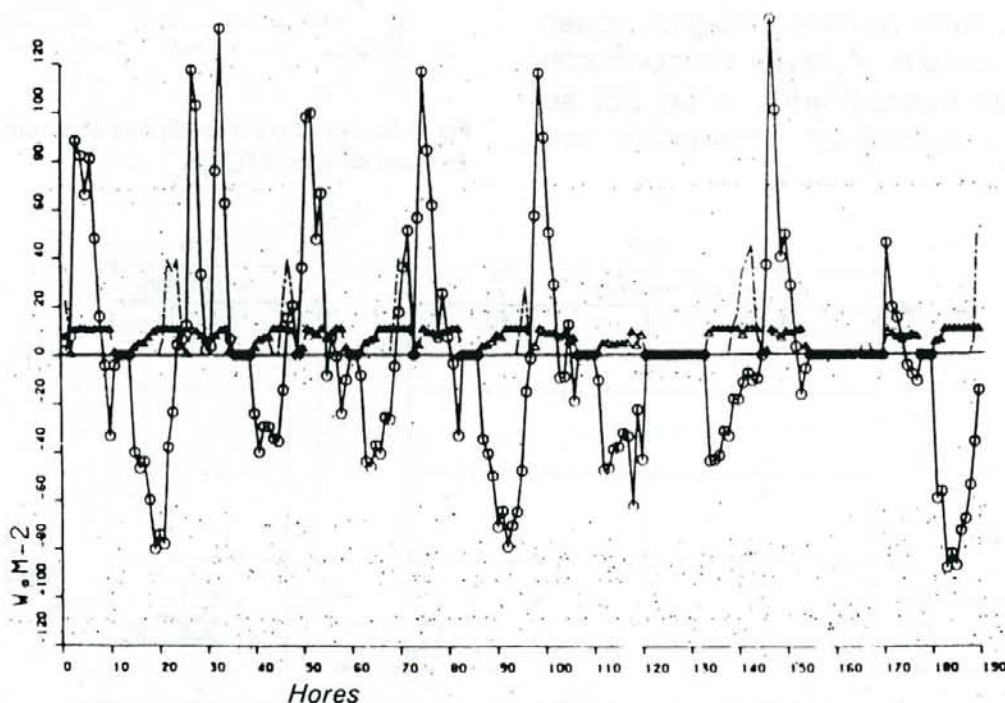


Fig. 7.12. Evolució horària de:

- T interior i exterior
- Flux tèrmic emmagatzemat i restituit
- Consum ventilador elèctric
- Consum calor auxiliar
- Dies 71 a 79 sistema emmagatzematge en MCF.

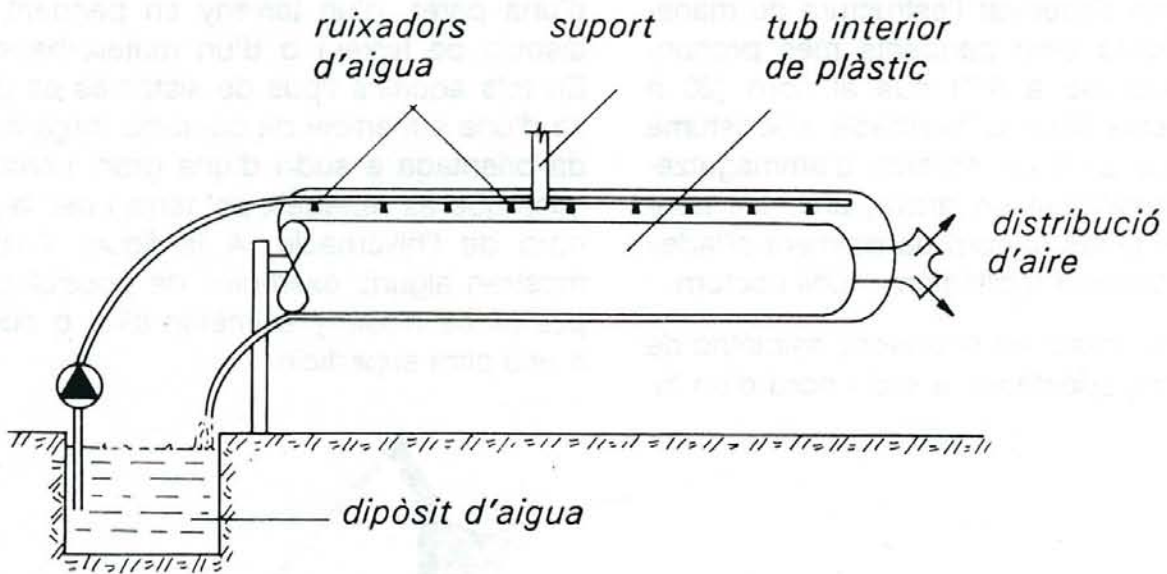


Fig. 7.13. Sistema hidrosolar que polvoritza l'aigua sobre el conducte de circulació de l'aire calent.

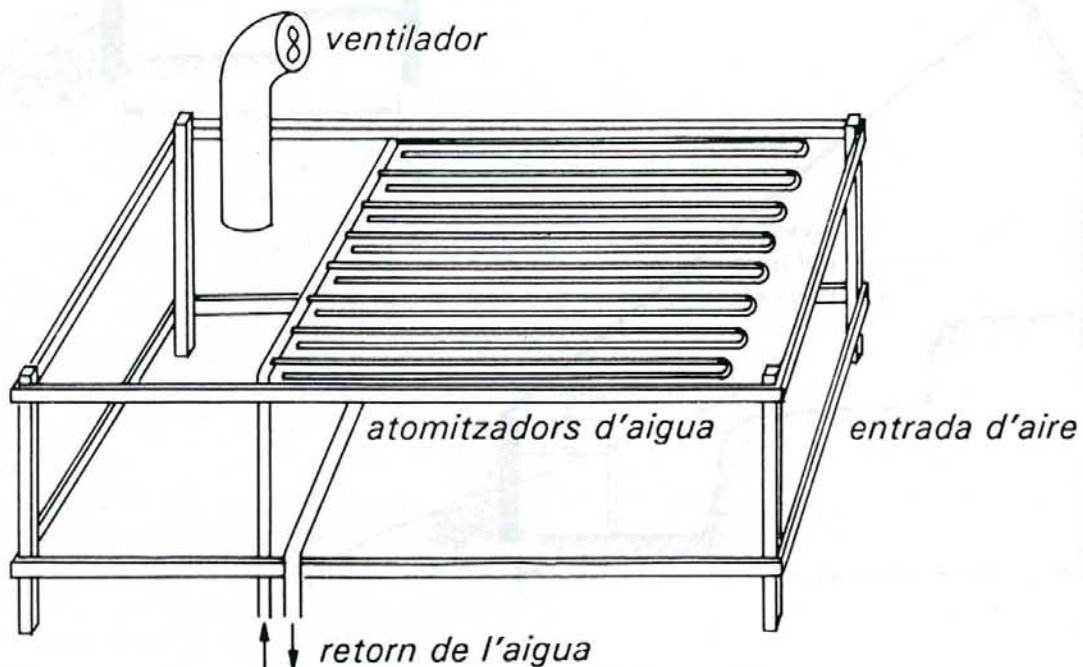


Fig. 7.14. Bescanviador aire-aigua de 1.000 m² de plàstic situat en un extrem de l'hivernacle.

Els sistemes d'aprofitament de l'energia solar que utilitzen l'hivernacle com a captador solar poden dissenyar l'estructura de manera asimètrica amb pendents més pronunciats al sud (45 a 65°) que al nord (20 a 30°). Aquests tipus d'hivernacle s'acostuma a dissenyar amb un sistema d'emmagatzematge normalment en grava, amb les pendents orientades al nord parcialment aïllades i amb un sistema d'aïllament mòbil nocturn.

El concepte basat en el disseny asimètric de les cobertes orientades a sud i nord d'un hi-

vernacle connecta perfectament amb l'adossament de l'hivernacle a la superfície sud d'una paret, d'un terreny en pendent (que disposi de feixes) o d'un mateix habitatge. En tots aquests tipus de sistemes es disposa d'una superfície de captació força inclinada orientada a sud i d'una gran inèrcia tèrmica que es reparteix pel terra i per la paret nord de l'hivernacle. A la figura 7.15 s'hi mostren alguns exemples de possibles propostes de disseny asimètric aïllat o adossat a una altra superfície.

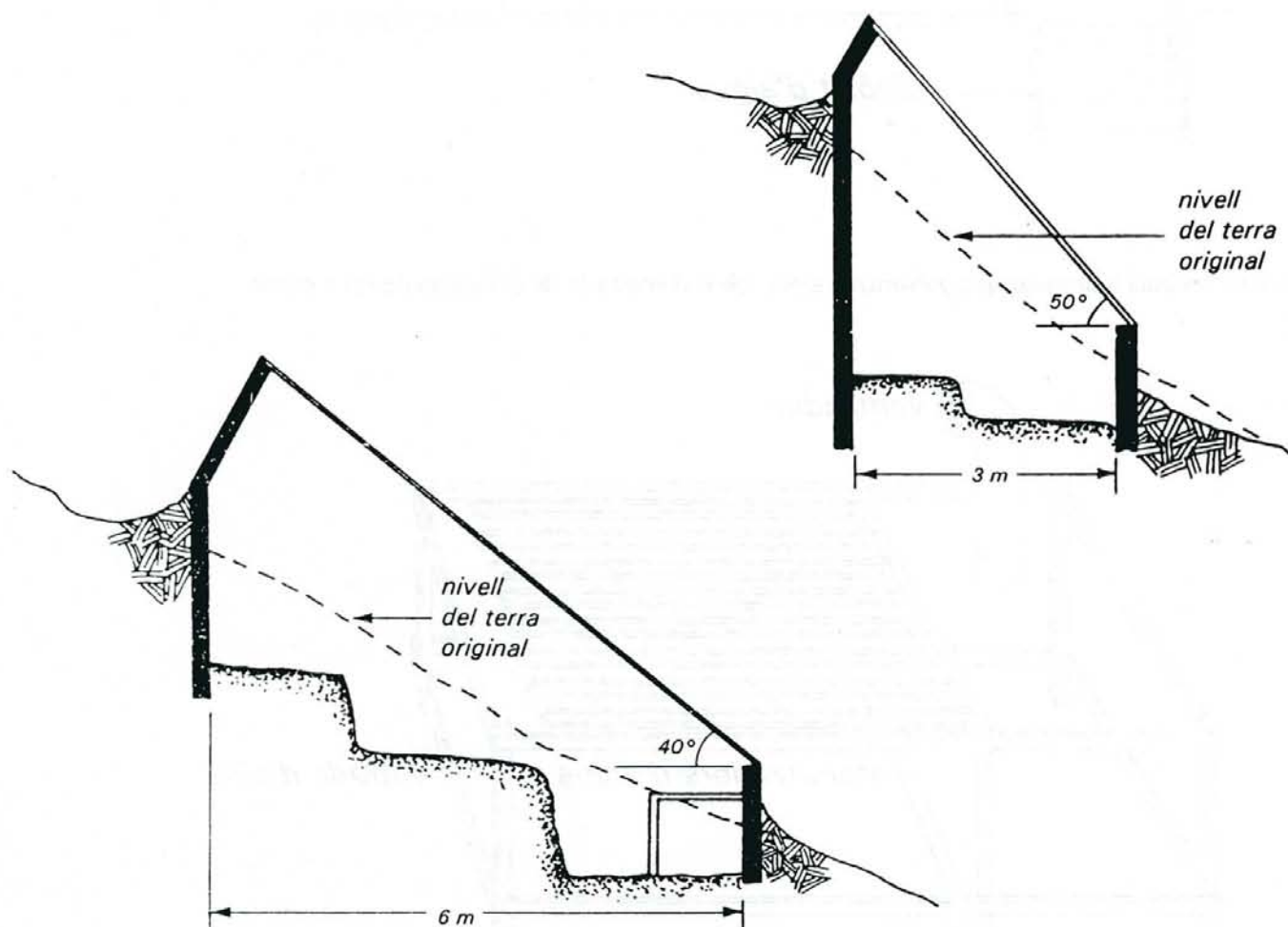


Fig. 7.15. Hivernacles adossats a marges en pendent.

CAPÍTOL 8. REFRIGERACIÓ D'HIVERNACLES

8. REFRIGERACIÓ D'HIVERNACLES

8.1. Introducció

En les regions de clima mediterrani, com s'ha pogut observar en realitzar el balanç tèrmic segons zona climàtica, es donen unes condicions més favorables d'hivern que en altres regions de climatologia més freda, que es tradueixen en uns costos més baixos de calefacció. Aquestes regions atemperades han conegut, sobretot a partir dels anys seixanta, un desenvolupament molt gran pel que fa al cultiu en hivernacle, que ha estat molt condicionat pels factors exteriors esmentats abans (factores climàtics i socio-econòmics). Així, aquest és el cas d'Almeria dins del context espanyol i del Maresme, dins de Catalunya.

