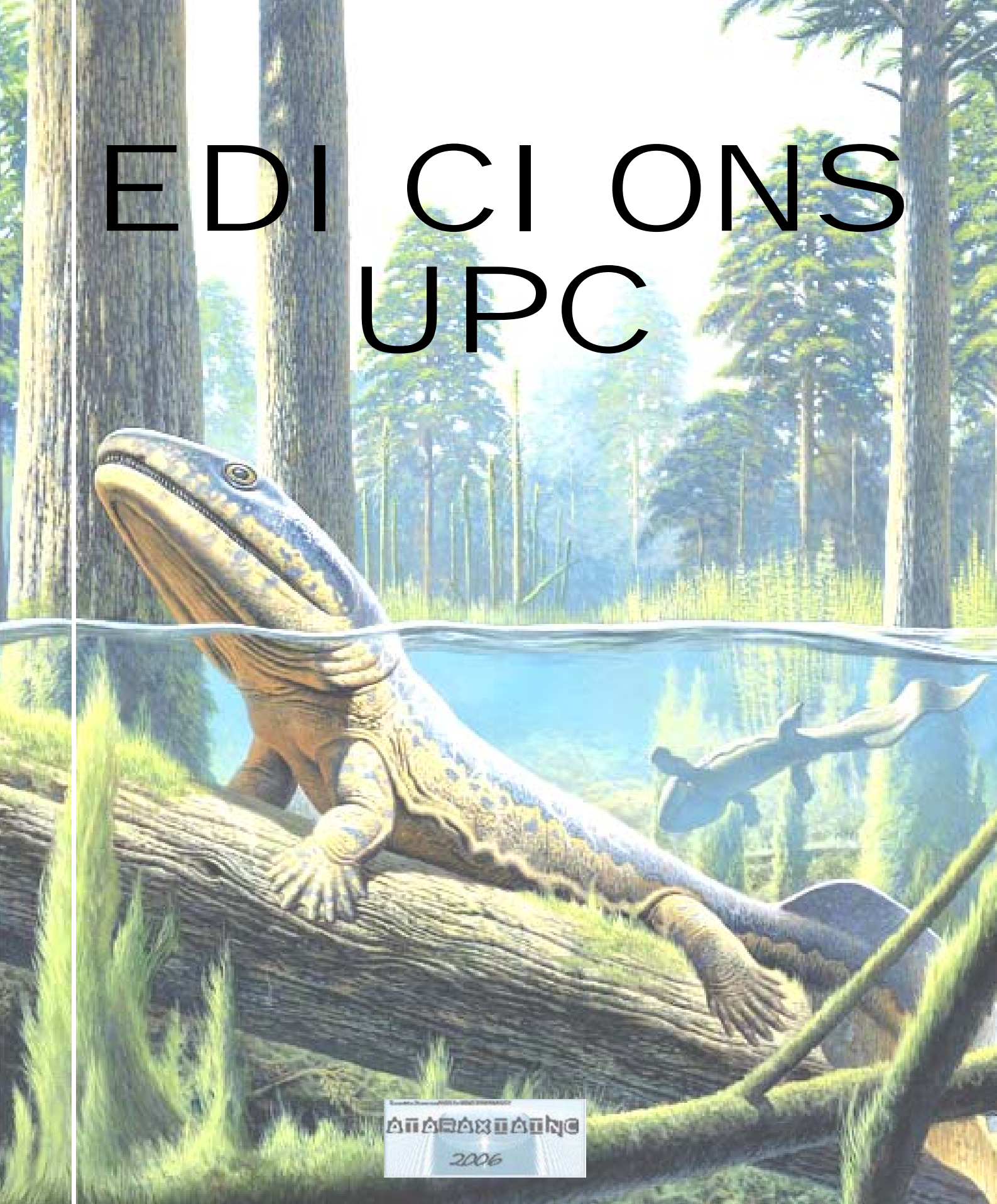


# EDITIONS UPC



ΑΠΟΡΑΦΗ

2006

# EDITIONS UPC



Εκδόσεις Σχολή 2006  
**ΑΠΑΡΑΧΩΡΙΣΤΕ**  
2006

## ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

Published by

ATARAXIAINC

111 III World Street

Hoboken, NJ 07030-5774

Copyright © 2006 by Ataraxiainc, Bogota, Chibchombia

Published by Ataraxiainc, Bogota, Chibchombia

Published simultaneously in the Earth planet

All parts of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, scanning or otherwise, except as no permitted under Sections of the Copyright Act, without either the prior written permission of the Publisher, or authorization through payment of the appropriate per-copy fee to the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, (978) 750-8400, fax (978) 646-6000. Requests to the Publisher for permission should be addressed to the Legal Department,

Ataraxiainc, Bogota, Chibchombia e-mail: Ataraxiainc@Gmail.com.

**Trademarks: ATARAXIAINC**

**LIMIT OF LIABILITY/DISCLAIMER OF WARRANTY: THE PUBLISHER AND THE AUTHOR MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES WITH RESPECT TO THE ACCURACY OR COMPLETENESS OF THE CONTENTS OF THIS WORK AND SPECIFICALLY DISCLAIM ALL WARRANTIES, INCLUDING WITHOUT LIMITATION WARRANTIES OF FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. NO WARRANTY MAY BE CREATED OR EXTENDED BY SALES OR PROMOTIONAL MATERIALS. THE ADVICE AND STRATEGIES CONTAINED HEREIN MAY NOT BE SUITABLE FOR EVERY SITUATION. THIS WORK IS SOLD WITH THE UNDERSTANDING THAT THE PUBLISHER IS NOT ENGAGED IN RENDERING LEGAL, ACCOUNTING, OR OTHER PROFESSIONAL SERVICES. IF PROFESSIONAL ASSISTANCE IS REQUIRED, THE SERVICES OF A COMPETENT PROFESSIONAL PERSON SHOULD BE SOUGHT. NEITHER THE PUBLISHER NOR THE AUTHOR SHALL BE LIABLE FOR DAMAGES ARISING HEREFROM. THE FACT THAT AN ORGANIZATION OR WEBSITE IS REFERRED TO IN THIS WORK AS A CITATION AND/OR A POTENTIAL SOURCE OF FURTHER INFORMATION DOES NOT MEAN THAT THE AUTHOR OR THE PUBLISHER ENDORSES THE INFORMATION THE ORGANIZATION OR WEBSITE MAY PROVIDE OR RECOMMENDATIONS IT MAY MAKE. FURTHER, READERS SHOULD BE AWARE THAT INTERNET WEBSITES LISTED IN THIS WORK MAY HAVE CHANGED OR DISAPPEARED BETWEEN WHEN THIS WORK WAS WRITTEN AND WHEN IT IS READ.**

For general information on our other products and services or to obtain technical support, please contact our Customer Care Department within the “(·\$”= \$(%&/&)%\$=, outside the U.S. at “=-\$(% (“%·\$\$\_\_”·(/\$-·\$)(\$, or fax |@#-€#-43@#.

Ataraxiainc also publishes its books in a variety of electronic formats. Some content that appears in print may not be available in electronic books.

Library of Congress Control Number: --!“\$&\$+--+)=(%/

ISBN: !?“=·)\$(%/&-/+\*

Manufactured in the Chibchombian World

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

20/QW/RQ/QU/IN



Martí Rosas Casals

# **Energia solar tèrmica**

Primera edición: febrer de 2001

Diseño de la cubierta: Edicions UPC

© els autors, 2001  
© Edicions UPC, 2001  
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL  
Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona  
Tel. 934 016 883 Fax. 934 015 885  
Edicions Virtuals: [www.edicionsupc.es](http://www.edicionsupc.es)  
e-mail: [edupc@sg.upc.es](mailto:edupc@sg.upc.es)

Producción: CPDA  
Av. Diagonal 647, ETSEIB, 08028 Barcelona

Depósito legal: B-  
ISBN: 84-8301-

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, así como la exportación e importación de ejemplares para su distribución y venta fuera del ámbito de la Unión Europea.

ENERGIES RENOVABLES I ESTALVI ENERGÈTIC

**ENERGIA SOLAR TÈRMICA**

**ÍNDEX**

**1. Les energies renovables**

- 1.1. L'estat actual del món
- 1.2. Eficiència i consum energètic
- 1.3. Les energies renovables
- 1.4. Un últim apunt

**2. Radiació solar**

- 2.1. El Sol
- 2.2. Radiació solar extraterrestre
- 2.3. Relacions astronòmiques
- 2.4. Temps solar
- 2.5. Angles solars relatius a superfícies inclinades
- 2.6. Mitjana mensual de radiació diària solar extraterrestre
- 2.7. Mitjana mensual de radiació diària solar terrestre sobre un captador
- Annex

**3. Captadors solars fototèrmics**

- 3.1. Tipus de captadors
- 3.2. Mecanismes de transmissió de calor
- 3.3. Principi de funcionament d'un captador solar pla
- 3.4. Equació fonamental d'un captador solar pla
- 3.5. Recta de rendiment d'un captador solar pla
- Annex

**4. Instal·lacions i constituents**

- 4.1. Aigua calenta sanitària
- 4.2. Calefacció
- 4.3. Piscines
- 4.4. Control i manteniment
- 4.5. Connexió de captadors
- 4.6. Reglament d'instal·lacions tèrmiques en edificis (RITE)
- Annex

**5. Comportament a llarg termini dels sistemes fototèrmics**

- 5.1. Càlcul de càrregues tèrmiques
- 5.2. El mètode de les corbes- $f$  ( $f$ -charts)
- Annex

**6. Anàlisi econòmica dels sistemes fototèrmics**

- 6.1. Conceptes d'anàlisi econòmica
- 6.2. Anàlisi econòmica dels sistemes fototèrmics
- 6.3. Ajuts, subvencions i polítiques de futur

**7. Centrals solars**

- 7.1. Introducció
  - 7.2. Centrals solars fototèrmiques
  - 7.3. Centrals solars fotovoltaïques
-

#### 7.4. Centrals solars fotoquímiques

ENERGIES RENOVABLES I ESTALVI ENERGÈTIC

ENERGIA SOLAR FOTOTÈRMICA

BIBLIOGRAFIA

- W.A. Beckman, S.A. Klein, J.A. Duffie: *Solar Heating Design*, 1980, Wiley Interscience.
- W.A. Beckman, S.A. Klein, J.A. Duffie: *Solar Engineering of Thermal Processes*, 1980, Wiley Interscience [621.4 DUF].
- A. Coronas, M. Llorens, M. Villarrubia: *Energia solar a Catalunya: radiació solar i insolació*, 1982, Publicacions Edicions Universitat de Barcelona.
- J.R. Howell, R.B. Bannerot, G.C. Vliet: *Solar-Thermal Energy Systems* 1982, McGraw-Hill.
- E.W. Justi: *Hidrogeno solar*.  
**Ed. Marcombo, 1985.**
- J.F. Kreider: *Medium and High Temperature Solar Processes*.  
**Academic Press, 1979.**
- J.L. Riggs: *Modelos de decisión económica para ingenieros i gerentes de empresa*, 1973, Alianza Editorial, Alianza Universidad 21 [658 RIG]
- J.L. Riggs: *Sistemas de producción, planeación, análisis i control*, 1976, Ed.Limusa, Mèxic [658.5 RIG]
- P.R. Sabady: *Practica de la energia solar*, 1986, Ediciones CEAC, Barcelona, Biblioteca de Construcción
- C.J. Winter, R.L.Sizmann, L.L.Vant-Hull: *Solar Power Plants. Fundamentals, technology, systems and economics*, 1991, Springer-Verlag [620.91 SOL].
- J.A. White, M.H.Agee, K.E. Case: *Técnicas de análisis económico en ingeniería*, 1981, Ed.Limusa, Mèxic [33 WHI]
- Recursos en xarxa: Per a conceptes sobre economia:  
[http://www.bos.frb.org/economic/nerr/hell97\\_1.htm](http://www.bos.frb.org/economic/nerr/hell97_1.htm)  
Per consultar els preus dels combustibles i altres dades econòmiques:
-

<http://www.icaen.es/frame0.html>

(preus de l'energia a Catalunya)

Per a valors de la inflació, previsions en els preus energètics i borsa:

<http://www.invertia.com>

Per centrals solars:

<http://www.psa.es>

Plataforma Solar d'Almeria

---



# 1 Les energies renovables

## 1.1 L'estat actual del món

Efecte hivernacle, desforestació, pluja àcida, escalfament global, capa d'ozó, desertització, contaminació... són paraules que comencen a fer-se pesades quan les sentim una vegada i una altra. Però de fet en som causants i ereus a la vegada. En som causants perquè hem basat el nostre desenvolupament econòmic i progrés científic en l'energia elèctrica produïda per enormes màquines giratòries que necessiten combustibles fòssils (= esgotables, com ara carbó, petroli i gas natural) per poder-les moure i aconseguir, així, que més del 78% de les emissions de diòxid de carboni vinguin provocades per la combustió del carbó, del petroli o del gas que es crema a les centrals tèrmiques productores d'aquesta energia. I en som ereus perquè ens toca a nosaltres decidir què volem fer d'ara en endavant amb el nostre futur.