Les condicions favorables durant el període d'hivern són, en canvi, problemàtiques a l'estiu i fan que molts cultivadors aturin els cultius quan les temperatures exteriors són elevades.

La climatització dels hivernacles en l'àrea mediterrània és, doncs, important, però implica uns costos d'inversió elevats en part pel fet que és molt més difícil refredar un hivernacle a l'estiu que escalfar-lo a l'hivern, i en molts casos s'hauran de combinar diverses tècniques per obtenir el clima interior desitjat.

En les regions mediterrànies es donen uns valors màxims de radiació solar de l'ordre dels 500 a 600 W/m² i unes temperatures mitjanes màximes de l'ordre dels 28 °C. A causa de les característiques del material de coberta, el sobreescalfament que es pot produir és molt gran i s'ha d'eliminar aquesta energia sobrant tractant de mantenir l'hi-

vernacle a unes temperatures equivalents a l'exterior. Eliminar aquest excedent de calor mitjançant màquines de refredament com la bomba de calor és excessivament car i és necessari utilitzar mètodes més econòmics com la ventilació, l'ombrejament, la nebulització o altres mètodes de refredament per evaporació de l'aigua, o combinar-ne diversos.

Com ja s'ha esmentat, el balanç de calor sensible d'un hivernacle durant el dia pot expressar-se de forma simplificada a partir de l'equació de balanç diürn (eq. 4.10) exposada al capítol 4. Aquesta equació un cop substituïda per les equacions de transferència de calor (eqs. 4.4, 4.5 i 4.7), o sigui, considerant tan sols els guanys solars amb l'evapotranspiració implicada i les pèrdues per convecció, conducció i radiació, així com per ventilació, s'expressa de la forma següent:

$$\alpha_s \tau (1 - \psi) A_s I - KA (T_{id} - T_{ed}) - 0.3 RV (T_{id} - T_e) = 0 \quad (\text{Eq. 8.1})$$

La temperatura interior serà

$$T_{id} = [\alpha_s \tau (1 - \psi) A_s I + KA T_{ed} + 0.3VR T_{ed}] / [KA + 0.3 RV]$$

A partir d'aquesta relació es podrà reduir la temperatura T_{id} :

- Augmentant l'índex de renovacions d'aire (R), sempre que $T_{id} > T_{ed}$.
- Augmentant el coeficient de pèrdues de calor K .
- Disminuint la radiació solar incident o el factor d'absorbància (α_s) en interposar una pantalla d'ombrejament entre la coberta i les plantes.
- Augmentant el coeficient d'evapotranspiració (ψ), o sigui la part evaporativa de la radiació incident en injectar vapor d'aigua dins de l'hivernacle (aspersió, nebulització).

- Reduint la temperatura exterior (T_{ed}) de l'aire abans d'introduir-lo dins de l'hivernacle (sistema de refredament per evaporació o "cooling system").

De la mateixa forma es pot fer un balanç de calor latent o de vapor d'aigua, considerant que de dia, durant l'estiu, els fenòmens de condensació poden ser negligibles.

$$\alpha_s \tau \psi A_s I - RV \gamma_a C_l (h_i - h_e) = 0 \quad (\text{eq. 8.2})$$

essent:

C_l : calor latent de vaporització (Wh/kg)

γ_a : pes específic de l'aire (kg/m^3)

h_i i h_e : humitat específica de l'aire a l'exterior i a l'interior (kg aigua/kg aire).

I : rad. solar incident en W/m^2

La humitat específica interior es pot deduir:

$$h_i = h_e + (\psi \alpha_s \int \tau I A_s / \gamma_a RV C_l)$$

La ventilació i l'apantallament disminuiran la humitat interior i la nebulització lògicament l'augmentarà.

8.2. Ventilació dels hivernacles

8.2.1. Introducció

Com s'ha pogut comprovar, en les equacions de balanç de calor sensible i de calor latent els intercanvis d'aire entre l'interior i l'exterior constitueixen un procés que afecta considerablement la temperatura i la humitat de l'hivernacle. Aquesta renovació d'aire també impacta sobre el contingut de gas carbònic (CO_2) i d'altres gasos eventualment presents.

La ventilació pot expressar-se en funció de la taxa de renovació horària (h^{-1}), del flux volumètric o màssic de l'aire ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) o (kg s^{-1}) i en relació a la superfície de l'ober-

tura del practicable o de l'hivernacle ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) o ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

La taxa de renovació horària és el volum de l'hivernacle que renova en una hora, i és una dada molt indicativa del nivell d'aireig d'un hivernacle. A nivell comparatiu és més útil expressar el flux d'aire en relació a la superfície de planta de l'hivernacle en les unitats $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$, atès que quantifiquen molt bé tant la ventilació natural com la mecànica. Finalment, pot ser més científic expressar la ventilació com a flux màssic per unitat de superfície d'hivernacle. ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

En aquest apartat s'hi analitzen els sistemes de ventilació natural i forçada o mecànica des d'un punt de vista experimental més que no pas teòric. Com que la informació disponible és escassa, i per poder extreure unes pautes de disseny, s'han de combinar ambdós camins.

El disseny d'un sistema de ventilació d'acord amb les característiques i el tipus de cultiu i d'hivernacle és molt important.

Independentment que el tipus de ventilació sigui natural o mecànica, hi ha unes consideracions bàsiques que cal esmentar a l'hora de donar unes pautes de disseny:

- Les necessitats de ventilació d'un hivernacle, tal com ha estat exposat abans, poden ser determinades de forma aproximada a partir de l'equació de balanç diürn (eq. 8.1) abans expressada.

- L'índex de renovació màxim pot oscil·lar de 45 a 60 renovacions d'aire per hora. La diferència de temperatura entre l'interior i l'exterior és proporcional al flux d'aire. Així, en un dia assolellat l'índex més baix (45 R) provocarà un augment de temperatura respecte a l'exterior de 5,5 a 6,5 °C, mentre que 60 renovacions donaran un augment de 4,5 a 5,5 °C.

- Durant l'hivern, l'aire exterior de ventilació hauria d'ésser introduït en l'hivernacle de forma que es

mesclés amb l'aire calent de l'interior abans d'entrar en contacte amb les plantes.

A Catalunya, i concretament al Maresme, un 56,5 % de les estructures productives existents disposa d'un sistema de ventilació. Els umbracles i les proteccions que representen el 43,5 % restant no disposen de cap sistema per regular el grau d'estanqueïtat de l'estructura (o hi ha un tancament total o bé obertures permanents o estacionals).

El sistema de ventilació majoritàriament emprat en els hivernacles d'aquesta comarca és el manual, que representa un 71,4 % de la superfície total existent (vegeu fig. 8.1.). El 28,5 % disposa de ventilació natural automàtica (motoritzada) accionada mitjançant termostats i es dediquen majoritàriament al cultiu de planta ornamental. La ventilació mecànica o forçada només s'utilitza en un 0,3 % dels hivernacles ventilats.

Els hivernacles d'estructura de fusta disposen, normalment, de ventilació manual i els de vidre a dos vessants, majoritàriament de

ventilació automàtica. Els hivernacles d'estructura metàl·lica circulars utilitzen a parts quasi iguals un tipus de ventilació o un altre.

8.2.2. Ventilació natural

La ventilació natural s'origina en disposar d'una diferència de pressions causada pel vent exterior o pels gradients de temperatura. Per tal d'aprofitar les diferències de pressió originades pel vent es recomana disposar d'obertures a ambdós costats de l'hivernacle. Per aprofitar els gradients de temperatura, s'han de disposar, addicionalment, les obertures en la part superior o carener de l'hivernacle.

Tant les infiltracions com la ventilació natural d'aire són difícils d'expressar mitjançant les equacions de la mecànica de fluids. Normalment el fenomen s'analitza teòricament des d'un punt de vista global utilitzant conceptes com el coeficient de pèrdua de càrrega i el coeficient de pressió de vent, i quan és possible a partir de l'equació de Bernouilli. Una aproximació teòrica al disseny de la ventilació natural dels hivernacles és exposada per A. Matallana i J.I. Montero (ref. 5), així com per A. Baille en un treball realitzat a l'INRA de Montfavet (França), (ref. 23).

A partir de l'equació de balanç diürn (eq. 8.1), mesurant les temperatures interior i exterior i la radiació solar incident i coneixent o estimant els valors de ψ, α, τ i K , es pot deduir la taxa de renovacions d'aire de l'hivernacle de dimensions A_s, A i V conegudes.

$$R = [I A_s \tau \alpha_s (1 - \psi) / 0,3V (T_{id} - T_{ed})] - [AK / 0,3V] \quad (\text{eq.8.4})$$

Es tracta d'un mètode indirecte per deduir la taxa de renovacions d'aire a partir de l'equació de balanç i del coneixement dels altres

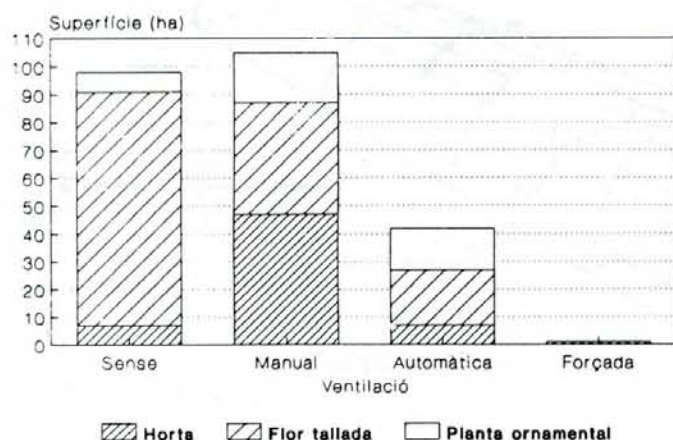


Fig. 8.1. Tipus de ventilació. Distribució de la superfície protegida (ha) segons les diferents orientacions productives (ref. 1).

fluxos (radiatiu, conductiu i convectiu, així com l'evapotranspiració).

El paràmetre més estimatiu és el que expressa la calor latent d'evapotranspiració referit a la radiació solar incident (ψ). Aquest paràmetre és de l'ordre de 0,5 en un hivernacle ben irrigat.

Un mètode més precís tracta de mesurar directament dins de l'hivernacle l'índex de renovacions d'aire mitjançant la utilització d'un gas traçador. Aquesta tècnica considera el balanç màssic d'aquest gas dins de l'hivernacle.

A l'INRA (Institut Nacional de la Recherche Agronomique) i al CEMAGREF de França, com també a l'IRTA de Cabriels, s'han obtingut resultats del comportament de la ventilació natural en funció de la temperatura interior.

Així, s'han realitzat al sud de França mesures de renovació de l'aire pel mètode de la taxa decreixent, utilitzant CO_2 com a gas traçador (ref. 23 i 24). Aquestes mesures s'han realitzat en un hivernacle tipus túnel de 7 m d'ample, 30 m de llarg i 2,85 m d'alt (superfície planta = 210 m^2 ; superfície de parets = 300 m^2 ; volum = 383 m^3).

El túnel ha estat dividit en 5 seccions idèntiques, tal com es mostra a la figura 8.2., mitjançant parets interiors de plàstic. Les dues dels extrems no han estat utilitzades per l'experiment sinó com lloc per guardar els equips necessaris. Les altres tres seccions presenten les obertures següents:

- obertures laterals amb una relació de superfície d'obertures a superfície de planta (A_o/A_t) del 4 %
- obertures variables al sostre amb una relació A_o/A_t del 7 al 23%
- obertures al sostre més obertures laterals de superfície variable (A_o/A_t del 6 a 17 %) que provo-

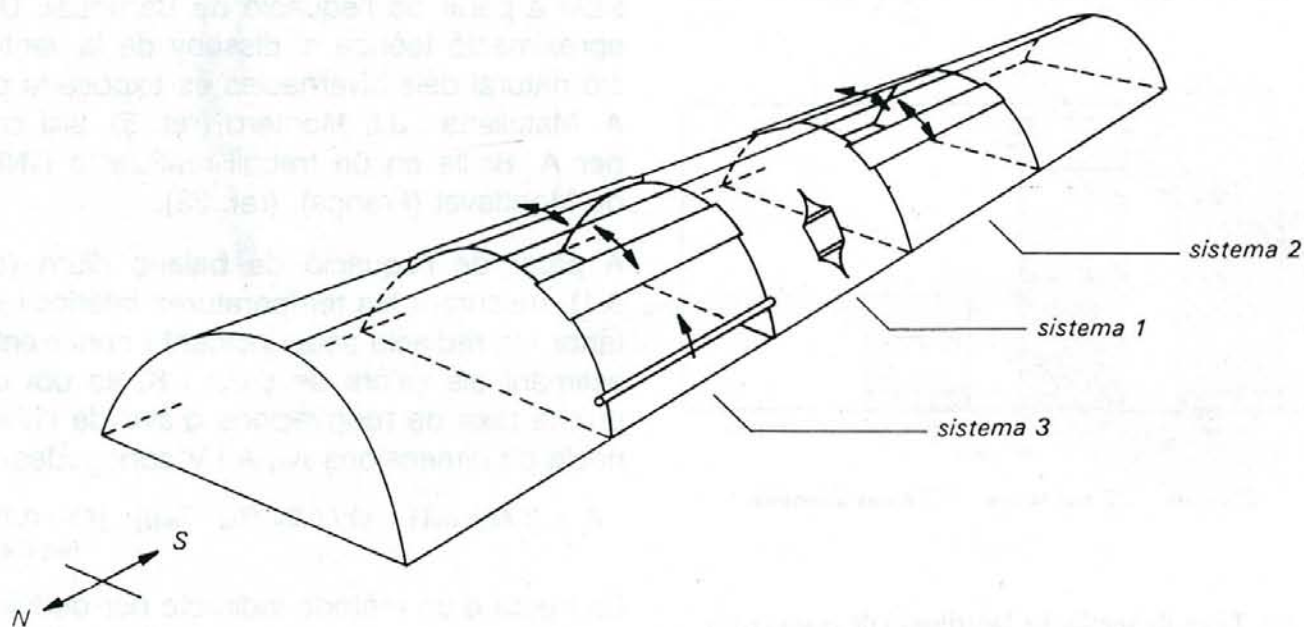


Fig. 8.2. Sistemes de ventilació estudiats en cadascuna de les seccions de l'hivernacle experimental (ref. 23 i 24).

quen un efecte xemeneia

A la figura 8.3. s'hi mostren els resultats globals obtinguts dels experiments realitzats. El millor sistema és el tercer, on s'han obtingut valors de R de l'ordre de 40. Aquest valor s'ha obtingut a partir d'una relació $A_o/A_t = 12\%$ i no ha augmentat pràcticament en valors superiors.

El segon sistema dóna una taxa de renovació que augmenta força regularment amb el percentatge d'obertura a raó d'una renovació suplementària per 1 % de superfície de ventilació de més.

El primer sistema dóna valors de R de l'ordre de 10 a 15, la qual cosa és bastant satisfactòria, considerant la simplicitat del sistema.

A la figura 8.4. s'hi mostra la influència de la velocitat del vent sobre l'índex de renovacions d'aire.

En altres experimentacions realitzades simulant la vegetació, s'hi ha observat que aquest obstacle pot arribar a minvar l'índex de renovacions fins a un 50%.

Així, en el tercer cas analitzat, s'ha d'augmentar fins a un 32% la relació A_o/A_t per obtenir un índex de renovacions de l'ordre de 40.

En general, amb una vegetació més alta de 0,6 m, el segon i tercer sistemes són millors que el primer, que es mostra més afectat per l'alçada de la vegetació.

Tant amb vegetació com sense, l'hivernacle amb obertures a dalt i a baix és millor que

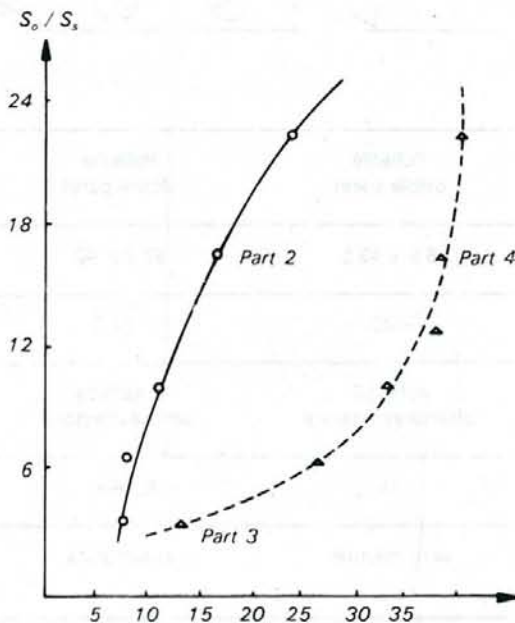


Fig. 8.3. Taxa de renovació en funció de la relació A_o/A_s (ref. 24).

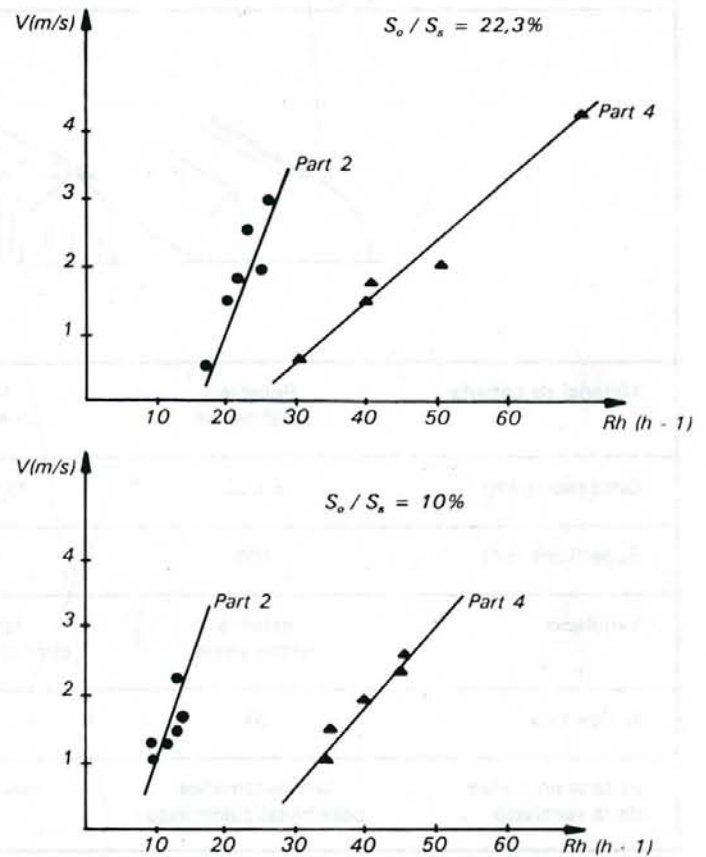


Fig. 8.4. Influència de la velocitat del vent sobre la taxa de renovació d'aire de l'hivernacle (ref. 24).

els altres dos. El disseny més adient i a través del qual s'han obtingut els millors resultats, té una relació $A_o/A_t = 32,2 \%$ amb una proporció d'obertures a baix més gran que a dalt.

El sistema amb obertures a dalt presenta una bona eficiència amb una relació òptima de $S_o/S_t = 15\%$.

En tots els casos, l'índex de renovacions augmenta amb la velocitat del vent.

Altres mesures de ventilació han estat realitzades sobre quatre tipus de sistemes, les

característiques dels quals es mostren a la figura 8.5. Aquests sistemes són:

- un túnel amb el sostre obert
- un hivernacle clàssic amb obertures al sostre
- un túnel amb obertures laterals
- un túnel multicapella amb ventilació mecànica

A la figura 8.6. s'hi mostra el comportament dels diferents sistemes analitzats. Es pot observar el bon comportament del primer sistema molt similar al de ventilació dinàmica.

Tipus d'hivernacles	Túnel sostre obert	Hivernacle clàssic de vidre	Túnel obertures laterals	Túnel multicapella amb ventilació mecànica
				
Material de coberta	Polietilè paret senzill	Vidre sezill	Polietilè doble paret	Polietilè doble paret
Dimensions (m)	8 x 50	13,6 x 36	8,5 x 49,5	26,8 x 40
Superfícies (m ²)	400	490	420	107,2
Ventilació	estàtica sostre obert	estàtica obertures carener	estàtica obertures laterals	dinàmica amb extractors
% Obertura	34	41	11	50 R.H.
Posada en marxa de la ventilació	semiautomàtica possibilitat/automàtica	automàtica	semimanual	automàtica

Fig. 8.5. Tipus d'hivernacles estudiats (ref. 23 i 26).

A la figura 8.7. s'hi compara l'efecte de la ventilació en dos hivernacles de vidre analitzats a Cabrils (Barcelona). El primer té una proporció d'obertures zenitals del 27%, i el segon del 2%. Es van observar unes diferències de temperatura de 3 °C, la qual cosa va implicar una diferència del 10% en la humitat relativa.

En general, pel que fa a la ventilació natural, i com a conclusió, es poden donar les pautes de disseny següents:

- La superfície d'obertures és dins d'uns certs límits, proporcional a la ventilació. La superfície òptima està entre un 15 i un 25% de la superfície de planta.
- Per a hivernacles d'un sol cos les obertures laterals han de tenir la mateixa superfície que les del sostre.

- Les obertures del sostre han de bascular per la part superior i estar disposades al llarg de la seva longitud. L'angle d'obertura màxim en relació a la coberta hauria d'ésser de 60.

- Els hivernacles que només tenen obertures laterals depenen de la pressió del vent per ventilar-se i són, normalment, poc efectius.

- L'obertura automàtica dels practicables de ventilació s'hauria de fer progressivament (en tres passos, per exemple), per tal de prevenir el refredament del cultiu en els dies assolats de l'hivern.

Els sistemes de ventilació automàtics han d'estar equipats amb sensors de pluja i vent per no perjudicar els practicables i el cultiu.

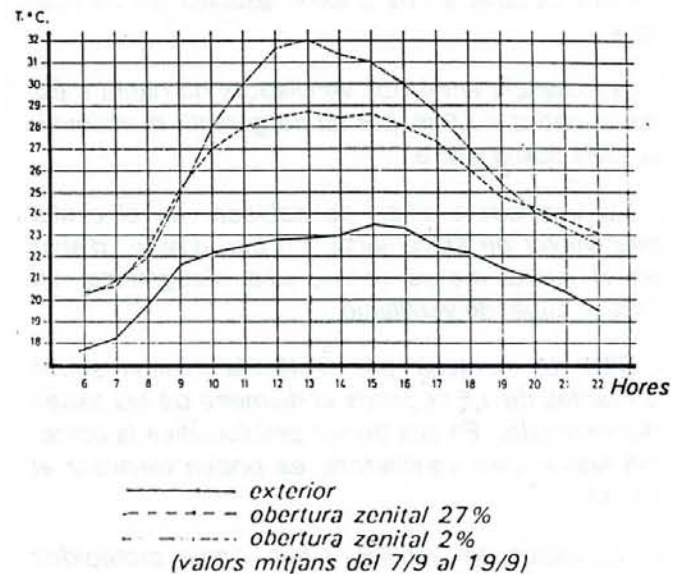
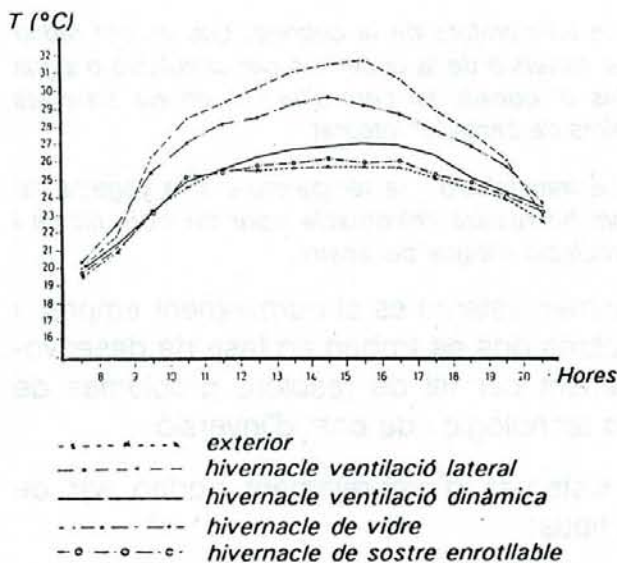


Fig. 8.6. Evolució de la temperatura de l'aire en hivernacles amb diferents sistemes de ventilació (ref. 23 i 26).

Fig. 8.7. Evolució de les temperatures en hivernacles de vidre amb diferents tipus de ventilació (ref. 5).

8.2.3 . Ventilació mecànica

La ventilació mecànica o forçada es realitza mitjançant l'ús de ventiladors emplaçats de forma oposada a les obertures de ventilació. Aquests ventiladors es dimensionen d'acord amb l'índex de 45 a 60 renovacions del volum d'aire de l'hivernacle per hora, per tal de determinar els m^3/h d'aire que ha d'evacuar el ventilador i, en funció de la pèrdua de càrrega existent, establir la seva potència.

El volum d'aire de l'hivernacle s'hauria de corregir en funció de diversos factors, com la velocitat de l'aire i l'alçada de l'hivernacle respecte al nivell del mar. Aquestes dues correccions a l'hora de calcular la calor evacuada per ventilació, no són del tot importants. El càlcul de la potència dels ventiladors, considerant entre 45 i 60 renovacions, és més que suficient.