L'energia és la base de tota activitat humana per petita que aquesta sigui i en el sentit més ampli de la paraula. I des del principi dels temps, l'home ha explotat el seu medi per tal d'obtenir-ne la dosi que necessitava: en un principi, l'aliment per viure i la llenya per escalfar-se (la font d'energia més antiga i encara ara la més utilitzada per més de la meitat de la població mundial) i, posteriorment el carbó i el petroli per donar ales a la revolució industrial de l'hemisferi nord. Si a aquesta explotació hi associem el creixement demogràfic i l'augment actual de la dosi energètica (20 vegades per sobre del que es considera necessari), com a conseqüència de l'avenç del tan anomenat *progrés* (econòmic, social...), podem començar a parlar d'esgotament de reserves i d'amenaça al medi ambient a causa d'una explotació excessiva i per la recerca de vies d'explotació alternatives (energia nuclear), que impliquen un cost desmesurat per al planeta. Per fer-nos una idea:

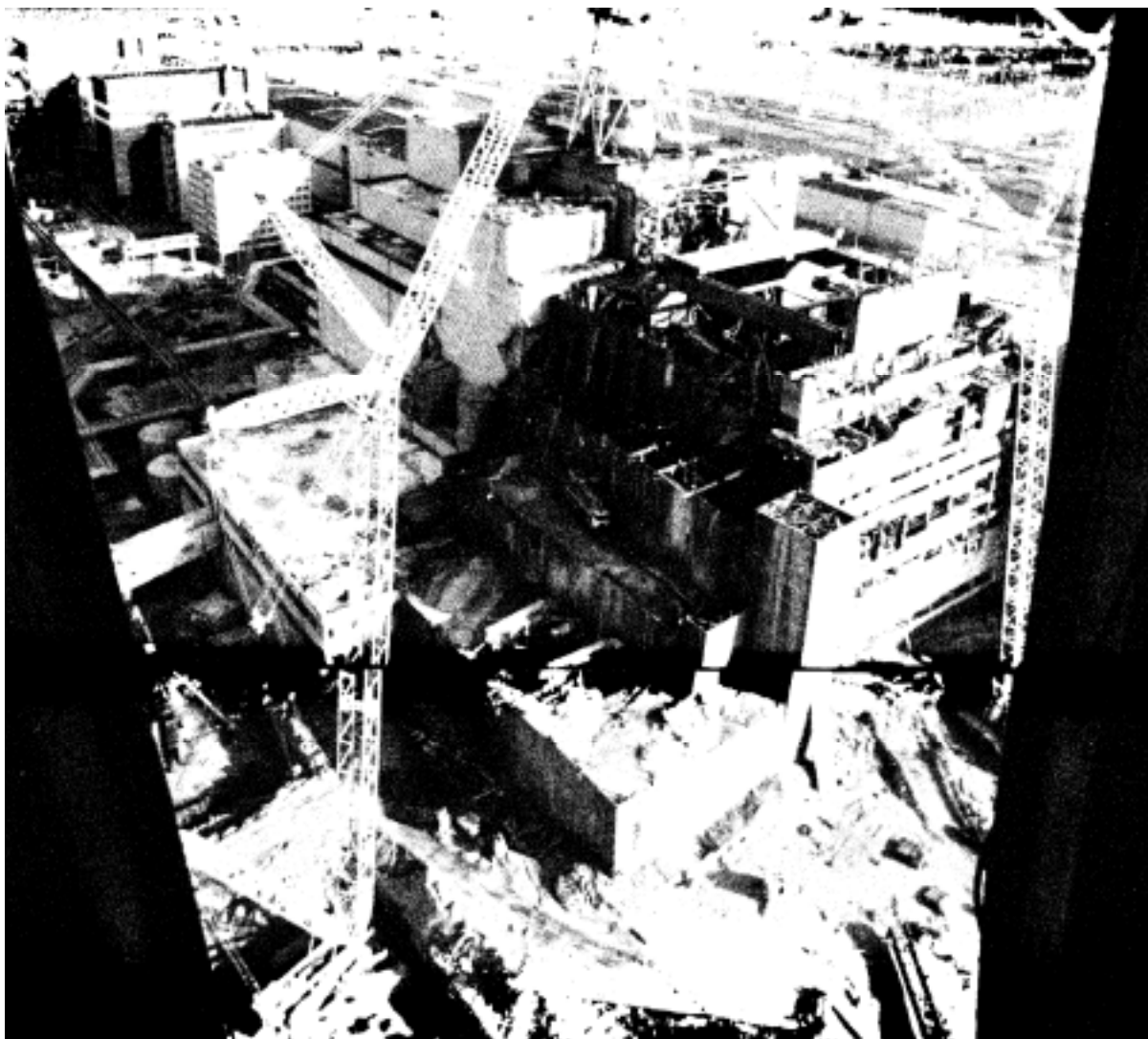
- Actualment consumim 3.500 milions de tones de carbó a l'any en 1.300 centrals d'aquest tipus al món, que suposen una producció de CO<sub>2</sub> més elevada que la produïda cremant gas o petroli. A més, les emissions de residus de la combustió, com els derivats nitrogenats (NO<sub>x</sub>) i derivats del sofre, provoquen el fenomen de la pluja àcida, pluja que ens cau amb un ph no adequat per al desenvolupament normal de la vida.
- El consum de petroli és de 65 milions de barrils per dia i l'emissió de CO<sub>2</sub> de les gasolines suposa la cinquena part del CO<sub>2</sub> mundial produït. Cada un d'aquests barrils conté uns 160 litres de cru, amb la qual cosa obtenim un volum de 10.000.000.000 m<sup>3</sup> de cru al dia, que es podria emmagatzemar en un cub de 2,2 km d'aresta. El seu consum ha provocat recentment la major contaminació de la història per vessament incontrolat al mar (Exxon Valdez a Alaska), una guerra (Guerra del Golf), disputes territorials internacionals (Antàrtida, Mar de la Xina...) i una crisi mundial (Crisi del Petroli al 1973), ja que els combustibles fòssils provenen, en la major part, de països políticament inestables (Golf Pèrsic, Algèria..) la qual cosa sol portar problemes d'abastament o d'encariment de les matèries.
- El "nou combustible verd" és el gas atural, metà quasi pur que afavoreix l'efecte hivernacle, relacionat amb els desastres de les perforacions petrolíferes i que ara per ara ha esdevingut l'energia "pont" entre les tradicionals energies fòssils i les renovables.



*Fig. 1.1 Idíl·licament ocult entre els obscurs boscos d'avets del Harz trobem el Hanskühnenburg. Aquest hostel, amb la seva torre massissa, és un alberg molt apreciat pels excursionistes que busquen el descans a les muntanyes centrals del nord d'Alemanya. Els cims i pujols d'aquesta regió foren famosos fa temps per la seva gran riquesa forestal. L'any 1972, quan es va fer aquesta fotografia, la "mort dels boscos" era encara un concepte desconegut (Font: Harzfoto Barke)*



*Fig. 1.2 L'hostal Hanskühnenburg es troba al 1983 al cim d'una muntanya pelada. Els gasos emesos en grans quantitats a tot el país per les xemeneies de la indústria, les cases particulars i els tubs d'escapament dels cotxes, han contaminat l'atmosfera, i han fet emmalaltir els avets del Harz. La sequera i els paràsits han donat el cop de gràcia final a aquests arbres debilitats. Els boscos es moren a una velocitat terrible a tot Alemanya i a Europa. Segons un estudi del Ministeri d'Agricultura de Bonn, el 34% dels boscos alemanys estaven malalts al 1983. Al 1988, ara fa deu anys, la xifra arribava al 52,4%. Després dels boscos de coníferes, comencen a morir ja els arbres caducifolis: quasi el 70% dels roures ja estan malmesos (Font: Axel Carp).*



*Fig. 1.3 25 d'abril de 1986: desastre nuclear a la central atòmica soviètica de Txernòbil, a 130 km de Kíev, la capital d'Ucraïna. Com a conseqüència d'una manipulació equivocada d'un dels enginyers, una secció del bloc 4t del reactor es comença a escalfar ràpidament, falla el sistema d'aigua de refrigeració i després d'una primera explosió i un incendi, es comença a fondre el nucli del reactor. La fuga de radioactivitat es produeix en gran quantitat i les conseqüències són desastroses. Trenta-una persones moren com a conseqüència de radiacions directes, 135.000 ciutadans soviètics, que viuen en un radi de 30 km de la instal·lació nuclear, són evacuats. El iode, l'estranci i altres elements radioactius són transportats per núvols i vents arreu d'Europa. Tres anys després de l'accident, el nombre de malalts de càncer s'havia duplicat en els territoris evacuats al voltant de la instal·lació. El nivell de radiació actual de la zona tan sols ha disminuït un 10% . (Font: Jürgens Ost + Europa-Photo)*

- Si no volem consumir gas, petroli o derivats, ens queda l'energia nuclear de fisió, amb més de 400 centrals en funcionament actualment. És costosa, perillosa, no predible, genera residus (es calcula que la deixalla acumulada només per les centrals nuclears espanyoles té capacitat destructiva fins l'any 32000) i el seu consum ha possibilitat desastres com els de Txernòbil (1986) i Harrisburg (1979), sense comptar les nombroses fuites radioactives ignorades pels governs involucrats. La fusió és un nou camí. Però no elimina el problema dels residus.

Sortosament, al 1973, els països àrabs fan un estudi semblant al que hem fet als primers paràgrafs i decideixen tenir una mica més "controlats" els seus petroliers i refineries. És la Crisi del Petroli, que fa que el món Occidental s'adoni de fins a quin punt depèn de les energies fòssils. Els governs s'adonen d'un fet que molta gent ja havia exposat: petroli, carbó, gas i urani són reserves energètiques finites i s'acabaran en un futur pròxim. A més, provoquen canvis i deterioraments seriosos del medi. Cal, doncs, trobar vies alternatives per al desenvolupament mundial que, a més, equilibrin les economies de tots els països per evitar l'esclat de tensions que les diferències econòmiques i socials provoquen.

## 1.2 Eficiència i consum energètic

Un primer pas per donar en la lluita contra la crisi mediambiental i energètica que estem patint és millorar els actuals processos productius fent un ús més eficient del combustible utilitzat tenint en compte que no volem energia ans els serveis que aquesta ens subministra. El concepte de les tres *R* (reduir, reutilitzar i reciclar) es pot aplicar arreu.

Actualment, la majoria de centrals tèrmiques treballen amb uns rendiments al voltant del 40%. És factible augmentar aquests rendiments i l'eficiència global de les centrals productores d'energia reduint-los la despesa en combustible per arribar fins a un 50-55% a partir de la millora del procés de combustió del fòssil (centrals amb tècnica de *llit fluiditzat*, a la figura 1.4) i a partir de la *cogeneració*, p.ex., l'aprofitament de la calor residual d'alguns processos químics entre els 80 i 200 °C (petroquímiques) per vaporitzar un fluid i impulsar un generador suplementari que ens produeixi electricitat (*procés de cua*) i aprofitar els vapors residuals (d'un cicle amb turbines que ens produeixi electricitat) per escalfar aigua o calefactar (*procés de cap*).