Segons l'ASAE (ref. 25), a l'hora d'instal·lar un sistema de ventilació mecànica s'han de considerar els aspectes següents:

- Els ventiladors hauran de proporcionar el cabal (m^3/m) calculat a una pressió estàtica de 25 pascals.
- La distància entre dos ventiladors no haurà d'ésser superior a 7,5 m, per tal de garantir la uniformitat dels fluxos d'aire.
- Els ventiladors s'han de col·locar en el costat més ventat de l'hivernacle. En cas d'haver d'anar en el lateral menys ventat, s'ha d'augmentar un 10% el cabal de ventilació.
- S'ha de mantenir una distància mínima sense obstacles de 1,5 vegades el diàmetre de les aspes del ventilador. En cas de ser problemàtica la ubicació lateral dels ventiladors, es poden disposar al sostre.
- Les aspes del ventilador han d'anar protegides amb tela metàl·lica de 1,5 mm de gruix i 13 mm d'obertura. Aquesta pantalla ha d'estar a 100 mm de la part mòbil del ventilador.

- És convenient que els ventiladors disposin d'un regulador de velocitat que permeti variar el cabal en funció de la temperatura interior de l'hivernacle.

8.3. Ombrejament

8.3.1. Introducció

La segona forma i normalment el següent pas que es realitza per refredar és reduir la quantitat de radiació solar que entra dins d'un hivernacle.

Aquesta radiació és la resultant de:

- La radiació solar transmesa per la coberta (τI).
- La temperatura i l'emissivitat de la pròpia coberta i del terra i vegetació de l'hivernacle. Aquesta emissivitat és de longitud d'ona llarga i es determina a partir de la llei de Stefan Boltzman ($\epsilon \sigma T^4$)

Per reduir la quantitat de radiació existent a l'interior de l'hivernacle es pot influir sobre:

- La transmissió de l'hivernacle, bé sigui per blanquejament o per interposició d'una pantalla d'ombrejament.
- La temperatura de la coberta, que es pot reduir per aspersió de la coberta o per circulació d'aigua dins d'aquesta, tal com s'ha vist en els sistemes solars de captador integrat.
- La transmissió i la temperatura a la vegada, tal com ho realitza l'hivernacle solar de vidre filtrant i circulació d'aigua pel sostre.

El primer sistema és el normalment emprat, i els altres dos es troben en fase de desenvolupament per tal de resoldre problemes de tipus tecnològic i de cost d'inversió.

Els sistemes d'ombrejament poden ser de dos tipus:

- Ombrejament permanent: blanquejament de la coberta o pantalla en posició fixa, tant a l'exterior com

a l'interior.

- *Ombrejament mòbil: pantalla que es posa manualment o automàticament per reduir la temperatura i el nivell de radiació interior.*

8.3.2 Emblanquinament

L'emblanquinament o encalcinat és un mètode molt utilitzat en el cultiu de flor tallada i planta ornamental. A la comarca del Maresme s'ha comptabilitzat una superfície encalcinada que representa un 20% sobre el total de proteccions i hivernacles. D'aquesta superfície, n'hi ha un 86% de color blanc i un 14% d'una altra coloració (vermell, blau o verd). La superfície dels hivernacles encalcinats es reparteix en parts iguals entre el cultiu de flor tallada i el de planta ornamental, encara que la proporció que representa dins de cada cultiu és del 17% i 16% respectivament per a cada cultiu.

La principal característica d'aquest tipus d'ombrejament és la seva manca de selectivitat a la radiació solar, ja que la transmissió

és, de fet, homogènia al llarg de tot l'espectre solar, encara que la seva aplicació sobre la coberta, en ser heterogènia, fa que en varïïn les seves propietats òptiques.

L'encalcinat de parets, juntament amb la ventilació natural, permet obtenir, en general, unes temperatures de l'ambient interior properes a les de l'exterior. A la figura 8.8. s'hi pot constatar aquest fet i es pot apreciar com l'escalfament de la paret és considerable. En definitiva, es tracta d'un sistema que permet mantenir unes temperatures confortables a l'interior a expenses de reduir la radiació transmesa punint d'aquesta forma la fotosíntesi i el creixement del cultiu.

8.3.3. Pantalles d'ombrejament

Les pantalles d'ombrejament poden ser fixes o mòbils. Els materials d'ombrejament són molt variats, sobretot des de l'aparició en el mercat d'un gran nombre de teixits en materials diversos com acrílic, polipropilè, políester, poliamida, etc. Aquests teixits disposen d'una gamma variada de porositat a l'aire i de transmissió a la radiació solar. A la taula 8.1., s'hi mostren les característiques òptiques en l'espectre visible de diferents tipus de material de pantalla.

Actualment existeixen pantalles d'ombrejament aluminitzades que reflecteixen una gran part de la radiació a l'exterior i que, també, poden ser utilitzades com a pantalla tèrmica per reduir el consum de calefacció a l'hivern.

Les pantalles d'ombrejament fixes s'utilitzen bàsicament en els umbracles, estructures productives cobertes amb un material permeable capaç de disminuir la intensitat de la llum i sense possibilitat de ser climatitzades. A la comarca del Maresme els umbracles

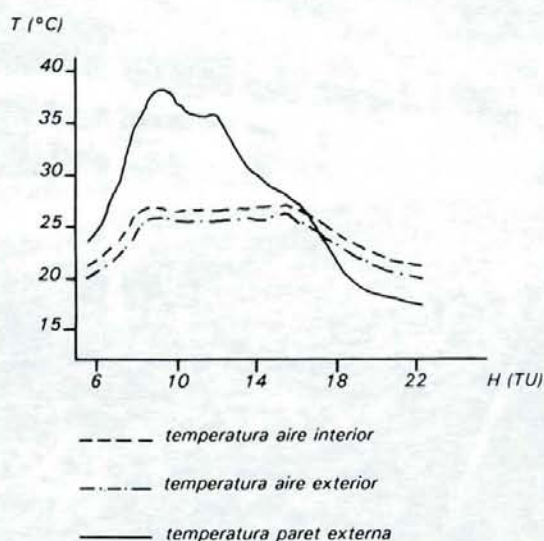


Fig. 8.8. Evolució de les temperatures de l'aire interior i exterior i de la temperatura de la paret en un hivernacle emblanquinat (ref. 23).

representen el 6,2 % de les estructures productives existents (vegeu taula 3.1). Més del 95 % utilitzen malla negra i la resta d'altres materials menys freqüents, com la malla blanca i fins i tot les canyes o el bruc. L'estructura és de fusta en un 78 % dels casos i la forma més corrent (52 %) és a dos vessants, encara que la forma plana és la solució més adient ja que no hi ha necessitat de donar pendent per evacuar les aigües. Aquest predomini d'umbracles a dos vessants s'explica pel fet que sovint es converteixen en umbracles estructures utilitzades anteriorment com a hivernacles. De la superfície total d'umbracles, un 73 % es dedi-

ca al cultiu de planta ornamental en test i el 27 % restant a la flor tallada.

Les pantalles d'ombrejament mòbils s'utilitzen a l'exterior o a l'interior de proteccions i, sobretot, d'hivernacles. En alguns casos, es tracta d'un element semifix que es posa quan arriba la calor. Els sistemes pròpiament mòbils són més sofisticats, sobretot quan són automàtics, ja que, a més de la pantalla, s'ha d'instal·lar un sistema mecànic per desplaçar-la a còpia de cables, politges, motors i en alguns casos transmissions tipus cardan.



Foto 9: Pantalla d'ombrejament.

En aquests sistemes més sofisticats, la pantalla es col·loca automàticament quan el nivell de radiació exterior arriba a un valor donat (per exemple 500w/m^2) que pot ésser mesurat per un sensor de radiació (solarímetre o luxòmetre) situat preferiblement a l'exterior, encara que en alguns casos si no hi ha massa obstacles es col·loca a l'interior.

Els sistemes d'ombrejament mòbils emprats a la comarca del Maresme són més aviat senzills, i s'utilitzen en un 17% d'hivernacles dedicats al cultiu de planta ornamental (57%) i flor tallada (43%). El material més emprat és la malla negra (43,7%), mentre que la superfície ombrejada amb malla blanca és molt inferior (12%). La placa de políester envellida es fa servir, fonamentalment, en proteccions. Com s'observa a la taula 8.2, els materials o sistemes més sofisticats tan

sols representen un 12% dels hivernacles o proteccions amb ombrejament analitzats.

Les mesures obtingudes en dos hivernacles - un d'ells encalminat i l'altre amb pantalla del 80% d'ombrejament - mostren (fig. 8.9) unes temperatures semblants: de 2 a 3 °C per sobre de l'exterior i amb un lleuger avantatge en l'hivernacle emblanquinat.

S'han realitzat altres mesures amb teixits aluminitzats a base de polièster i bandes d'alumini que poden presentar diferents factors d'ombrejament. La col·locació de la pantalla s'ha realitzat durant l'experiment a partir d'una llinda de radiació solar de 600w/m^2 . Aquesta radiació durant l'estiu, com es pot observar a la figura 8.10, correspon

Taula 8.1. Característiques òptiques de diversos materials de pantalla ombregadora (ref. 23).

Nom comercial	Material	Propietats òptiques (400-700)nm	
		Transmissió	Reflexió
Cambrelle 60	polipropilè poliamida	60-65	33
Floralex 60	polièster	55-60	47
Floralex 60	polièster	40-45	56
Reemay 2016	polièster	50-65	29
Acryl W40	acrílic	50-55	47
Acryl W65	acrílic	45-50	53
Fibertex		25-30	50
Kval. 300854	polièster 67%, acrílic 33%	40	-
Kval. 330968	polièster	50	-
Kval. 3601002	polièster	65	-

Taula 8.2. Distribució de la superfície (ha) de proteccions i hivernacles amb ombreig segons el material emprat (ref. 1).

Material d'ombreig	Col·locació exterior	Col·locació interior	Superfície (ha)
Malla negra	7,5 ha	10,5 ha	18,0
Malla blanca	2,1 ha	2,9 ha	5,0
Malla acrílica	-	-	1,3
Malla aluminitzada	-	-	0,4
P.polièster (envellida)	-	-	13,4
Mixtos (*)	-	-	3,1
TOTAL	-	-	41,2
(*) Mixt.-S'hi inclouen aquelles estructures productives que tenen més d'un material d'ombreig. La més freqüent és la coexistència de malla blanca exterior i malla negra interior.			

al període comprès entre les 9 hores del matí i les 16 hores de la tarda. A la figura 8.10, també s'hi pot observar l'evolució de la diferència de temperatura entre l'interior i l'exterior en comparació amb un hivernacle encalminat. Aquesta diferència és de l'ordre de 3 a 4 °C per a la pantalla d'ombreament, i pot augmentar fins a 7-8 °C quan les condicions són de vent molt feble. Aquestes diferències importants són degudes a la disminució de l'índex de renovació d'aire quan la pantalla està posada, la qual cosa explica el millor comportament tèrmic de l'hivernacle encalminat.

La porositat natural de les pantalles aluminitzades no és suficient per garantir un bon índex de renovació. Serà, doncs, important deixar uns espais entre els diferents trams de pantalla per tal d'afavorir l'efecte xemeneia. L'elecció entre l'encalminat i la pantalla d'ombreament és una qüestió d'inversió econòmica. Una pantalla d'ombreament ben gestionada permet modular la transmissió de l'hivernacle i aconseguir la radiació òptima per a la fotosíntesi en cada moment.

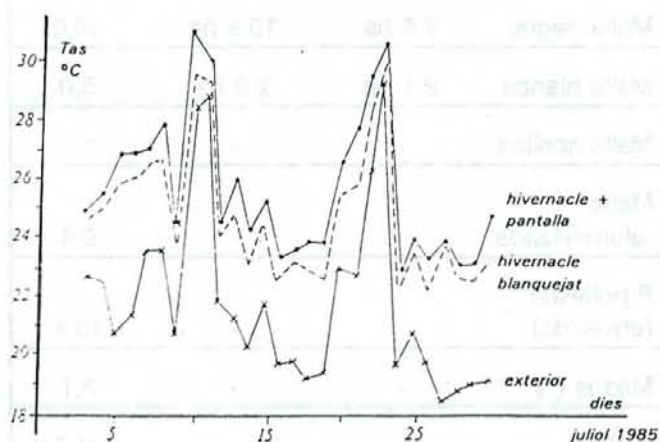


Fig. 8.9. Evolució de les temperatures diürnes en un hivernacle emblanquinat i en un altre amb pantalla d'ombreament (ref. 23).

Altres experiències s'han realitzat en un hivernacle tipus túnel amb el sostre obert, analitzant el comportament de diversos materials d'ombreament i mecanismes de desplegament, i també emprant diferents criteris de regulació.

Les conclusions obtingudes en aquest estudi (ref. 26) són :

- Les pantalles fixes no són recomanables perquè afecten negativament el cultiu.
- La pantalla aluminitzada és la que dona millors resultats.
- Una pantalla d'ombreament mòbil s'ha de rendibilitzar utilitzant el mateix mecanisme per col·locar una pantalla tèrmica en les nits de l'hivern.
- Les pantalles aluminitzades poden assolir aquesta doble funció, encara que s'ha d'estudiar a fons la seva gestió òptima d'estiu conjuntament amb la ventilació i la nebulització.
- Una pantalla aluminitzada amb un 50-60 % d'ombreament sembla, en principi, un bon compromís entre reduir la transmissió de l'hivernacle durant la nit, i, per tant, la demanda de calor a l'hivern, i proporcionar un índex de renovacions d'aire suficient durant el dia a l'estiu.

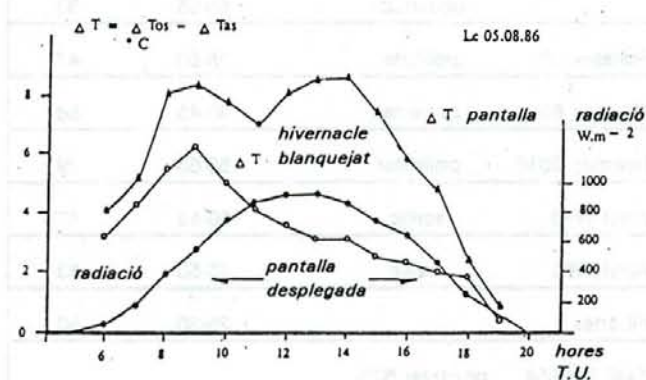


Fig. 8.10. Evolució de la diferència de temperatures entre l'interior i l'exterior en un hivernacle emblanquinat i en un altre amb pantalla aluminitzada (ref. 23).

8.4 Refredament d'hivernacles per evaporació

8.4.1 Introducció

Hi ha dos camins més per reduir la temperatura interior de l'hivernacle, que es fonamenten en l'absorció de la calor latent d'evaporació de l'aigua.

El primer consisteix a refredar l'aire exterior en evaporar l'aigua d'uns panells abans d'entrar en l'hivernacle.

El segon camí transforma l'energia radiativa en calor latent, disminuint la calor sensible de l'hivernacle, i, per tant, la seva temperatura.

L'anàlisi dels mecanismes del mètode de refredament per evaporació és convenient de realitzar-la sobre el diagrama de Molière en

relació a la ventilació natural o forçada abans esmentada.

A la figura 8.11, s'hi mostra sobre el diagrama l'evolució de les temperatures i humitats en el cas d'existir ventilació i evapotranspiració, o no. Així, l'aire d'entrada a la temperatura $T_e(A)$, en condicions normals de ventilació, augmenta la seva temperatura i humitat fins al valor $T_i(B)$. En cas de no existir ventilació o evapotranspiració, el punt representatiu hagués estat B_1 o B_2 , i en cas de no existir cap d'aquestes dues vies de refredament, el punt seria B_3 .

La importància de combinar la ventilació i la humectació és, doncs, evident. Els sistemes d'humectació més emprats en hivernacles són la pantalla evaporadora i la nebulització.

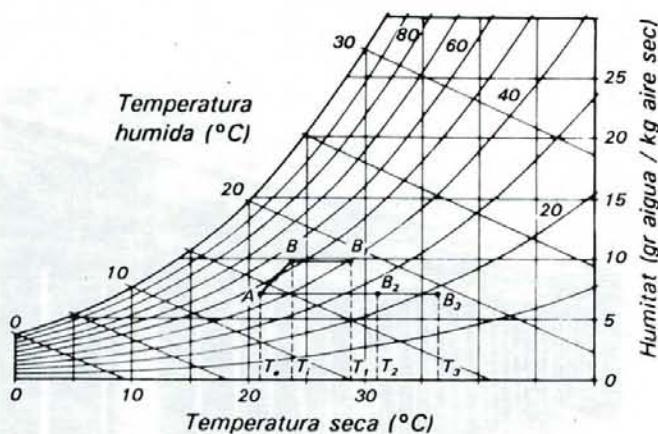


Fig. 8.11. Diagrama de l'aire humit. Efecte de la ventilació i evapotranspiració.

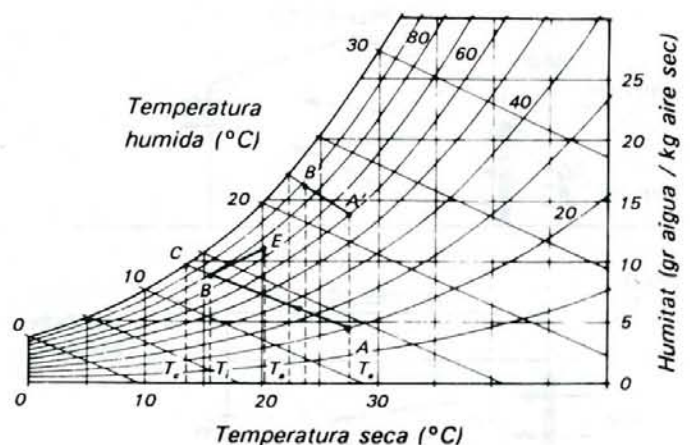


Fig. 8.12. Diagrama de l'aire humit. Efecte dels panells evaporadors.

8.4.2 Refredament per panells evaporadors

El sistema consisteix, essencialment, a refredar, tot saturant d'humitat l'aire exterior introduït en l'hivernacle en fer-lo passar per unes pantalles molles d'aigua.

L'aire exterior a una temperatura T_e (A) es refreda fins al punt B de temperatura T_i propera a la saturació (T_c). L'eficiència del sistema es defineix com $E = (T_e - T_i) / (T_e - T_c)$ i és de l'ordre del 80 a 90% per a la majoria de sistemes existents al mercat. A la figura 8.12, s'hi mostra com l'aire que entra en la pantalla a temperatura de 28 °C i 20% d'humitat relativa (A) surt a 16 i 80% d'humitat (B) la qual cosa implica una eficiència del 90%. Si entrés a 28 °C i 60% (A'), sortiria a 23 i 95% (B'). Aquest aire dins de l'hivernacle es recalfa i s'humidifica per sortir a una temperatura T_s (punt E).

El factor limitant és la temperatura humida de l'aire ambient introduït en l'hivernacle. El refredament serà més important com més sec sigui l'aire exterior i, per tant, aquest sis-

tema serà més eficient en climes calurosos i secs que en climes humits. En el millor dels casos es pot aconseguir una diferència de temperatures de 5 °C.

El sistema de refredament per evaporació pot treballar per depressió o sobrepressió. En el primer cas, l'hivernacle ha de tenir bona estanqueïtat.

Els dos problemes més importants que es plantegen són la velocitat de l'aire i el gradient de temperatures que s'origina entre els dos extrems de l'hivernacle.

Els materials emprats en la pantalla poden ser a base de fibres de fusta o cel·lulosa alveolar. En la part superior es realitza la humidificació per goteig i en la inferior es recupera i recicla mitjançant una bomba l'aigua no evaporada.

La regulació pot realitzar-se sobre la ventilació a partir d'un termòstat ambient o sobre la humidificació a partir d'un higròstat.

Els sistemes de refredament amb pantalles evaporadores, així com la ventilació mecànica

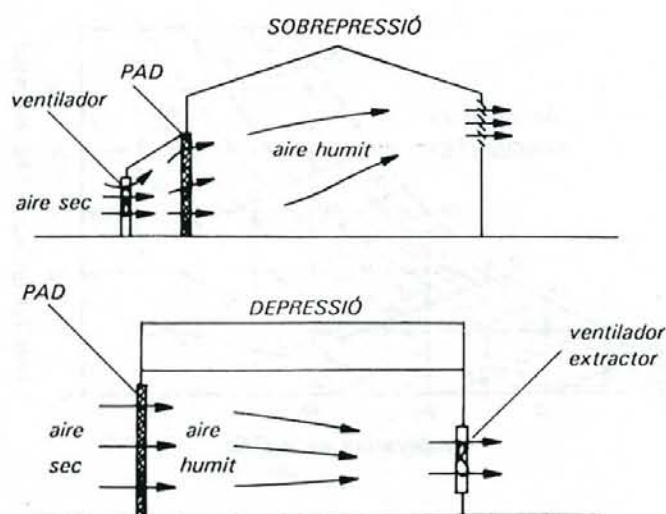


Fig. 8.13. Pannells evaporadors per depressió i sobrepressió.



Foto 10: Pannells evaporadors.

ca, són molt poc utilitzats a Catalunya. Als EUA, en canvi, aquests sistemes han adquirit molta importància i l'ASAE (ref. 25), de la mateixa forma que amb la calefacció i la ventilació mecànica, dóna una sèrie de recomanacions per a la seva instal·lació correcta. Les més importants d'aquestes recomanacions són:

- La distància òptima entre pantalla i ventilador és de 30 a 70 m. Quan els hivernacles són molt llargs s'han d'instal·lar ventiladors al punt mitjà del sostre i pantalles en ambdós extrems.
- Les velocitats de l'aire òptimes a través de la pantalla oscil·len entre 0,75 i 1,75 m/s, segons el tipus de material i el seu muntatge.
- Les pantalles han de poder refredar l'aire uns 3 °C amb una pèrdua de càrrega inferior a 15 pascals.
- Les pantalles se situen de forma contínua en un lateral o frontal de l'hivernacle. Per tal d'obtenir un flux d'aire uniforme, l'alçada de la pantalla no ha d'ésser ni superior a 2,5 m ni inferior a 0,6 m.
- L'entrada d'aire a les pantalles s'ha de poder tanca i és convenient de situar-la a sobrevent.
- El cabal màxim d'aigua en una pantalla horitzontal és de 0,4 l/min per m² de pantalla.

- En pantalles verticals, el cabal mínim oscil·la entre 4 i 10 l/min per metre lineal de pantalla i el volum del dipòsit de recollida és de 20 i 40 litres/m² de pantalla (ambdós valors depenen del material emprat).

8.4.3 Aspersió i nebulització d'aigua

La nebulització transforma una gran proporció de l'energia solar rebuda en calor latent, per l'evaporació de les gotes d'aigua emeses per l'equip nebulitzador. Aquestes gotes poden ser superiors o inferiors a 200 µm, segons es tracti d'aspersió o de nebulització.

La nebulització, pel fet de realitzar-se sense ventilació, es troba en desavantatge respecte al refredament per evaporització. És important, doncs, alternar períodes de nebulització i de ventilació, o trobar l'obertura òptima dels practicables de ventilació compatible amb la utilització d'aquests sistemes.

A la figura 8.14, s'hi mostren els resultats obtinguts en l'assaig de tres sistemes d'aspersió: un al sostre, altre a l'interior de l'hivernacle i l'altre que combina ambdós tipus

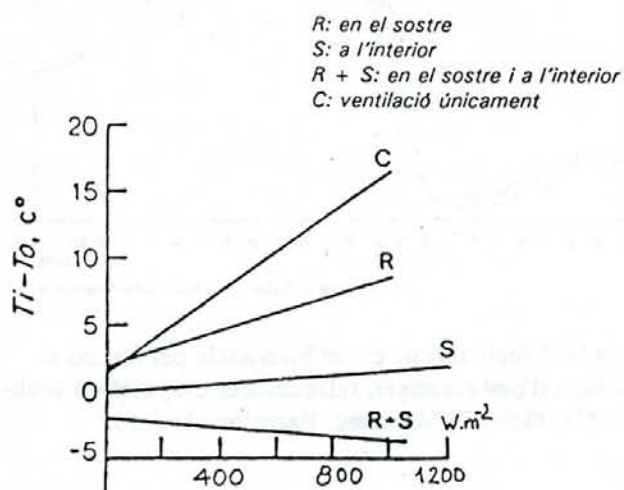


Fig. 8.14. Refredament per aspersió: efecte sobre la diferència de temperatures $T_i - T_e$ (ref. 23).

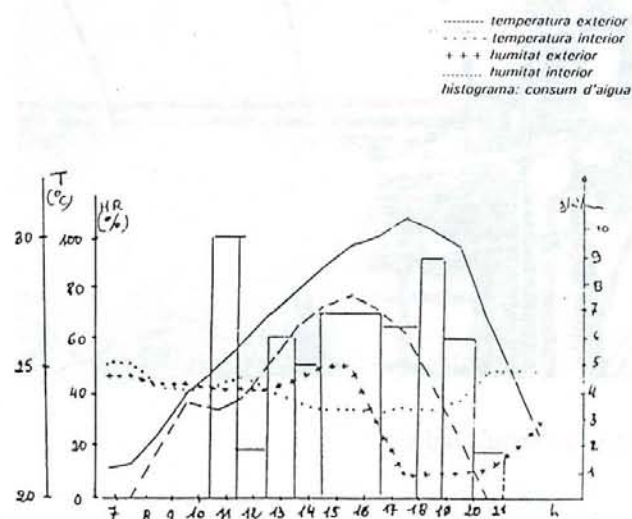


Fig. 8.15. Refredament per nebulització. Efecte sobre la temperatura i el consum d'aigua (ref. 23).

d'aspersió. L'aspersió més eficient és la que es realitza a l'interior de l'hivernacle.