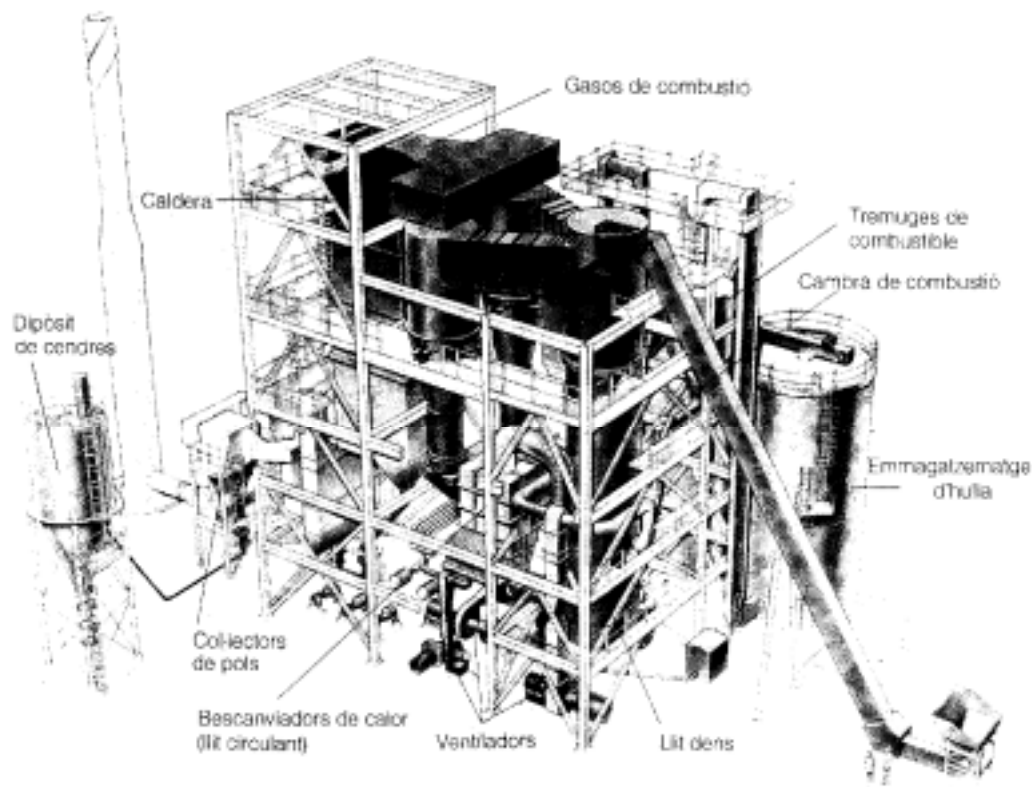
També calen millores en la conversió directa de l'energia. Actualment, si ens fixem amb els tipus d'energia que utilitzem, ens adonarem que *l'energia mecànica* i *l'energia elèctrica* resten al capdamunt de la llista. D'una banda, el sector responsable de la utilització d'un 30% de les energies manufacturades és el del transport (tant terrestre, com marítim i aeri), que transforma l'energia química d'un combustible en energia mecànica en un eix. De l'altra, intentem posar un exemple d'algun tipus d'aparell que pugui prescindir d'un endoll o d'una font energètica que disposi de pol positiu i negatiu. I això no és gratuït, ni de bon tros, perquè l'electricitat és la forma d'energia més fàcilment transportable que es coneix. Si, a més, considerem el fet que els llocs de consum acostumen a estar força lluny dels llocs de producció (centrals tèrmiques, hidràuliques i nuclears), podem justificar encara més l'ús de l'energia elèctrica (que actualment és també d'un 30% dels 100.000.000.000 MWh d'energia primària consumida per la humanitat).

Ara bé, els recursos principals no es troben de forma directa ni en energia mecànica ni, en última instància, en energia elèctrica (el llamp seria l'únic exemple natural), sinó que es troben en forma de combustibles fòssils: cru de petroli, carbó, gas natural... o sigui, energia química (energia solar fòssil en definitiva). Cal, doncs, una transformació (amb l'eficiència al més elevada possible) d'aquesta energia química per obtenir energia mecànica que, o bé serà aprofitable directament o bé, en última instància, es convertirà en energia elèctrica.

La conversió directa de l'energia química en elèctrica és possible a partir de cèl·lules o *piles de combustible*, elements que transformen una mescla de combustible i aire en electricitat, per

oxidació de l'hidrogen, i donen aigua com a únic residu en un procés que es pot arribar a realitzar amb rendiments pròxims al 100% (tot i que actualment som al 65%).

En aquest sentit, alguns bacteris també ofereixen diverses rutes a la producció energètica. Poden cultivar-se com a font de biomassa o utilitzar-se per generar corrent elèctric o gasos combustibles. Algunes algues generen residus parents del petroli i experiments europeus en energia fotobiològica inclouen plantes pilot de la companyia petrolera Total, a França, on en cultiven algues riques *en energia* amb mètodes continus (no per càrregues).



*Fig. 1.4 En els sistemes de combustió de llit fluiditzat, partícules de combustible i d'altres materials "suren" i circulen en corrents d'aire. La figura mostra una caldera de llit circulant de Power Products (Foster Wheeler) al Regne Unit. Partícules de pedra calcària, sorra i cendres viatgen de la càmbra de combustió al bescanviador de calor, on transfiguren la calor a l'aigua. Els gasos de la combustió converteixen l'aigua escalfada en vapor a la caldera. Un llit fluiditzat dens de partícules de grava, que roman a la càmbra de combustió, frena el flux per assegurar la combustió completa del combustible, que la pedra calcària tingui temps de capturar tot el sofre present i que les emissions d'òxids de nitrogen es mantinguin al mínim. Captadors de pols (ciclons) separen les cendres fines que si no sortirien a l'atmosfera (Font: Foster Wheeler Power Products Ltd, Londres, Regne Unit).*

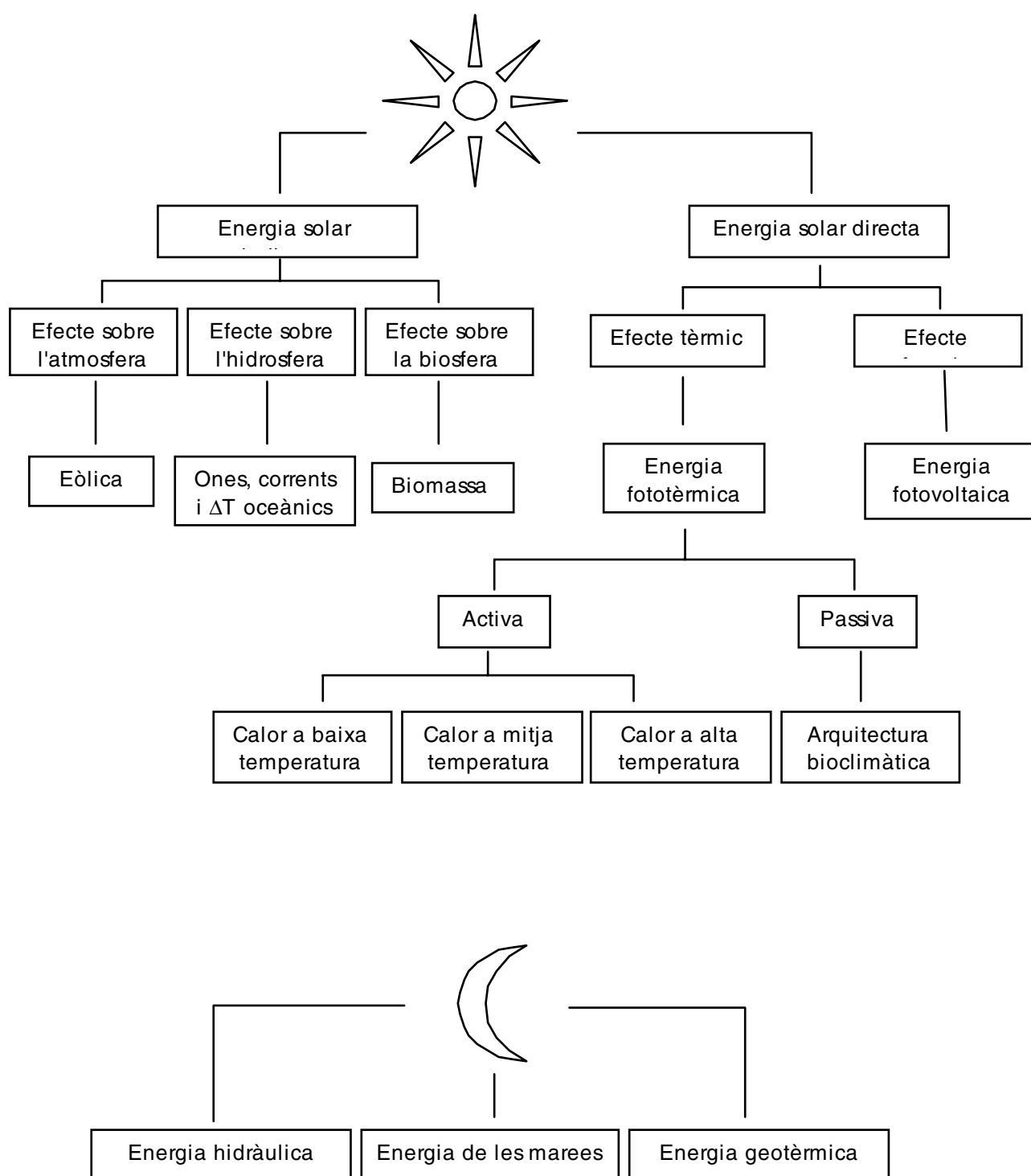
Des del punt de vista de l'estalvi, cal veure que la calefacció d'edificis i l'escalfament d'aigua calenta sanitària consumeix gran part de l'energia usada al món. L'estalvi energètic es pot incrementar millorant les normes d'aïllament en els edificis, triplicant els vidres de les finestres o recobrint-los, aplicant calefacció solar passiva o utilitzant les bombes de calor.

### 1.3 Les energies renovables

Les energies renovables es poden definir com les fonts energètiques que, de forma periòdica, es posen a disposició de l'home i que aquest és capaç d'aprofitar i transformar en energia útil per

satisfer les seves necessitats. És a dir, es renoven de forma continuada en contraposició amb els combustibles fòssils com petroli, carbó, gas i urani, dels quals hi ha unes determinades disponibilitats esgotables en un termini més o menys llarg.

Constitueixen una font d'abastiment inesgotable, ja que en el seu origen directe provenen majoritàriament del Sol (tot i que si ens remuntem molt més enllà en la història, tot té l'origen en el Sol). Però això no significa que les energies renovables hagin d'associar-se a l'aprofitament directe de l'energia solar, sinó que el Sol produeix un seguit de fenòmens naturals que a la vegada donen origen als recursos en què es basen els diferents tipus d'aprofitament de les energies renovables.



*Fig. 1.5 Les energies renovables d'origen solar i no (tan) solar (ja que, de fet, tot prové del Sol).*

També existeixen energies renovables no solars, com la hidràulica, la geotèrmica i la de les mareas. Són renovables perquè es regeneren amb menys o més temps, però són el resultat dels cicles de formació terrestres, geològics i atmosfèrics.

Cal tenir en compte que l'energia procedent de la radiació solar, absorbida per la Terra en un any, és equivalent a 20 vegades l'energia emmagatzemada a totes les reserves de combustibles fòssils del món. Si poguéssim aprofitar tan sols el 0,005% d'aquesta radiació mitjançant captadors, turbines, molins, etc, obtindríem més energia útil en un any que la que aconseguim cremant petroli, carbó i gas en el mateix temps.

### 1.3.1 Energia eòlica

Com dèiem al principi del capítol, l'energia elèctrica és la forma d'energia més utilitzada arreu del món, però també és la principal responsable de la degradació atmosfèrica ja que per tal de fer girar un motor elèctric ens cal connectar-hi una turbina. I per fer girar aquesta turbina, ens cal un combustible fòssil.