La nebulització o "fog" proporciona unes gotes molt petites que s'evaporen més fàcilment, no mullen, per tant, els òrgans de les plantes.

El material utilitzat per produir la nebulització pot treballar a baixa i alta pressió.

El comportament d'aquests sistemes és satisfactori a condició que es gestioni bé l'aïreig. A la figura 8.15, s'hi mostren els valors de la temperatura i humitat d'un sistema de nebulització comprovat al sud de França.

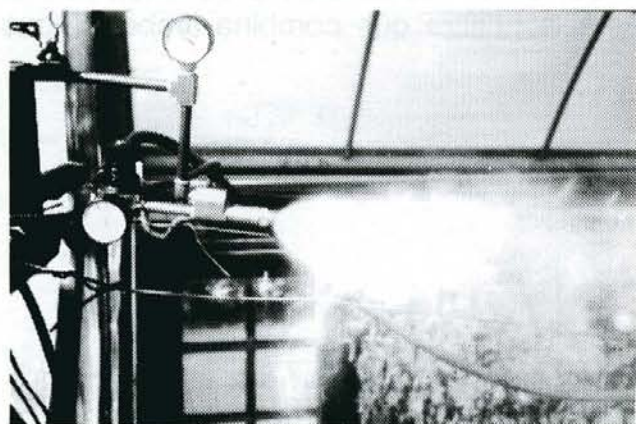


Foto 11: Nebulitzadors.

La nebulització es mostra més eficient a l'hora de refredar que la pantalla d'ombrejament i la ventilació. Però la utilització conjunta de la ventilació, l'ombrejament i el refredament evaporatiu pot proporcionar unes condicions de cultiu molt adients. Així, a la figura 8.16, s'hi mostra l'evolució de la temperatura en un hivernacle del Maresme dedicat a la planta ornamental. En aquest cas, la radiació es va mantenir per sota dels 120 Watts/m² i la utilització conjunta de ventilació mecànica i pantalla evaporadora (cooling system) va fer que la temperatura interior baixés per sota de l'exterior.

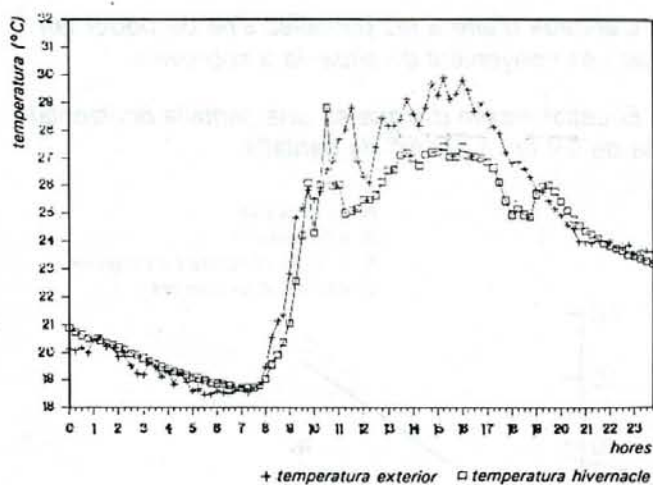


Fig. 8.16. Efecte tèrmic en un hivernacle per l'acció simultània d'ombrejament, refredament evaporatiu i ventilació (11/09/88) El Maresme. Barcelona (ref. 5).

CAPÍTOL 9. REGULACIÓ DEL CLIMA INTERIOR

9. REGULACIÓ DEL CLIMA INTERIOR

9.1. Introducció

El clima interior d'un hivernacle depèn, tal com ha estat determinat en l'equació general de balanç tèrmic, de les característiques constructives de l'hivernacle: geometria, materials, etc., i del nivell de radiació solar, temperatura, humitat i velocitat de vent de l'ambient exterior.

Els paràmetres climàtics més importants a controlar dins d'un hivernacle són la intensitat de llum, la temperatura i la humitat. Altres paràmetres ambientals, com el contingut de CO₂ de l'aire, són també importants de controlar per tal d'afavorir el creixement de les plantes. Totes aquestes condicions ambientals poden ser òptimament assolides mitjançant la utilització d'una sèrie d'equips, com la calefacció, les pantalles tèrmiques i d'ombrejament, la ventilació, la il·luminació, la nebulització, etc.

Les variacions climàtiques exteriors i el nombre d'equipaments que es poden utilitzar dins d'un hivernacle fan necessari que la seva utilització sigui gestionada, i és aquest el paper que juga la regulació. Aquesta regulació pot ser individual per a cada paràmetre o gestionada de forma conjunta.

La regulació individual permet mantenir cadascun dels factors climàtics al voltant d'un valor determinat o de consigna. Així, per exemple, la temperatura d'un hivernacle en el període fred es mantindrà estable per la regulació de la calefacció. En el període atemperat aquesta mateixa temperatura es podrà mantenir estable gràcies a l'acció combinada de la ventilació i l'ombrejament,

regulats de forma independent. Ara bé, atès que aquests dos equipaments afecten d'altres factors climàtics com la humitat relativa, la llum, etc., és interessant considerar la regulació de forma conjunta o combinada.

La regulació combinada o gestió climàtica d'un hivernacle permet mantenir el conjunt de factors climàtics al voltant dels valors de consigna respectivament. Aquesta regulació global és realitzable gràcies a un microordinador, que fa possible, per exemple, governar al mateix temps les temperatures, la llum i la humitat en qualsevol tipus d'hivernacle i realitzar altres funcions, com ara l'emmagatzematge de calor en un hivernacle solar.

El sistema de regulació realitza bàsicament tres operacions:

- *La mesura de la temperatura, humitat, etc.*
- *La comparació d'aquesta dada amb la de consigna.*
- *El càlcul d'alguna altra variable secundària.*
- *L'actuació sobre un element, com vàlvula, motor, etc., en cas d'existir un diferencial entre la mesura i la consigna.*

Les mesures es realitzen amb diferents elements sensors segons el tipus de factor climàtic a regular.

La temperatura es mesura normalment mitjançant termoparells o termopiles que proporcionen un voltatge. Les més fiables són les sondes de platí (PT-100). Aquestes sondes són encapsulades de formes diferents segons si la temperatura a mesurar és la de l'aire, la de l'aigua o la del terra.

Altres elements per mesurar les temperatures són els termistors, que precisen d'una excitació elèctrica, i els termòmetres de mercuri, els més senzills però no aptes per a la

regulació, encara que permeten calibrar altres sensors.

Els termòstats són un cas especial, ja que, a part de fer la mesura, realitzen el control de la temperatura actuant sobre l'equipament que regulen. Els termòstats es basen en la dilatació d'un metall que, segons la temperatura establerta, posa en marxa l'element d'actuació o l'atura.

La intensitat de llum pot ser mesurada mitjançant luxímetres que indiquen una intensitat (en lux) i piranòmetres o solarímetres que mesuren l'energia lluminosa en Watts.

La humitat relativa pot ser mesurada de moltes formes diferents utilitzant diverses propietats físiques o químiques. Els mètodes indirectes utilitzen alguna propietat de canvi del material, sensible al vapor d'aigua, mentre que els mètodes directes permeten una determinació més directa del paràmetre que caracteritza el contingut de vapor d'aigua de l'aire.

Els instruments més corrents que s'utilitzen en el mètode indirecte són els higròmetres, que poden ser de cabell, d'infraroig o de clorur de liti. Aquests aparells no poden ser utilitzats per a una regulació automàtica. El mètode directe utilitza tres tipus d'aparells: els higròmetres de difusió i de punt de rosada, el psicòmetre i l'higròmetre de resistència elèctrica o sensor capacitiu. El psicòmetre mesura les temperatures seca i humida i la humitat relativa es dedueix d'una carta psicomètrica. El sensor capacitiu és el més interessant per realitzar mesures contínues i es basa en la variació de la capacitat elèctrica en funció de la humitat relativa.

La velocitat del vent es mesura mitjançant els anemòmetres, que poden ser de cassolletes o de filament calent. Els més recoma-

nables per mesurar de forma contínua la velocitat del vent són els de cassolleta, mentre que els de filament són interessants per a mesures puntuals.

La pluja es mesura mitjançant un sensor d'acer inoxidable en forma de matriu escalada elèctricament per evitar falses commutacions en cas de condensacions. El sensor

Taula 9.1. Gestió climàtica i d'equipaments. Paràmetres de mesura.

Estació metereològica	Temperatura de l'aire Higrometria relativa Assolellament Velocitat del vent Direcció del vent Detecció de pluja
Als hivernacles	Temperatura ambient Higrometria relativa Percentatge de CO ₂ Posició d'obertures Posició de pantalles Temperatura del sòl Temperatura de la solució nutritiva Temperatura de l'aigua (circuit de calefacció)
Dins les instal·lacions d'irrigació i fertilització	pH Conductivitat Nivell de solució nutritiva Detecció de cabal Temperatura de l'aigua Drenatge
Dins els aparells de calefacció	Temperatura de l'aigua Cabal d'aigua Posició de vàlvules Temperatura dels fums Percentatge de CO ₂ Cabal de combustible

es connecta a un sistema electrònic que detecta la presència d'aigua.

Els controls efectuen la comparació de mesures, que pot ser realitzada per reguladors, microprocessadors o microordinadors. El regulador permet administrar o gestionar una funció. El microprocessador permet gestionar diverses funcions conjuntament i el microordinador pot regular totes les funcions del clima, les unes en relació amb les altres. Tots aquests aparells envien les ones mitjançant relès elèctrics als elements de reglatge. Aquests elements són normalment motors que intervenen en la calefacció, la ventilació, els sistemes de refredament, etc. Els motors actuen sobre bombes, vàlvules mescladores, pantalles tèrmiques, ventiladors, practicables, etc. Alguns d'aquests equips funcionen mitjançant actuacions **"tot o res"** de forma progressiva i fins i tot n'hi ha alguns que són modulables.

9.2. Tipus de regulació i actuacions

La regulació pot ser manual i automàtica.

La regulació manual és la que realitza el mateix cultivador sobre alguns dels equips encarregats de mantenir l'hivernacle en condicions de confort ambiental. Aquesta regulació s'utilitza per ventilar, col·locar la pantalla tèrmica o la d'ombrejament i fins i tot controlar el grau d'humitat ambiental. Excepcionalment els hivernacles freds, on es pot posar en marxa un sistema d'escalfament anti-gelades, la calefacció no acostuma a ser regulada manualment.

La regulació manual és molt aleatòria, ja que depèn de la supervisió i apreciació humana, perquè moltes vegades no hi ha aparells de mesura i els factors climàtics són estimats

pel productor. De tota manera, aquesta actuació manual pot ser indispensable en situacions climàtiques extremes, o quan el sistema de regulació presenta fallides que s'han de corregir manualment. La possibilitat de realitzar una actuació manual sobre alguns dels equipaments emprats ha d'estar prevista en qualsevol hivernacle, independentment de la regulació automàtica existent.

La regulació automàtica pot ser mecànica, electromecànica o electrònica.

La regulació mecànica i electromecànica permeten regular un factor climàtic en funció dels valors d'aquest factor. Així, la temperatura i la il·luminació són regulades en funció de les mesures de temperatura i de llum, respectivament.

La regulació electrònica permet regular un paràmetre en funció d'un altre, per exemple, la temperatura en funció de la llum. D'aquesta forma, un factor és gestionat a la vegada en funció del seu propi valor i del valor d'un altre factor. Per una altra banda, els valors de consigna establerts per a cada factor climàtic poden ser diferenciats segons cada període mitjançant la utilització d'un rellotge, i així es podrà establir, per exemple, una temperatura de consigna de dia i una altra de nit.

Les actuacions poden ser **"tot o res"** o progressives. En la primera, l'element de reglatge només pot tenir dues posicions: engegat o aturat. Així, una primera consigna posa en marxa l'equip i una segona consigna l'atura. El factor climàtic oscil·la entre aquests dos valors. La regulació progressiva modula la intensitat amb la qual funciona un equip. Permet mantenir més fàcilment un factor climàtic al voltant d'un valor òptim.

9.3. Regulació dels equips

9.3.1. Regulació de la calefacció

La regulació de la calefacció permet ajustar la temperatura interior de l'hivernacle a la temperatura de consigna establerta a partir de la mesura d'aquesta temperatura interior o de la mesura de la temperatura exterior. En aquest cas, la regulació treballa per anticipació. La regulació pot considerar dues temperatures de consigna: una de dia i una altra, normalment més baixa, a la nit. La regulació de calefacció clàssica més senzilla és la que funciona com "**tot o res**". Es compon d'un termòstat que fixa una temperatura mínima a partir de la qual es posa en marxa la bomba i una temperatura màxima que l'atura. La instal·lació d'un rellotge permet fixar una temperatura de dia i una altra de nit.

El pas següent serà utilitzar una regulació progressiva que posi en marxa la calefacció de dues maneres diferents: una per la sonda interior (regulació ordinària) quan la temperatura exterior no varia i l'altra per la sonda exterior (regulació suplementària ràpida) quan la temperatura exterior varia i únicament durant aquesta variació.

En els sistemes de calefacció per circulació d'aigua que treballen a baixa temperatura, ja sigui escalfant l'aire (convectors) o el terra, la regulació es realitza en fixar la temperatura de l'aigua d'anada. L'actuació es realitza sobre una o diverses vàlvules mescladores, segons el nombre de circuits, i pot existir per a cada circuit una sonda d'ambient i una sonda d'anada. El regulador mesura la temperatura ambient o del terra, calcula el valor òptim de la temperatura de l'aigua d'anada i ajusta la posició de la vàlvula que mescla el

fluid d'anada amb el de retorn per assolir la temperatura òptima calculada.

9.3.2. Regulació de la ventilació

La regulació de la ventilació també permet regular la temperatura interior de l'hivernacle, mantenint-la per sota d'un valor màxim de consigna prefixat. Independentment, aquesta regulació permet limitar l'excés d'humitat o la manca de CO₂.

Moltes vegades la ventilació no és suficient per controlar aquests factors climàtics. Així, complementàriament, la temperatura és regulada per l'ombrejament, la nebulització, etc.. La humitat ho és per la calefacció i el contingut de CO₂ pel seu aportament artificial.

La regulació electrònica dels practicables de ventilació es pot realitzar de forma progressiva cercant la posició òptima en donar impulsions d'obertura o de tancament fins a l'instant en què la temperatura de l'hivernacle s'estabilitza en la zona neutra del regulador. Cada impulsió de duració regulable en segons és seguida per una pausa de duració regulable en minuts per permetre que la temperatura s'estabilitzi.

A part de la temperatura, els practicables de ventilació poden ser actuats tenint en compte la velocitat i la direcció del vent, com també l'existència de pluja. Així, quan la velocitat del vent, mesurada amb l'anemòmetre, sobrepassa el valor de consigna, es tanquen els practicables exposats al vent dominant i resten tancats per una temporització programable en minuts per evitar tancaments i obertures contínues en cas de vent a ràfecs.

El sensor de pluja s'utilitza per donar una ordre de tancament als quadres elèctrics de control dels practicables.

9.3.3. Regulació de la pantalla d'ombrejament o tèrmica

Permet la col·locació automàtica de la pantalla d'ombrejament o tèrmica dins de l'hivernacle segons el nivell de lluminositat existent a l'exterior.

En el cas d'una pantalla tèrmica, essencialment col·locada per la nit, el funcionament pot ser activat mitjançant un rellotge. Les hores de tancament i d'obertura de la pantalla han de respondre a un compromís entre l'estalvi de calefacció i les necessitats fotosintètiques de les plantes, particularment quan les pantalles són opaques a la llum. En aquest cas, el tancament es fa d'un sol cop, mentre que l'obertura pot ser progressiva. D'aquesta forma, es redueix la quantitat d'aire fred sobre les plantes i es limita el seu xoc tèrmic.

Actualment, existeixen al mercat pantalles parcialment aluminitzades que realitzen la doble funció d'ombrear i de constituir parcialment un apantallament tèrmic nocturn. En aquest cas, el nivell de lluminositat pot ser programat, establint una llinda per sota de la qual es tanca la pantalla completament (funció pantalla tèrmica de nit) i un altre nivell per sobre del qual es tanca parcialment (pantalla d'ombrejament). En qualsevol cas, l'obertura és gradual o progressiva per evitar variacions ràpides de la temperatura sobre les plantes, i és programable la duració de l'actuació cíclica d'obertura (en segons) i la de la pausa entre dos actuacions (en minuts).

9.3.4. Regulació de sistemes de calefacció amb energia solar

Tots els sistemes que aprofiten l'energia solar en qualsevol de les tipologies abans esmentades de captació separada, integrada o que utilitzen l'hivernacle com a captador solar disposen d'un emmagatzematge tèrmic, normalment a curt termini, o sigui del dia per a la nit. En aquests sistemes hi haurà dues funcions bàsiques a regular: la càrrega i la descàrrega de l'emmagatzematge de calor.

Ambdues funcions són regulades en realitzar la mesura i la comparació de les temperatures del captador o de l'hivernacle amb la de l'emmagatzematge. Així, el procés de càrrega es realitza quan la temperatura de l'aigua o aire de la captació és superior en un valor de consigna determinat a la temperatura de l'emmagatzematge tèrmic. La recuperació de la calor emmagatzemada es realitza quan la temperatura de l'aire ambient de l'hivernacle està per sota d'un valor absolut de consigna prefixat i al mateix temps és inferior en un diferencial establert a la temperatura de l'emmagatzematge. En qualsevol cas, l'actuació es realitza sobre una bomba de circulació d'aigua o un ventilador que transporten l'energia tèrmica des de la captació a l'emmagatzematge o des d'aquest últim cap a la seva distribució dins de l'hivernacle.

9.3.5. Regulació de la nebulització

La nebulització permet refredar l'hivernacle a canvi d'augmentar el contingut d'humitat de l'aire. Les electrovàlvules són accionades seqüencialment amb un temps d'obertura programable (en segons). Al final de cada cicle de nebulització hi ha una pausa. Durant el dia, la pausa entre dues nebulitza-

cions és modulada en funció de la lluminositat entre un valor mínim i un valor màxim programables. Les pauses més curtes corresponen a lluminositats més altes. Normalment, a la nit les nebulitzacions es suspenden; però, si es vol, es pot programar un cicle de nebulització amb pauses constants en hores i minuts.

9.3.6. Regulació de la injecció de CO₂

Encara que el contingut de CO₂ no sigui un factor climàtic, és important la seva regulació, ja que està lligada a factors climàtics.

Quan no es disposa d'un sistema de producció artificial de CO₂, es pot utilitzar la ventilació per proveir el CO₂ normalment contingut en l'aire.

La injecció artificial de CO₂, de vegades, és controlada per un rellotge. Aquesta tècnica presenta l'inconvenient que en temps fred i ennuvolat, en ser el consum de CO₂ feble, pot augmentar molt el seu nivell, i perjudicar els conreus. Per aquesta raó, és millor regular l'injecció en funció del contingut de CO₂ de l'hivernacle. A part de les consignes que s'estableixen durant el dia i la nit, és important aturar la injecció quan es ventili l'hivernacle.

9.3.7. Regulació de la irrigació

La irrigació tampoc no és un factor climàtic, però afecta el grau d'humitat de l'aire ambient. Independentment, la irrigació és una tasca quotidiana. Si la gestió es realitza per ordinador, haurà de ser programada conjuntament amb la regulació dels factors climàtics. Les electrovàlvules del sistema d'irrigació poden ser individualment programades per a una duració d'obertura determinada.

La regulació ha de poder adaptar-se als diferents sistemes d'irrigació (gota a gota, aspersió, etc.) i ha de permetre la irrigació cíclica d'aigua sola i d'aigua amb fertilitzants, posant en marxa la bomba d'aigua i la dosificadora segons la programació.

9.4. Gestió climàtica per microordinador

9.4.1. Introducció

La gestió climàtica és una regulació combinada dels factors climàtics els uns en relació amb els altres. Aquesta regulació es realitza per microordinador i no tan sols considera els factors climàtics sinó també la irrigació i la fertilització dels conreus.

Un microordinador de climatització es compon de tres parts:

- *Els perifèrics, que permeten el diàleg amb l'utilitzador i consten dels elements següents:*
 - *La consola o teclat, gràcies al qual el cultivador entra les consignes dins de l'ordinador i l'envia les ordres*
 - *La pantalla, que permet la lectura de les consignes, les mesures i els resultats*
 - *La impressora, que transcriu les informacions sobre el paper*
 - *La unitat central, que comprèn un o diversos microprocessadors, un rellotge i una memòria.*
- *El microprocessador, que permet efectuar les comparacions entre els valors mesurats i les consignes, realitzant seguidament els ajustaments o les actuacions pertinents a partir d'aquestes comparacions i en funció de les ordres enregistrades en memòria.*
- *El rellotge, que permet diferenciar les consignes dia-nit i les hores d'utilització d'alguns equips.*

- La memòria, on es guarden els valors de consigna i les mesures adquirides durant els períodes de temps establert.

- Les interfases, que tradueixen les informacions d'entrada o sortida del microordinador.

L'ordinador funciona gràcies a un programa que rep un cert nombre d'informacions per ser operatiu. Una primera sèrie d'informacions és integrada dins l'aparell pel constructor i no són accessibles per a l'utilitzador. Permeten a la màquina fer les relacions entre les mesures, les ordres rebudes i les comandes a gestionar. La segona sèrie d'informacions és donada pel propi cultivador. Són els valors de consigna, les llindes de posada en marxa de certs equips i alarmes.

Els ordinadors han d'ésser flexibles, potents, expandibles i amb una bona relació prestacions/preu. S'han d'adaptar a les dimensions de l'explotació agrícola i a les necessitats del productor sense cap problema. Cada instal·lació ha d'ésser realitzada en funció del nombre d'entrades i sortides disponibles, i del nombre de compartiments i sistemes a controlar.

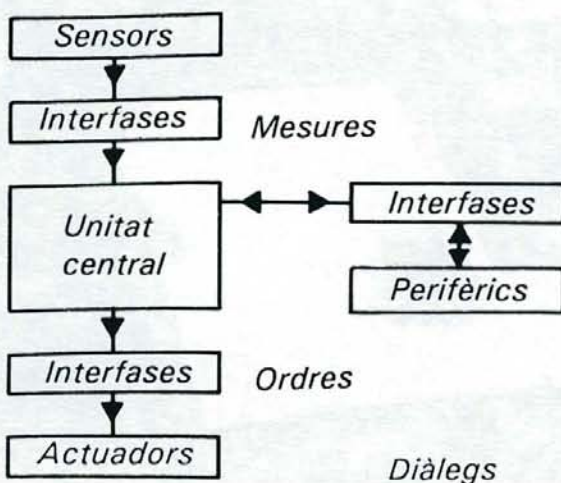


Fig. 9.1. Microordinador de climatització: organització del sistema.

9.4.2. Gestió dels equipaments

Els programes han de ser ampliables de forma que a part de les funcions estàndard puguin satisfer les exigències pròpies del productor.

Els programes s'apliquen normalment a les funcions o equipaments següents:

- Calefacció de l'aire (per termosifó, aerotermes, aire impulsat).
- Calefacció del terra i de les taules de cultiu.
- Obertures practicables en funció de la temperatura, humitat relativa, direcció i velocitat del vent i de la pluja.
- Pantalla tèrmica i d'ombrejament.
- Nebulització.
- Ventiladors i extractors (per a ventilació, càrrega i descàrrega d'emmagatzematge tèrmic).
- Sistemes de refredament per evaporació.
- Il·luminació (fotosíntesi i fotoperíode).
- Irrigació.

Per gestionar aquests equipaments, el microordinador ha de rebre les informacions provinents d'aparells de mesura, com sondes de temperatura per a la calefacció, ventilació i càrrega o descàrrega de la calor solar, sonda de llum per a la il·luminació, pantalla, CO₂, calefacció, irrigació, etc. Contràriament a una regulació tradicional en què es necessita una sonda per funció amb el microordinador, cada sonda s'utilitza per a diverses funcions.

Les mesures són comparades als valors de consigna enregistrats en la memòria de la unitat central. En funció d'aquestes comparacions, la unitat central envia unes ordres als actuadors. Aquests actuadors poden ser vàlvules mescladores i bombes de circulació

d'aigua per a la calefacció, motors dels practicables de ventilació i de les pantalles tèrmiques, etc.

9.4.3. Organització del sistema

Quan són diversos els hivernacles o els compartiments d'un hivernacle a gestionar, el sistema pot ser centralitzat o descentralitzat.

En un sistema centralitzat, les interfases són integrades a l'ordinador, i la connexió als sensors i actuadors es realitza mitjançant uns cables. En un sistema descentralitzat, els microprocessadors que serveixen al mateix temps d'interfase són col·locats en els llocs de mesura i d'actuació, i estan connectats a l'ordinador per un sol cable. Aquest sistema és més segur per transmetre les informacions i les ordres i és més econòmic en cables. La descentralització pot ser de mesures i ordres o d'ambdues operacions.