Amb l'energia eòlica, però, podem moure aquest motor elèctric aprofitant l'energia que ens proporciona el vent. El vent sorgeix com a moviment de l'atmosfera degut a canvis de pressions d'aquesta atmosfera esdevenen com a conseqüència de la variació de temperatura de les diferents capes que la formen produïda pel Sol. Si aquesta massa en moviment s'intercepta adequadament, en podem treure una certa quantitat d'energia. En particular, l'energia aprofitable dels vents a tot el món es xifra en uns 10.000.000 MW (equivalent a l'energia produïda per 10.000 centrals tèrmiques o nuclears).





*Fig. 1.6 Localització dels parcs eòlics a Espanya.*



*Fig. 1.7 Els molins de vent van ser durant segles un dels subministradors d'energia més importants. I ara s'hi torna a recórrer. Diferents inversors nord-americans participen en les denominades "granges de vent" en les que -com aquí, a Altamont, a l'est de Sant Francisco- centenars o milers de molins transformen simultàniament l'energia eòlica en electricitat (Font: Kim Steel).*

L'element que ens permet aprofitar aquesta energia és l'aerogenerador (figura 1.8). Un aerogenerador és essencialment un *rotor* amb aspes, subjectat a una *barqueta* (o *gòndola*) orientable que reposa al capdamunt d'una *torre*. La longitud de les pales pot anar des d'uns pocs metres fins als 22 metres (diàmetre del rotor de 30 a 40 metres!) en aerogeneradors que ens donin entre 200 i 500 kW (superfície escombrada de 1.400 m<sup>2</sup>). En aquests casos, les aspes són fetes de resines epoxi reforçades amb fibra de vidre i la barqueta, que fa uns sis metres longitud, és de fibra de vidre. La torre pot arribar als 50 metres i és feta de xapa d'acer per suportar les aproximadament 50 tones que pot arribar a pesar el conjunt.

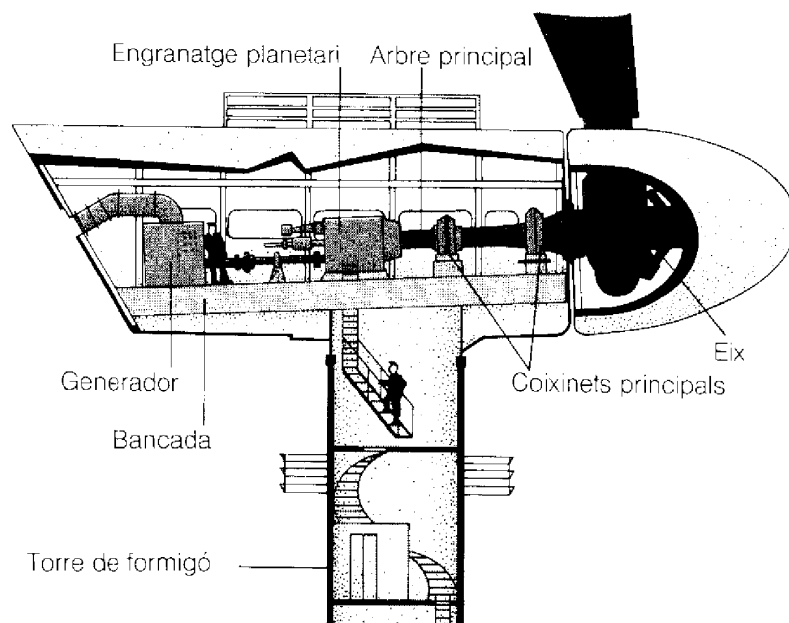


Fig. 1.8 A Dinamarca, a la costa del Mar del Nord, sobre una torre de 57 m, a Esbjerg, es va instal·lar i va poder començar a funcionar l'any 1988 una turbina eòlica de 2 MW. Les figures humanes posades a la secció transversal de la barqueta permeten fer-se idea de la mida del molí de vent (Font: I/S Vestkraft, Esbjerg, Dinamarca).

Les aspes capten l'energia cinètica de l'aire en moviment. La potència va en funció del cub de la velocitat del vent: a més velocitat, més potencial eòlic. Un aerogenerador produeix electricitat a partir de 4,5 m/s (16 km/h) i assolix la màxima producció entre els 15 i 25 m/s (uns 90 km/h). Perquè l'aerogenerador capti la màxima energia, les aspes i la barqueta estan dissenyades de manera que poden girar sobre el seu propi eix i situar-les en tot moment contra el vent. Aquesta energia es transforma en energia elèctrica de baixa tensió a l'interior de la barqueta gràcies a un generador.

A l'Estat espanyol la major concentració de parcs eòlics es troba a les Illes Canàries, en particular a Hierro i Fuerteventura, amb 19,1 MW instal·lats. Cadis (on es té previst instal·lar el major parc de l'Estat, anomenat Pesur, de 20,1 MW), Galícia, Almeria (amb 31 MW previstos) i Navarra són altres ciutats i comunitats amb un alt índex d'implantació d'aquestes energies. A Catalunya hi ha el Parc Eòlic del Baix Ebre, prop de Tortosa, amb 27 aerogeneradors d'una potència total de 4 MW. Cada 6 aerogeneradors comparteixen un centre de transformació (5 en total) que eleven la tensió de 400 V fins als 25.000 V, que és la tensió de línia d'evacuació. Aquesta instal·lació proveeix una població de 2.880 famílies (uns 10.000 hab) i substitueix 716 tones/any de petroli, tones/any de CO<sub>2</sub> i tones/any de SO<sub>2</sub> (que provoquen l'efecte hivernacle).

L'energia eòlica és essencialment neta i segura (reemplaçant l'1% de les tèrmiques de la Unió Europea, s'evitaria l'emissió de 15 milions de tones de CO<sub>2</sub>) i la producció neta d'energia permet que en un any quedi amortitzada una instal·lació de 19 generadors. A més, per cada 1 MW instal·lat es crea un nou lloc de treball de manteniment i pel que fa a l'espai, el terreny ocupat pels parcs eòlics per produir 1 joule d'energia és 3 vegades inferior al d'una tèrmica de carbó. Tot i així, l'impacte visual es comença a qüestionar.

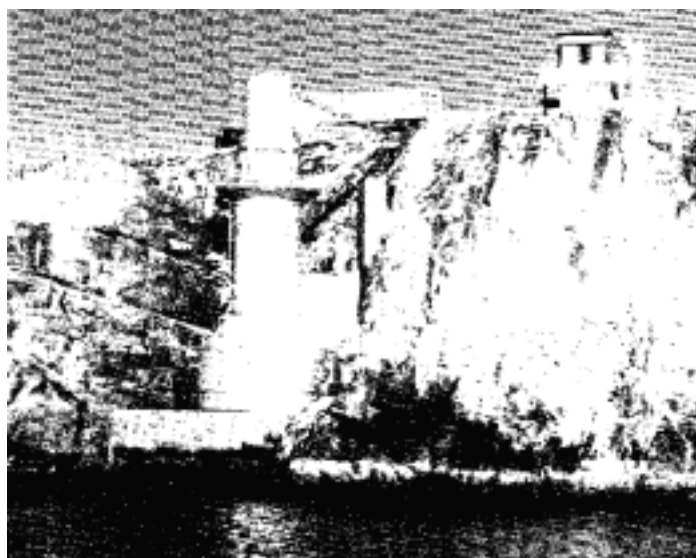
La capacitat instal·lada actualment a nivell mundial és de 13.000 MW (amb dades de 1999), amb Europa al capdavant, amb 9.200 MW. Els líders a Europa són Alemanya, amb 4.440 MW instal·lats, seguit de Dinamarca, amb 1.761 MW, i Espanya, amb 1.478 MW.

L'objectiu de la UE és obtenir 100.000 MW eòlics al 2030. Això suposarà el 10% de l'electricitat de la UE i evitarà la construcció de 70 grans centrals tèrmiques.

### 1.3.2 Ones, corrents i gradients tèrmics oceànics

El mar guarda en el seu interior una enorme reserva energètica natural, que encara espera ser aprofitada en qualsevol de les seves formes: marees, ones, corrents, calor.

Actualment, i en fase molt experimental, hi ha els dispositius per aprofitar l'energia de les ones, encara que el desenvolupament tècnic i comercial és inferior. En segons quins casos es tracta d'aprofitar a través de bombes hidràuliques el moviment de cossos oscil·lants moguts per les ones, i en altres l'acció del bombeig de la superfície de l'aigua impulsa turbines d'aire (figura 1.9).



*Fig. 1.9 Columna d'aigua oscil·lant a Noruega: produeix fins a 500 kW d'electricitat a partir de les ones del mar (Font: Kvaerner Brug A/S Oslo).*

Els principals prototipus s'han desenvolupat a Japó i a Noruega (les ones omplen un dipòsit elevat, que es descarrega passant per una turbina hidràulica). Els millors recursos naturals es troben a Portugal, França, Escòcia i Irlanda; a Espanya, amb 7.900 km de costa, tan sols s'ha fet la necessària avaluació detallada del potencial disponible i, malgrat que hi ha diversos projectes dissenyats o ideats, només hi ha una petita planta pilot a Sabón (La Corunya).

En l'àmbit experimental es troben sistemes com els convertidors d'energia de les ones a mar oberta (que podrien produir fins a milions de MW globalment), les turbines submergides en corrents ràpids o la conversió de l'energia tèrmica dels oceans (en aigües tropicals), que aprofiten la diferència de temperatures entre capes superficials i profundes del mar (20 °C amb 700-900 metres de profunditat) per obtenir els focus calent i fred del cicle tèrmic que desenvolupen (usualment un cicle de Rankine).

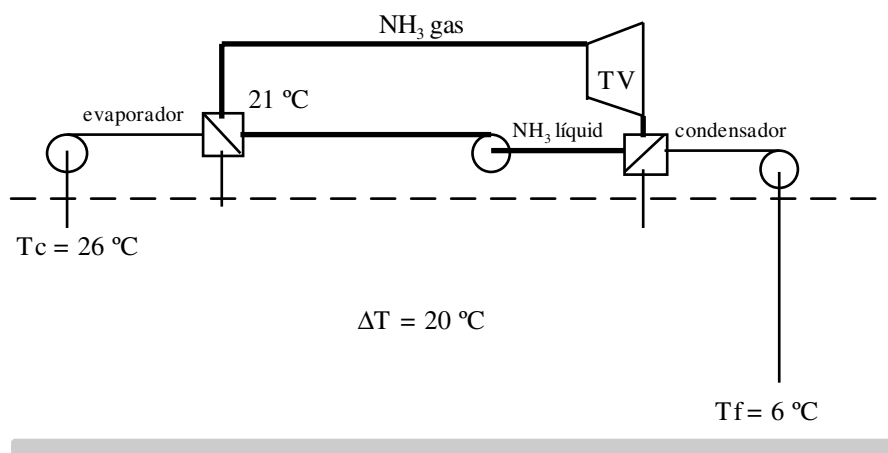


Fig. 1.10 Esquema d'una central termotàctica experimental situada a les illes Hawaii, amb una potència efectiva de 64 MW.

### 1.3.3 Biomassa

L'energia del Sol és utilitzada per les plantes per sintetitzar la matèria orgànica mitjançant el procés de la fotosíntesi. Aquesta matèria orgànica la incorpora i la transforma el regne animal incloent-hi l'home. L'home, a més, la transforma per procediments artificials per obtenir béns de consum. Tot aquest procés dona lloc a elements utilitzables directament, però també a subproductes que tenen la possibilitat de trobar aplicació en el camp energètic.

La biomassa és, en definitiva, l'energia solar convertida per la vegetació en matèria orgànica:

$$\text{Biomassa} = \text{Residus forestals} + \frac{\text{Fracció orgànica dels residus urbans}}{\text{residus urbans}} + \frac{\text{Residus de les indústries agroalimentàries, agrícoles i forestals}}{\text{agroalimentàries, agrícoles i forestals}}$$

Aquesta energia és recuperable per combustió directa o transformant la matèria orgànica en altres combustibles mitjançant mètodes de tractament específics amb una primera etapa de trituració, densificació i piròlisi, que ens permet posteriorment passar a la digestió anaeròbica, la gasificació, la fermentació alcohòlica i, finalment, obtenir-ne gasos (metà) o fluids combustibles (alcohols o

fuelolis). A més, la biomassa és l'única font d'energia que dona un balanç favorable de CO<sub>2</sub> perquè la matèria orgànica és capaç de retenir durant el seu creixement més CO<sub>2</sub> del que s'allibera en la seva combustió.