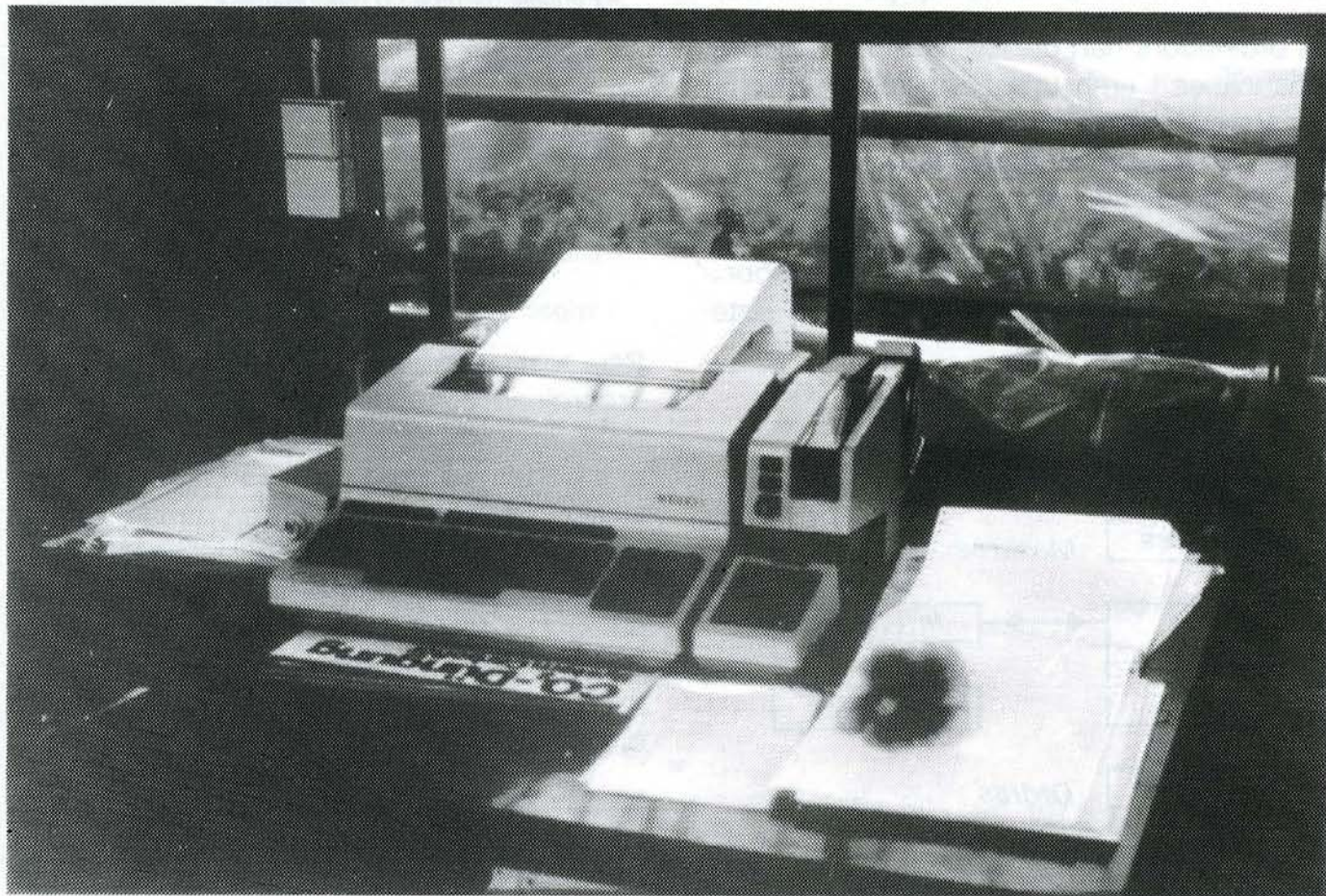


Foto 12: Ordinador.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- (1) A. Matallana, A. Clavero, R. Ferrer. *Inventari de les estructures productives de la comarca del Maresme (conreus protegits)*. Pla integral del Maresme. Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca. Barcelona 1986.
- (2) Miguel A. Pajaron. *Materiales para el forzado de cultivos*. Servicio de extensión agraria. Centro regional de Cataluña-Baleares. Reus 1978.
- (3) A. Coronas, M. Llorens, M. Villarrubia, *Energia Solar a Catalunya: Radiació Solar i Insolació*. Generalitat de Catalunya. Barcelona 1982.
- (4) *Agroclimatologia de España*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Madrid.
- (5) A. Matallana, J.I. Montero. *Invernaderos, construcción y ambientación*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid 1989.
- (6) AFME. *Serres et energie*. París. França 1989.
- (7) A. Baille, M. Mermier. *Greenhouse cover light transmission: an overview of french work*. French-Israeli symposium on greenhouse technology. Israel. December 1987.
- (8) Geiger, R. *The climate near the ground*. Harvard University Press 1980.
- (9) Norma básica NBE-CT 79. *Condiciones térmicas en los edificios*. Madrid 1979.
- (10) Meyer, R.S. *Plant Physiology*. Van Nostrand 1952.
- (11) J. Nijskens, J. Deltour, S. Coutisse i A. Nisen. *Heat transfer through covering materials of greenhouses*. Bèlgica 1984.
- (12) Morris L.G., Neale F.E. *The transpiration of glass-house crops and its relationship to the incoming solar radiation*. Journal of Agricultural Engineering Research, 2:(2)111-122, 1957.
- (13) T. Boulard i A. Baille. *Analysis of thermal performance of a greenhouse as a solar collector*. INRA. Montfavet. França 1986.
- (14) Kindelan M. *Dynamic modelling of greenhouse environment*. Trans of the ASAE 23:1232-1239 E.U.A. 1980.
- (15) Garzolik i J. Blackwell. *The heat balance of a glasshouse in summer*. Agricultural engineering. Australia 2:6-18 (1971).
- (16) B.A. Kimball. *A versatile model for simulating many types of solar greenhouses*. American society of agricultural engineers. Orlando. Florida. EUA 1981.
- (17) M.A. Pajaron. *Sistemas de ahorro de energía en invernadero*. Servicio extensión agraria. Centro regional de Cataluña. Baleares. Reus 1978.
- (18) *Economies d'energie dans les serres*. AFME. París. França 1982.
- (19) I. Zer, I. Segal. *Development of geothermal water utilization for horticulture at Moshav Paran*. International seminar on the use of geothermal energy in Agriculture. Vila Real. Octubre 1988.
- (20) I. Segal, I. Zer *Utilization of thin wall plastic tubes as heat exchangers for geothermal water*. Institute of Agricultural Engineering. Bet Dagan. Israel 1987.
- (21) *Greenhouse heating with solar energy* FAO-ENEA. Institute of Horticultural Engineering. University of Hannover, Alanya 1987.
- (22) T. Boulard, A. Baille *Performance and model of two type of greenhouses with solar energy storage*. French-Israeli symposium on greenhouse technology. Israel 1987.
- (23) A. Baille INRA Montfavet *La climatisation des serres en periode estivale*. Seminaire Agro-UETP. Atenas 1988.
- (24) Mekikdjan C., Sévila F. *Optimal static ventilation in greenhouses*. French-Israeli symposium on greenhouse technology. Israel 1987
- (25) ASAE Engineering practices *Heating and ventilating greenhouses*. EUA 1979.
- (26) J. Lagier *The open roof greenhouse: Analysis and performances*. INRA-SAD. Alanya. França. French-Israeli symposium on greenhouse technology, Israel 1987.

RELACIÓ D'EMPRESES DEL SECTOR

RELACIÓ D'EMPRESSES DEL SECTOR**CECMA IBERICA**

Avda. Can Campanà, s/n

Polígon Industrial Conde de Sert

08755 CASTELLBISBAL (BARCELONA)

Telf: 843.61.00

Fabricació de:

- Hivernacles a dos vessants de vidre
- Hivernacles circulars (túnels i multitúnels) coberts amb polietilè, policarbonat i poliester
- Taules de cultiu

Instal·lació de:

- Calefacció per aire
- Refrigeració per evaporació ("cooling system")
- Pantal·les d'ombrejament

ININSA, Invernaderos e Ingeniería, S.A.

Pg. Sant Gervasi, 22, oficines 7 i 8

08022 BARCELONA

Telf: 417.91.07

Fabricació, subministrament i instal·lació de:

- Hivernacles a dos vessants de vidre
- Hivernacles circulars amb coberta senzilla i doble cambra inflable de polietilè i EVA.
- Calefacció per aigua en el substrat i amb acrotermes i calefacció per aire.
- Pantal·les tèrmiques i acondicionadors evaporatius ("cooling system").

SERRES DEFORCHE

Felip Gil, 7

08023 BARCELONA

Telf: 212.03.89

Distribució de:

- Hivernacles a dos vessants de vidre.

SAIGA, APLICACIONES HIDRAULICAS, S.A.

Mar, 5

17600 FIGUERES (GIRONA)

Telf: 972/50.40.58

Distribució de:

- Minitúnels i túnels
- Bicapelles
- Multicapelles

Representació de:

- Films plàstics especials i de sistemes automàtics de mecanització del cultiu.

AGROFUTUR, S.A.

Grupo San Jorge, 14 bajos, B

08840 VILADECANS (BARCELONA)

Telf: 658.39.52

Representació de:

- Túnels, bitúnels i bicapella, coberts amb film plàstic senzill i amb doble paret inflable.

FREUDENBERG

Ctra. de Barcelona a Puigcerdà, km. 22

Apdo. Correos, 26

08150 PARETS DEL VALLES (BARCELONA)

Fabricació de material per:

- Pantalla tèrmica i d'ombrejament.

SABATER

Polígon Industrial El Cros

08302 MATARÓ (BARCELONA)

Telf: 798.21.95

Distribució de:

- Arcs i túnels de protecció
- Hivernacles circulars amb film plàstic

Fabricació de:

- Equips de reg
- Màquines i eines hortícoles
- Valvuleria
- Films agrícoles per a hivernacles

GIRO HNOS, S.A.

Jaume Ribot, 44-58

08911 BADALONA (BARCELONA)

Telf: 384.10.11

Fabricació de:

- Malles d'ombrejament

HYLO, S.A.

Taulat, 25

08005 BARCELONA

Telf: 300.37.59

Distribució de:

- Generadors d'aire calent
- Ventiladors
- Generadors d'aire fresc
- Generadors d'aire humit

TECNICA INDUSTRIAL IBERICA, S.A.

Santander, 71

08020 BARCELONA

Telf: 313.64.62

Fabricació de:

- Equips de combustió per calefacció

SINGEN

Casp, 70

08010 BARCELONA

Telf: 231.07.08

Enginyeria de disseny de:

- Hivernacles d'alt rendiment energètic

Fabricació i instal·lació de:

- Sistemes de calefacció a baixa temperatura
- Sistemes de recuperació i emmagatzematge dels excedents de calor produïts en l'hivernacle
- Sistemes de gestió climàtica per ordinador
- Hivernacles d'estructura asimètrica

Distribució de:

- Hivernacles a dos vessants amb coberta de vidre.

ADRECES D'INTERÈS

ADRECES D'INTERÈS**Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca**

Passeig de Gràcia, 105

08008 BARCELONA

Telf. 237.24.42

Escola d'Enginyers Tècnics Agrícoles de Barcelona

Urgell, 187

08036 BARCELONA

Telf. 322.06.30

Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA)

Passeig de Gràcia, 44

08007 BARCELONA

Telf. 215.56.68; 215.57.06; 215.58.10

Escola d'Enginyers Tècnics Agrícoles de Girona

Avda. Lluís Santaló, s/n

17003 GIRONA

Telf. 972 / 21.02.62

IRTA. Centre d'Investigació de Cabrils

Ctra. de Cabrils, s/n

08348 CABRILS

Telf. 753.25.11

Mercat de la Flor i Planta Ornamental

Ctra. Nacional II, Km. 639.5

08340 VILASSAR DE MAR

Telf. 759.48.00; 759.46.52

Servei de Medi Ambient de la Diputació de Barcelona

Urgell, 187

08036 BARCELONA

Telf. 402.24.42

INORSA (Investigació Ornamental, S.A.)

Ctra. Nacional II, km. 639.5

08340 VILASSAR DE MAR

Telf. 759.48.00; 759.46.52

Servei del Medi Rural

Corsega, 329

08037 BARCELONA

Telf. 237.25.04

**Comité de Plásticos en agricultura
Centro Español de Plásticos**

Enric Granados, 99-101

08008 BARCELONA

Telf. 218.94.12

Escola d'Enginyers Agrònoms de Lleida

Batlle Rovira Roure, 177

25006 LLEIDA

Telf. (973) 23.34.41

Estació Agrometereològica de l'Alta Segarra

Masia Ben Viure

08289 VECIANA

Telf. 869.89.26

ISBN 84-393-1612-7



9 788439 316121