Actualment, i a causa de la gran massa forestal que hi ha, es considera la font renovable de més potencial a Espanya, amb una producció estimada de 25,7 Mtep (milions de tones equivalents de petroli). En l'àmbit mundial, per exemple a França, 6 milions de cases s'escalfen utilitzant un subproducte anomenat *pellet*, biomassa compactada substituïda del carbó.

Al Brasil, 2 milions de vehicles funcionen amb derivats alcohòlics (bioetanols) obtinguts de la fermentació del sucre de la canya de sucre i 8 milions de vehicles ho fan amb una mescla d'aquests i benzina (una mescla de entre el 5% i 15% amb benzina aconsegueix incrementar l'octanatge i permet eliminar el plom). A la vegada, el gas que es pot extreure dels purins del porc és una bona font de combustible.

L'aprofitament energètic de la biomassa ha fet desenvolupar l'*agroenergètica* com a nova branca de l'agricultura tradicional, en la qual es produeix biomassa mitjançant conreus específics i es transforma en productes energètics substituïts dels combustibles tradicionals. Així, es conreen llavors oleaginoses per obtenir bioolis carburants (per a motors dièsel en substitució del gasoil), biomassa lignocel·lulòsica, en forma de pollancre i eucaliptus, biomassa alcoholígena, en forma de blada, rave i cereals, i biomassa oleaginosa, amb girasol, colza i card.

#### 1.3.4 Energia hidràulica

L'energia del Sol evapora l'aigua dels oceans, mars, rius i llacs i l'eleva sobre la terra en forma de núvols. Quan aquests es refreden, el vapor d'aigua en suspensió es condensa en forma de pluja i torna a tancar el cicle de l'aigua sobre la terra. L'aigua, en el seu transcurs per la superfície terrestre té la tendència, per gravetat, a ocupar les posicions baixes i l'energia que això proporciona és explotable per les centrals hidroelèctriques i minihidràuliques (< 5 MW). L'energia hidràulica és la que s'obté a l'aprofitar el moviment de l'aigua, ja sigui per moure una turbina i produir electricitat, o bé per a obtenir treball mecànic, com en els tradicionals molins d'aigua.

L'energia hidroelèctrica avui es produeix fonamentalment en grans embassaments. El seu ús no produeix emissions ni residus, i és amb diferència la més barata d'entre les energies convencionals. Tot hi això, la construcció de grans preses té un gran impacte ambiental i social, perquè inunda grans extensions de terreny, separa comunitats animals, transforma completament el paisatge i desplaça als seus habitants, que no són els destinataris de l'electricitat que s'hi produirà. Això fa totalment indesitjable la construcció de nous grans embassaments, encara que cal aprofitar al màxim la capacitat dels ja existents.

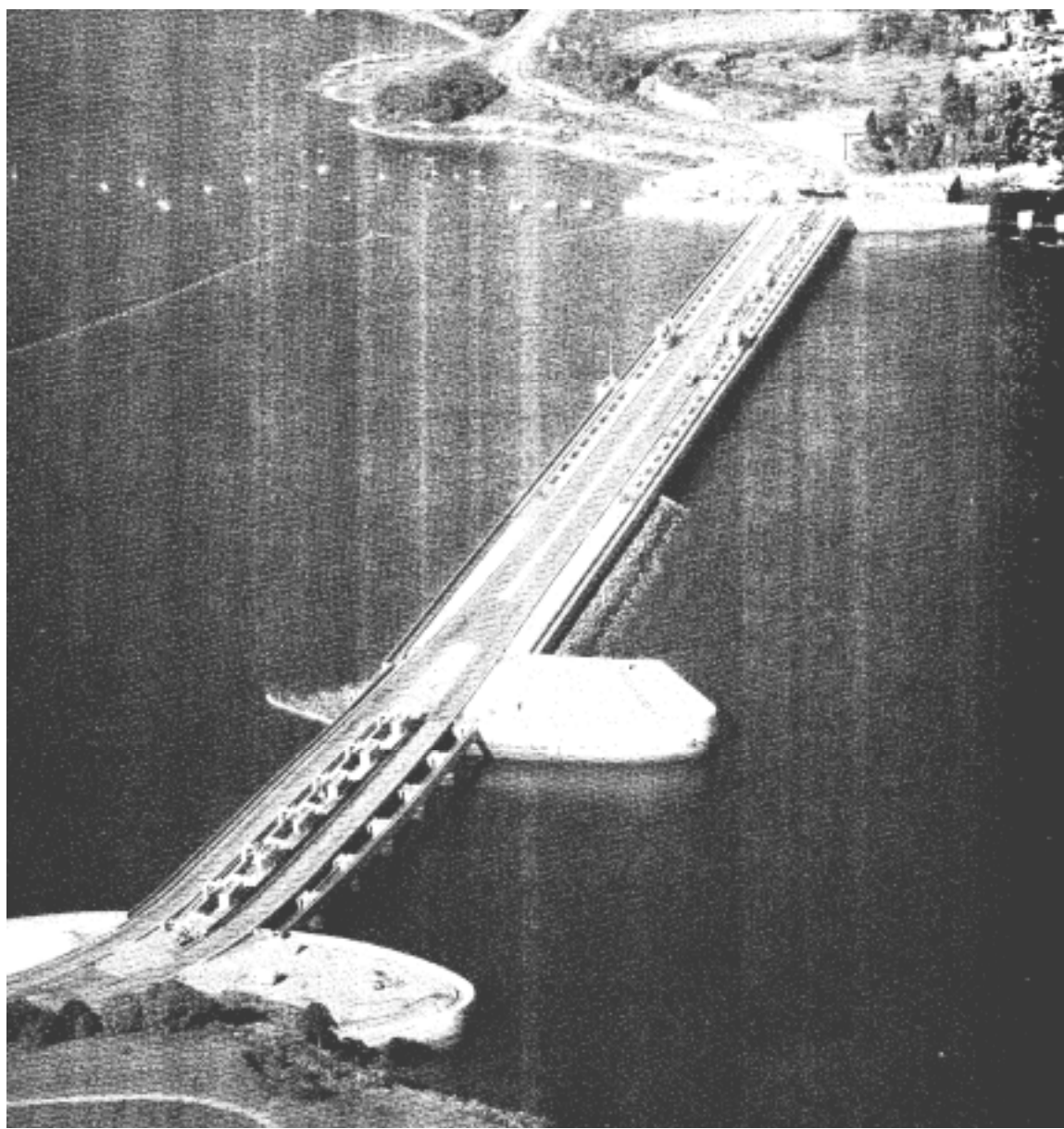
Un impacte més petit provoca la "minihidràulica", és a dir, les instal·lacions que no superen els 5 MW de potència, encara que aquesta separació és sempre arbitrària. Aquestes centrals minihidràuliques es poden instal·lar en canals de regadiu o abastiment, a peu de preses ja existents, o en el curs dels rius.

L'impacte ambiental de la minihidràulica només és important en les centrals d'aigua fluent, i la seva intensitat depèn de com i quan es realitzi l'aprofitament. Els impactes més importants d'aquest tipus de centrals en els rius són deguts a les fluctuacions brusques del nivell d'aigua, la

variació de les condicions de velocitat de l'aigua, els obstacles per a la migració dels peixos, la retenció dels sediments més fins i un cabal ecològic insuficient (per conservar les poblacions fluvials es necessita assegurar un cabal mínim, específic per a cada riu). Aquests impactes poden arribar a ser localment molt greus, i a vegades és preferible evitar la construcció de la minicentral.

Aquests i altres exemples no poden servir per justificar el refusament global a la minihidràulica com a font d'energia, i oblidar els seus clars avantatges: reduir la producció d'energia mitjançant fonts brutes i perilloses (combustibles fòssils, energia nuclear), aprofitar un recurs autòcton, acostar la producció d'electricitat al lloc de consum i evitar en ocasions la construcció d'un gran embassament en el mateix riu.

En els països menys afavorits, on encara només s'aprofita el 8% del potencial hidràulic, la minihidràulica pot dur a terme un paper clau. I també a Espanya, on es podria augmentar la producció hidroelèctrica en un any mig d'uns 28 TWh (terawatts-hora = milers de milions de kilowatts-hora) fins a 40 TWh (el 27% de la producció elèctrica actual), sense la necessitat de construir cap nova gran central, sinó mitjançant l'aprofitament hidroelèctric de canals de regadiu i subministrament urbà i d'embassaments ja construïts, la millora de minicentrals ja existents i la rehabilitació de minicentrals tancades (el 1964 funcionaven a Espanya 1.740 minicentrals, de les quals el 1982 només en quedaven 576). Només en el darrer cas es podrien autoritzar noves concessions en rius, començant pels cursos mitjans i baixos, on l'impacte seria menor.



*Fig. 1.11 L'única central elèctrica a gran escala basada en marees que funciona al món aprofita marees de 8 metres a l'estuari bretó de La Rance, prop del Mont-Saint-Michel. Les seves vint-i-quatre turbines poden funcionar com a bombes per optimitzar la producció elèctrica (Font: Agence Explorer, París, França).*



### 1.3.5 Energia de les mareas

L'energia mareomotriu es basa en el moviment regular de pujada i baixada de l'aigua (marees), que a la costa i especialment als estuaris amplifica els seus efectes. Quan el rang supera els cinc metres es pot produir electricitat competitivament, mitjançant turbines col·locades en una presa.

És la font d'energia amb més eficiència en la conversió (80%, i podria arribar al 90%), és a dir, la que en millor proporció es converteix en energia aprofitable i la seva disponibilitat de mitjana és del 95% del temps, amb l'avantatge de ser totalment previsible. El major dispositiu en explotació comercial és el de La Rance, situat a la Bretanya francesa, prop del Mont-Saint-Michel, a l'estuari del riu Rance, i genera 240 MW des de 1966, amb una provada maduresa tècnica. També s'han explorat llocs adequats per a la seva explotació a Amèrica, Àsia i Austràlia. La potència d'una instal·lació podria arribar fins als 9.000 MW (l'equivalent a 9 grans centrals nuclears o tèrmiques), malgrat que l'impacte ambiental sobre els estuaris podria ser important.

### 1.3.6 Energia geotèrmica

L'energia geotèrmica té el seu origen en el seguit de reaccions químiques naturals que esdevenen a l'interior de la Terra i que produeixen grans quantitats de calor. Aquesta realitat es posa de manifest de forma natural i violenta en fenòmens com les erupcions volcàniques o els terratrèmols. Però també l'home pot aprofitar aquesta font de calor en tots aquells llocs on trobem una diferència de temperatura entre l'interior terrestre, més calent, i la superfície. La geotèrmica, per tant, és una font d'energia natural, encara que no estrictament renovable, ja que la calor que extraïem d'un jaciment en unes desenes d'anys, trigarà milers d'anys a regenerar-se.

La forma d'aprofitament varia segons el lloc on es troba el recurs. La majoria de tecnologies actuals extreuen l'aigua calenta (líquida o vapor) present en el subsòl (figura 1.12), encara que és possible injectar aigua en una roca seca calenta per escalfar-la o vaporitzar-la.

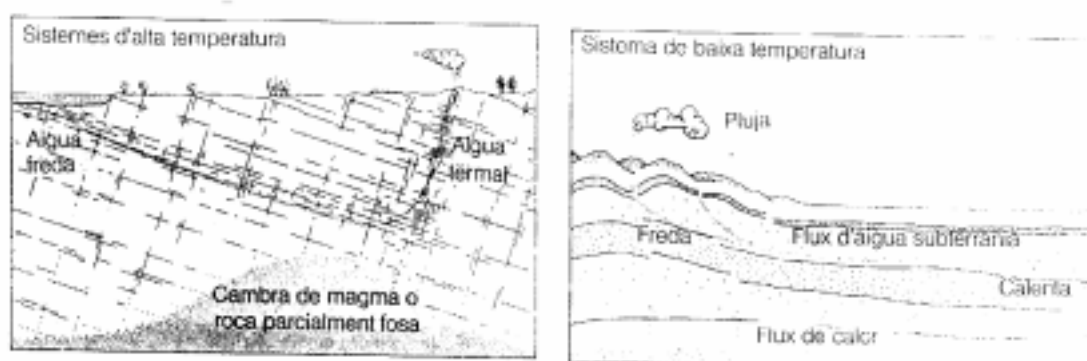


Fig. 1.12 Els esquemes mostren les categories importants de fonts geotèrmiques. Il·lustren un sistema d'alta temperatura, en el qual la menor densitat de l'aigua calenta la fa retornar convectivament a la superfície, i un

*sistema de baixa temperatura impulsat per pressió hidrostàtica (Font: Jens Tómasson, Servei Nacional de l'Energia, Reykiavik, Islàndia).*

A baixes temperatures ( $< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), s'aprofita directament la calor o l'aigua calenta per a processos industrials, calefacció, ACS, usos agrícoles o balnearis, amb la limitació de situar el consum en el mateix lloc on es trobi la font. A temperatures mitjanes i altes ( $> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) la calor es pot convertir eficaçment en electricitat, com en una central tèrmica.

El potencial geotèrmic mundial és dues mil vegades superior al de les reserves conegudes de carbó, i els països menys desenvolupats són els que disposen dels millors recursos. Actualment, més de 20 països es beneficien d'aquesta energia, amb 330 plantes generant electricitat. Quasi la meitat de la potència instal·lada es troba als EUA, i Filipines, per exemple, genera el 14% de la seva electricitat a partir de l'energia geotèrmica. A Europa, Itàlia té les instal·lacions més importants. El potencial a Espanya és de 600.000 Tep anuals, però actualment només se n'aprofiten 3.400, cap d'elles per a producció elèctrica.

L'impacte ambiental és sensiblement inferior que el de les energies convencionals, especialment l'ocupació de terreny i les emissions de substàncies contaminants a l'aire i a l'aigua, que poden reduir-se enormement amb la reinjecció de líquids i gasos.

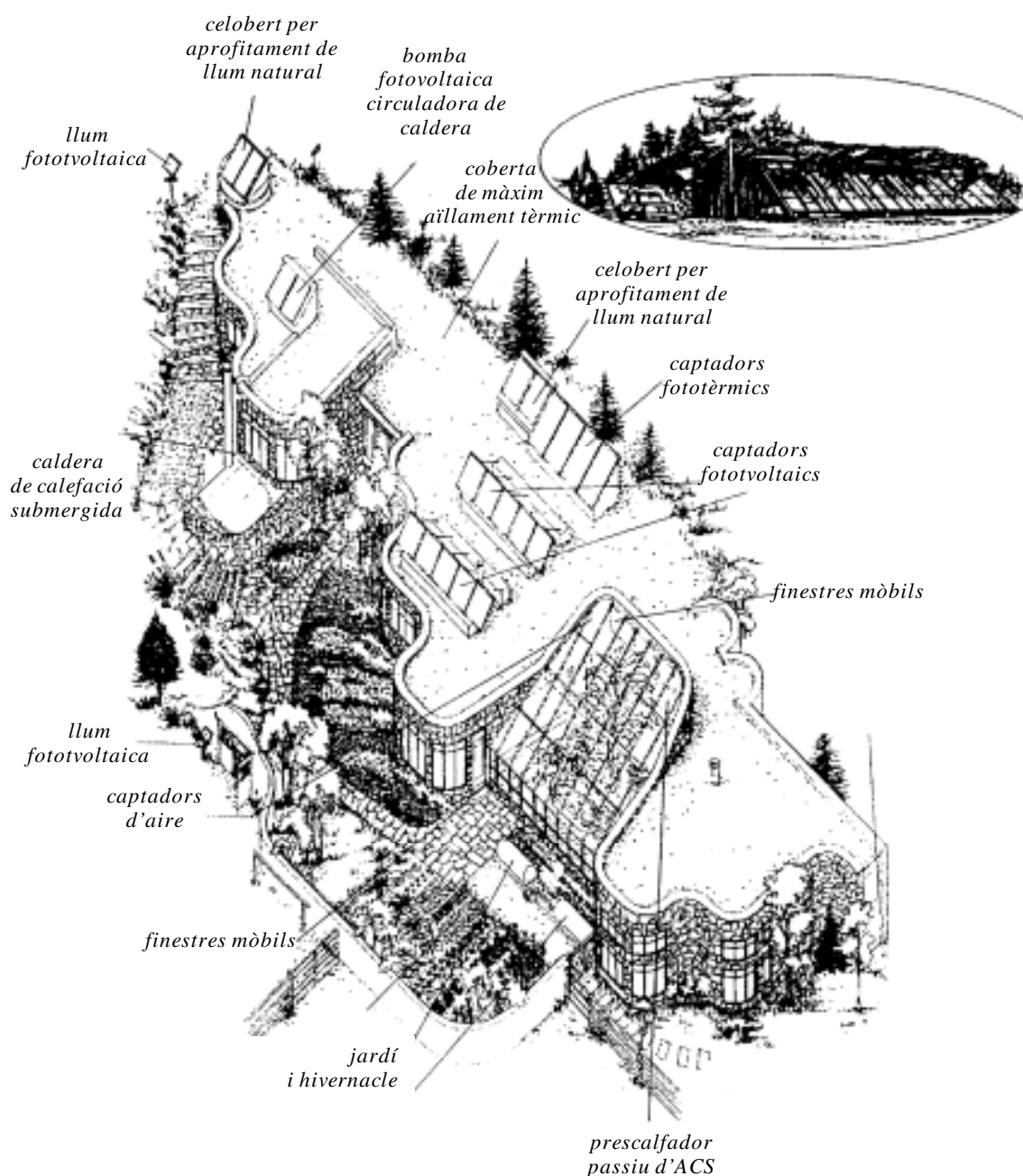
### 1.3.7 Energia fotovoltaica

El Sol emet radiacions electromagnètiques que es poden aprofitar per a l'obtenció d'energia elèctrica en una transformació directa. L'energia solar fotovoltaica està basada en l'aplicació del denominat efecte fotovoltaic, que es produeix en incidir els fotons de la llum sobre materials semiconductors (en general cristalls de silici amorf), de tal manera que es genera un flux d'electrons a l'interior del material i, en condicions adequades, una diferència de potencial que es pot aprofitar.



Fig.1.13. Un camp de panells fotovoltaics a Zambelli, nord d'Itàlia, produeix fins a 70 kW d'electricitat a fi de bombejar aigua potable a un poble de muntanya. Per assegurar un subministrament continu, 24 hores al dia, part de l'energia va a un conjunt de bateries. Quan la producció elèctrica dels panells excedeix la demanda es pot emmagatzemar també l'aigua bombejada (Font: ENEA, Roma, Itàlia).

Les cèl·lules de silici treballen tant amb els raigs solars directes com amb la llum de dia difusa a l'atmosfera. No hi ha parts mòbils, les cèl·lules tenen una vida llarga i són inherentment modulars. L'únic problema ambiental predictable és l'enorme superfície de terrenys que es requereix per a la generació elèctrica a gran escala (uns quants km<sup>2</sup> per a uns 500 MW).



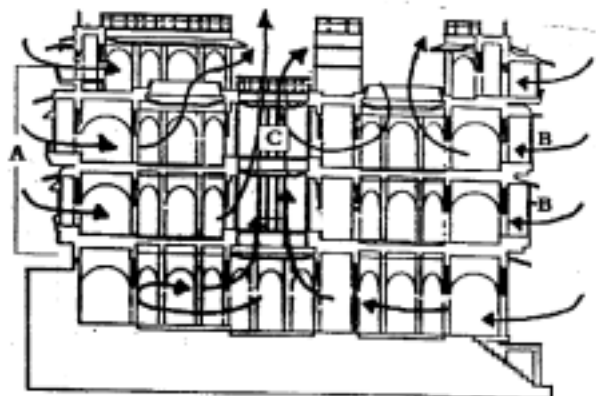
*Fig.1.14. L'aplicació de conceptes bioclimàtics a l'arquitectura comença als anys setanta. La figura superior mostra un dels primers dissenys. La figura inferior és la seu de l'Institut Rocky Mountain, a Aspen, Colorado, dissenyat per Steven Conger i l'Aspen Design Group. Aquesta edificació s'ha convertit en un exemple del disseny sostenible. L'estalvi en energia elèctrica dels diferents sistemes utilitzats és de prop del 90% i el temps d'amortització no va arribar a l'any (Font: Earthwatch Institute, Oxford, Regne Unit).*

Els sistemes de cèl·lules solars ja troben moltes aplicacions especials, sobretot a l'espai, on altres tecnologies són inapropiades o massa cares. La principal barrera al seu ús a gran escala és el cost per a fabricar-les.

### 1.3.8 Arquitectura bioclimàtica

L'arquitectura bioclimàtica té en compte, en el disseny, el clima local i en treu profit utilitzant l'orientació i certs elements, com ara vidrieres, per crear ambients d'hivernacle, o magatzems tèrmics, que fan interaccionar el medi amb l'habitatge, per obtenir un estalvi energètic que ha de ser de més del 40% respecte a edificacions normals (pel contrari, tenim la *domòtica*, que és el control informatitzat dels edificis).

Aplicant els conceptes bioclimàtics de forma correcta, en clima càlid s'arriben a aconseguir temperatures de fins a 20 °C i en clima fred podem anar des dels 16 °C fins als 18 °C sense cap altra font de calor artificial. La màxima eficiència d'aquest tipus d'arquitectura es dona en habitatges de dues o tres plantes: amb més plantes es perd eficàcia.



*Fig. 1.15 Els conceptes d'arquitectura bioclimàtica es poden aprendre de la tradició històrica: es tracta de redescobrir què feien els nostres avantpassats a l'hora de construir els seus habitatges. Per exemple, els havelis de Jaisalmer, població de l'oest de l'Índia situada enmig del desert de Thar, són construccions típiques que utilitzen murs gruixuts per protegir-se de la calor i, a més, fan servir un sistema original i sofisticat, tan antic com eficaç, per facilitar la circulació de l'aire i la ventilació. Les façanes resten protegides per cobertes (A) que donen ombra i radien calor a l'exterior; finetres de pedra perforada o jalis (B) impedeixen l'entrada directa dels raigs del sol i permeten la filtració d'aire exterior, que circula fins a uns canals d'evacuació situats al mig de l'edificació. Encara que no ho puguin semblar, les cases de pagès del Pirineu són un altre exemple clar de construccions bioclimàtiques (Font: Earthwatch Institute, Oxford, Regne Unit).*

Els conceptes bioclimàtics porten associats a la vegada els conceptes ecològics d'utilització racional de l'energia, construcció amb materials aïllants que no perjudiquin el medi ambient, etc. En aquest sentit, un dels exemples més importants d'aplicació dels conceptes bioclimàtics i de sostenibilitat s'ha donat a Sydney, en el disseny i la construcció de la vila olímpica. Dissenyada per a 15.000 habitants, en la seva construcció s'intentarà frenar el canvi climàtic, protegir la capa d'ozó, aturar la contaminació per residus tòxics, mantenir la biodiversitat i utilitzar racionalment els recursos naturals. Com? Doncs mitjançant electrodomèstics eficients, construcció bioclimàtica amb el màxim aprofitament de la llum natural i utilització de llum artificial amb bombetes fluorescents compactes, subministrament d'aigua calenta i electricitat per energia solar, habilitació de zones per a vianants, carrils bici, trens, tranvies..., utilització de sistemes aïllants de fibres naturals i frigorífics *greenfreeze* lliures de CFC, HCFC, sense PVC a la construcció, sense materials sintètics com aïllants, sense embalatges de PVC, implantant vegetació natural amb espècies autòctones, regenerant zones humides pròximes, utilitzant fustes procedents de boscos no verges, utilitzant sistemes estalviadors en distribució i utilització, sistemes de depuració biològics per a aigües residuals i sistemes de reutilització d'aigües residuals no tòxiques (per regar, refrescar, etc).

### 1.3.9 Energia fototèrmica activa

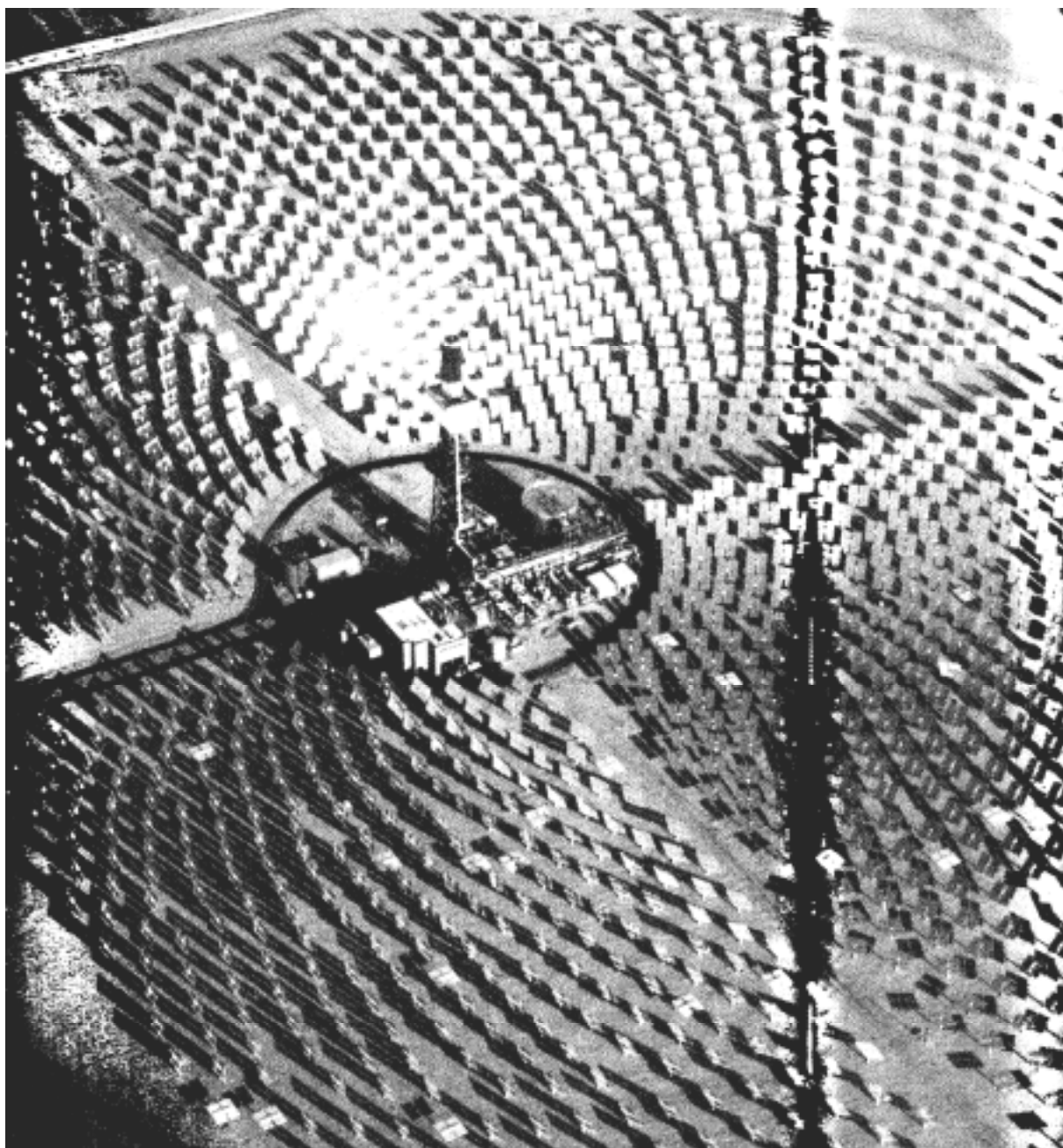
Al llarg d'aquest llibret, ens centrarem en l'estudi de l'aprofitament de l'energia solar en l'àmbit tèrmic. L'ús de la llum del Sol per subministrar calor de baixa temperatura per a calefacció té una llarga història en molts llocs. Al nord d'Europa és àmpliament acceptada i a països com Israel és de forçosa adopció. A Dinamarca, de 3.500 sistemes instal·lats, el 70% produeix només aigua calenta sanitària i la resta combinen aigua calenta i calefacció. La tecnologia ja està totalment a punt, però els interessos són molts i molt diversos per a una adopció generalitzada d'aquesta tecnologia.

L'any 1995, a Catalunya hi havia més de 2.000 instal·lacions solars tèrmiques (no totes en funcionament), amb una superfície total instal·lada de 38.950 m<sup>2</sup>. Segons aquestes dades, Catalunya representa quasi el 13% del parc solar tèrmic de l'Estat.

Cal tenir en compte que un captador solar de 2 m<sup>2</sup> de superfície pot produir fins a 150 litres d'aigua calenta cada dia, fet que estalvia l'emissió d'aproximadament 1 tona de CO<sub>2</sub> a l'any, és a dir, la crema de 90 kg de carbó o 130 litres de gasoil.

## 1.4 Un últim apunt

Tot i el seguit de conferències i trobades de Copenhaguen, Rio o Buenos Aires, els grans països productors i consumidors d'energia (és a dir, l'hemisferi nord) encara no acaben d'entendre els conceptes sobre els quals es discuteix, com ara biodiversitat o sostenibilitat<sup>1</sup>. El fet és que la Terra no pot acabar de gestionar per ella mateixa els desequilibris que li estem provocant: no pot redirigir el clima, ni controlar la temperatura, ni pot redreçar les lleres dels rius tal com ho havia estat fent fins a principis de segle perquè nosaltres li ho impedim. A mode d'exemple actual, tenim el fenomen del Niño. El terme el Niño és el nom curt del fenomen que els científics denominen El Niño, Oscil·lació Meridional o *ENSO* (en anglès). Part del nom prové de les observacions fetes pel científic anglès Gilbert Walker a principis de segle. Aquest científic descobrí que quan la pressió atmosfèrica és baixa sobre Austràlia, és alta a l'est de l'illa de Tahití i a l'inrevés. La pressió atmosfèrica, doncs, oscil·la entre valors alts i baixos a l'hemisferi sud.



3. Causa una degradació acumulativa de l'entorn.

4. Requereix recursos en quantitats que mai no poden ésser disponibles per tothom.

5. Conduïx a l'extinció d'altres formes de vida.

*Fig. 1.16 L'any 1982 entra en funcionament la central d'energia solar Solar One, a Barstow (Califòrnia meridional). Mil vuit-cents divuit miralls, amb una superfície total de més de 70.000 m<sup>2</sup>, reflecteixen la llum solar i la concentren en una torre central que arriba fins als 1.000 °C de temperatura. Amb aquesta temperatura s'escalfa un líquid que posteriorment permet impulsar turbines i generadors elèctrics. Tots els miralls segueixen constantment l'òrbita solar mitjançant un comandament automatitzat. Solar One produeix 10 MW de potència elèctrica (Foto: Peter Menzel/Wheeler Pictures/Focus).*

Durant èpoques sense el fenomen del Niño, l'aigua més calenta dels oceans terrestres se situa al Pacífic oest. Els vents que van d'est a oest empenyen l'aigua escalfada pel Sol tropical cap a l'oest i acumulen l'aigua calenta al voltant d'Indonèsia i altres zones a l'oest de la línia de temps internacional (IDL, capítol 2). De tant en tant, i les raons encara no són clares, els vents afluïxen la seva intensitat i l'aigua calenta acumulada a l'oest es filtra cap a l'est, a través del Pacífic, fins que xoca amb la costa d'Amèrica del Sud, s'escampa al nord i al sud de la costa, augmenta la temperatura de l'aigua i provoca el fenomen del Niño davant les costes de Perú amb un augment i millora, a la vegada, de les condicions per a l'activitat pesquera, ramadera i agrària (augment de pluges). Acostuma a passar durant els mesos freds, novembre i més aviat desembre, i per això rep del nom del Niño, en referència a l'infant Jesús.

Això que passa als oceans també afecta l'atmosfera. Les tempestes tropicals vénen alimentades per l'aire calent i humit que està en contacte amb l'oceà calent. Com més calent sigui l'aire, més forta i important serà la tempesta. A mesura que l'aigua calenta avança cap a l'est, les tempestes avancen amb ella, alimentant amb aire calent i humitat les capes superiors de l'atmosfera. Això implica una gran quantitat d'energia alliberada cosa que afecta els corrents dels vents freds de les capes altes i, en conseqüència, els seus patrons de moviment. Resultat: no només hi ha grans alteracions climàtiques a Amèrica del Nord i del Sud sinó a tot el globus terrestre. L'impacte global en el clima es tradueix en inundacions en certes parts de la Terra i sequeres extremes en d'altres.

Encara que el Niño és un fenomen natural, el cicle 1997-1998 sembla que ha tingut un impacte mediambiental força més devastador del que ens pensàvem. Això és perquè molts dels sistemes naturals que en condicions normals n'haurien mitigat l'impacte, han estat degradats o bé eliminats per l'acció humana, com ara l'activitat reguladora tant dels boscos de les illes d'Indonèsia com dels de l'Amazones, actualment cremats en bona part.

Amb aquest exemple veiem com les dimensions del desastre ecològic no són pas predibles a cap termini. Però sí que patim els efectes d'una activitat que sobreexplota els recursos que disposem. Ara per ara som una mena de paràsits per a la Terra. I de seguir amb aquests nivells actuals d'infecció només podem esperar dues coses: la mort del cos parasitat o l'eliminació, per part de l'hoste, dels paràsits que provoquen la infecció.

L'adopció d'energies renovables és una de les moltes opcions que tenim a la nostra disposició en el camí de viure no com a paràsits sinó en simbiosi amb la Terra. Són energies en les quals no hi pensem gaire perquè ens arriben suaument i sense presses, amb el fluir natural del dia a dia. Són

energies que és difícil que algú les acapari. Però a causa dels càlculs bojos del sistema econòmic vigent (que comptabilitza només els beneficis per una minoria d'éssers humans i que no té en compte els costos sobre la major part de la població) es consideren que són cares. Però ni són cares ni contaminen i són aquí per ser captades i utilitzades sempre que nosaltres estiguem disposats a aprofitar-les.

Com s'ha anat assenyalant al llarg d'aquest primer capítol, la gran incertesa sobre els futurs preus energètics, la seva producció i la creixent ansietat pública sobre les fonts existents d'energia ens exigeixen desenvolupar un sistema energètic flexible a la vegada que respectuós amb el medi. Això ha d'incloure millores de rendiments, per exemple en tecnologies avançades en combustió de carbó, i accés a les diverses fonts energètiques renovables amb els costos més baixos possibles, així com una ferma voluntat política. Han transcorregut poc més de dues dècades des que les formes renovables d'energia van començar a atreure seriosament l'atenció. Encara hi ha molta feina per fer. Però són, en definitiva, una assegurança cap al futur.





## 2 Radiació solar

### 2.1 El Sol

La font d'energia inesgotable que ha permès l'existència de la vida (tal com nosaltres la coneixem) en aquest planeta és el Sol. Amb un diàmetre aproximat de 1.400.000 km (109 vegades el de la Terra) i una massa d'  $1,99 \cdot 10^{30}$  kg (332.000 vegades la de la Terra), és un immens forn de fusió termonuclear que transforma cada segon 600.000.000 de tones d'hidrogen molecular en 596.000.000 de tones d'heli per proporcionar 4.000.000 de tones equivalents d'energia (uns  $3,7 \cdot 10^{23}$  kW!). Així, tot i que cada dia perd 345.000.000.000 de tones de gasos, el Sol només ha perdut un 0,03% de la seva massa original i li resta encara una vida calculada teòrica que pot anar des dels 5 als 7 mil milions d'anys (com a referència, pensem que la Terra té una edat aproximada de 4.600 milions d'anys).

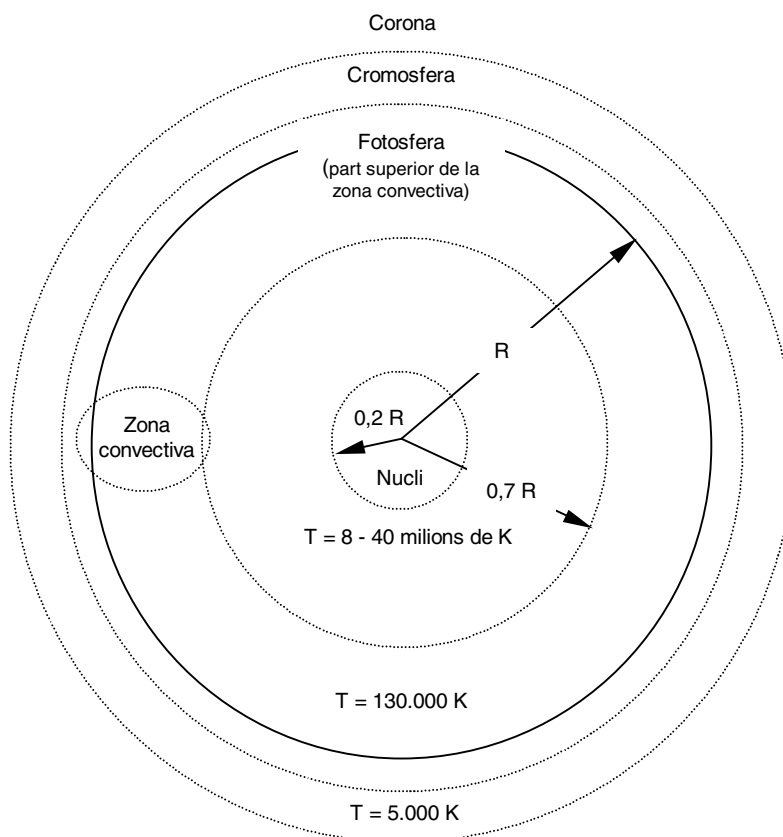


Fig. 2.1 Estructura esquemàtica del Sol (de radi  $R$ ).

El Sol és una estrella de l'anomenada seqüència principal, de tipus espectroscòpic G0, formada per nucli, fotosfera, cromosfera i corona (Fig. 2.1). El *nucli* del Sol és un forn de fusió a una temperatura mitjana de 20 milions de graus Kelvin. La *fotosfera* és la part exterior, el seu disc visible, lluny del forn de fusió, i queda a 6.000 K. És la font directa d'emissió del Sol que nosaltres podem observar i que ens el fa considerar un cos negre emetent a 5.762 K, tot i que el seu espectre no sigui del tot continu (tal com mostra la figura 2.2 i com més endavant comentarem). Més enllà, la *cromosfera* és la capa de gasos que s'estén uns 10.000 km en l'espai i on s'originen les prominències solars o arcs d' $H_2$ . La part més allunyada és la *corona*, tan sols visible en eclipsis totals de Sol.

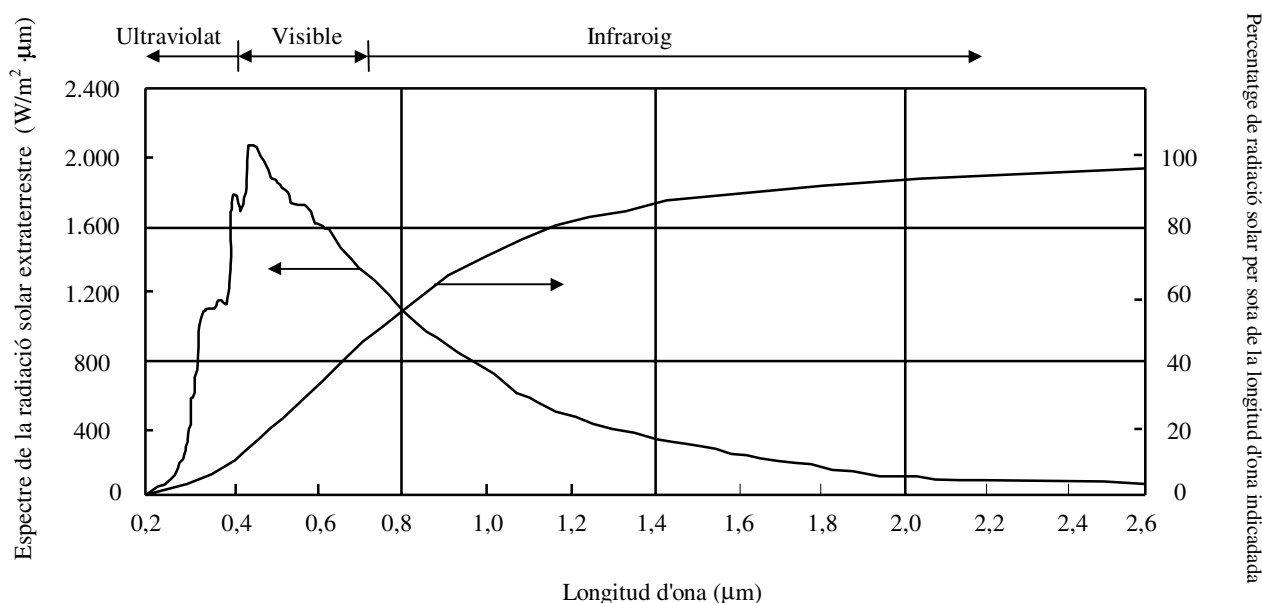


Fig. 2.2 Espectre de la radiació solar extraterrestre.

Malgrat aquestes dades imponents, el Sol només és una estrella del tot normal en el panorama galàctic: és important per la seva proximitat però no per la seva unicitat.

Conté molts, sinó tots, dels elements presents a la Terra tot i que els més abundants són l'heli i l'hidrogen, que representen el 20% i el 78% de la seva massa respectivament.

## 2.2 Radiació solar extraterrestre

La Terra es mou al voltant del Sol demarcant el *pla eclíptic*. I ho fa a una distància mitjana de  $150 \cdot 10^6$  km, distància que rep el nom d'*unitat astronòmica* (UA). La seva òrbita és lleugerament el·líptica (variació d'un 1,7%) tot i deixant el Sol situat en un dels seus focus i que fa que aquesta distància variï des de les 1,017 UA (màxim anomenat *afeli*) fins a les 0,983 UA (mínim anomenat *periheli*) al llarg de l'any. Tot i així, la Terra té altres moviments de períodes molt més llargs (Fig. 2.3). L'eix de rotació terrestre rota, a la vegada, descrivint un cercle com ho faria una baldafa quan és a punt d'aturar-se. És el moviment de *precessió*, amb un període de 22.000 anys. A la vegada també varia el seu angle de *declinació* (concepte que veurem més endavant) amb un període de 41.000 anys. I per últim, l'*excentricitat* de l'òrbita també varia, com si l'òrbita fos elàstica, amb un període de 100.000 anys.

Dels  $3,7 \cdot 10^{23}$  kW d'energia generats per l'astre rei, tan sols  $1,7 \cdot 10^{14}$  kW arriben a la Terra efectivament, però fins i tot aquesta petita fracció d'energia (0,000000046% del total emès) equival a unes 5.000 vegades el total del consum energètic de la població de la Terra.

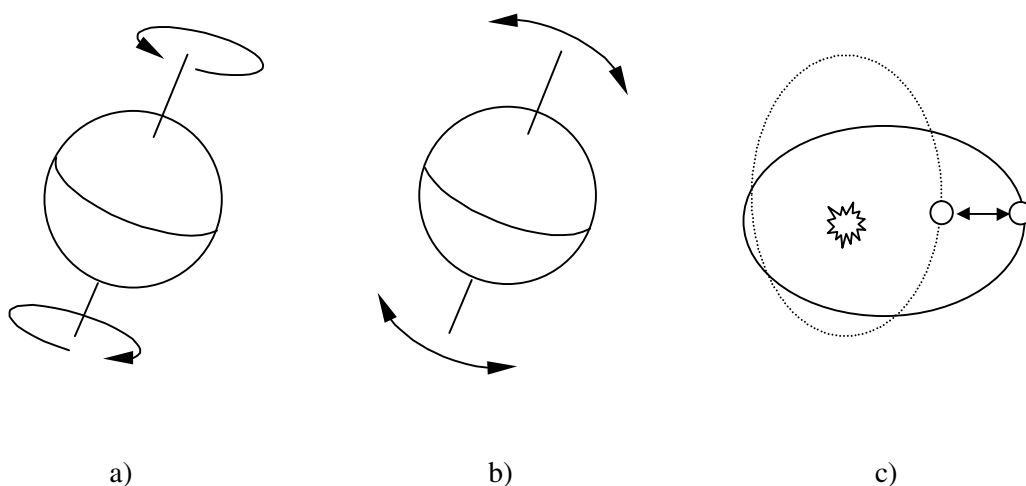


Fig. 2.3 Moviments de a) precessió, b) variació de la declinació i c) variació de l'excentricitat de l'òrbita terrestre.

La radiació solar total (al llarg de totes les longituds d'ona) que arriba a una unitat de superfície exposada perpendicularment als raigs del Sol, fora de l'atmosfera, i a la distància mitjana Terra-Sol (una UA) és una constant i rep el nom de *constant solar extraterrestre* o *constant solar* simplement. S'accepta com a valor estàndard

$$I_{CS} = 1.353 \pm 20 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

De totes formes, la radiació extraterrestre  $I_e$  que arriba a la Terra variarà al llarg de l'any per la petita excentricitat de la seva òrbita. Aquesta variació es pot expressar com

$$I_e(n) = I_{CS} \cdot \left[ 1 + 0,034 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (2.1)$$

on  $n$  és el dia de l'any comptat des de l'1 de gener ( $n = 1 \div 365$ ).

L'espectre solar extraterrestre en funció de la longitud d'ona des dels 0,2 fins als 2,6  $\mu m$ , i considerant el Sol com a cos negre emetent a 5.762 K, es representa a la figura 2.2 (ultraviolat  $-0,03 \sim 0,40 \mu m$ -, visible  $-0,40 \sim 0,70 \mu m$  i infraroig  $-0,7 \sim 1,00 \mu m$ ).

### Exemple 2.1

Quina quantitat de radiació solar obtenim en el rang visible l'u de desembre?

De la figura 2.2, veiem com les fraccions de radiació solar que resten entre 0,4 i 0,7 (rang visible) valen 0,09 i 0,47 del total emès. La radiació solar extraterrestre emesa el dia u de desembre ( $n = 335$ ) segons l'equació 2.1 val  $1.393 \text{ W/m}^2$ , i la quantitat de radiació en el visible serà

$$(0,47 - 0,09) \cdot 1.393 \text{ W/m}^2 = 530 \text{ W/m}^2$$

La distribució aproximada de la resta de radiació solar entre infraroig i ultraviolat és de 53% i 9% respectivament (que pel mateix dia implicaria  $725$  i  $100 \text{ W/m}^2$  respectivament).

Ara bé, per aplicacions de l'energia solar a nivell de superfície terrestre és essencial que tinguem en compte la interacció, per ara omesa, de la radiació amb l'atmosfera terrestre. Els dos principals mecanismes d'interacció són l'absorció i la dispersió. El resultat d'aquests dos mecanismes és el de reduir la radiació directa i, a més, la d'introduir un component *difús* de la radiació, que més endavant estudiarem.

## 2.3 Relacions astronòmiques

Per arribar a un disseny acurat de qualsevol equip tèrmic que utilitzi l'energia solar, ens cal tenir la capacitat de predir l'energia disponible en un determinat lloc i en un determinat moment. La mesura de la radiació solar requereix un seguit d'aparells dels quals no sempre es pot disposar, però hom ha de ser capaç d'efectuar els seus càlculs a qualsevol lloc i per qualsevol instant de temps. Perquè això sigui possible, necessitem conèixer quines relacions hi ha entre el Sol i la Terra i com influeixen en la radiació que rebem cada dia.

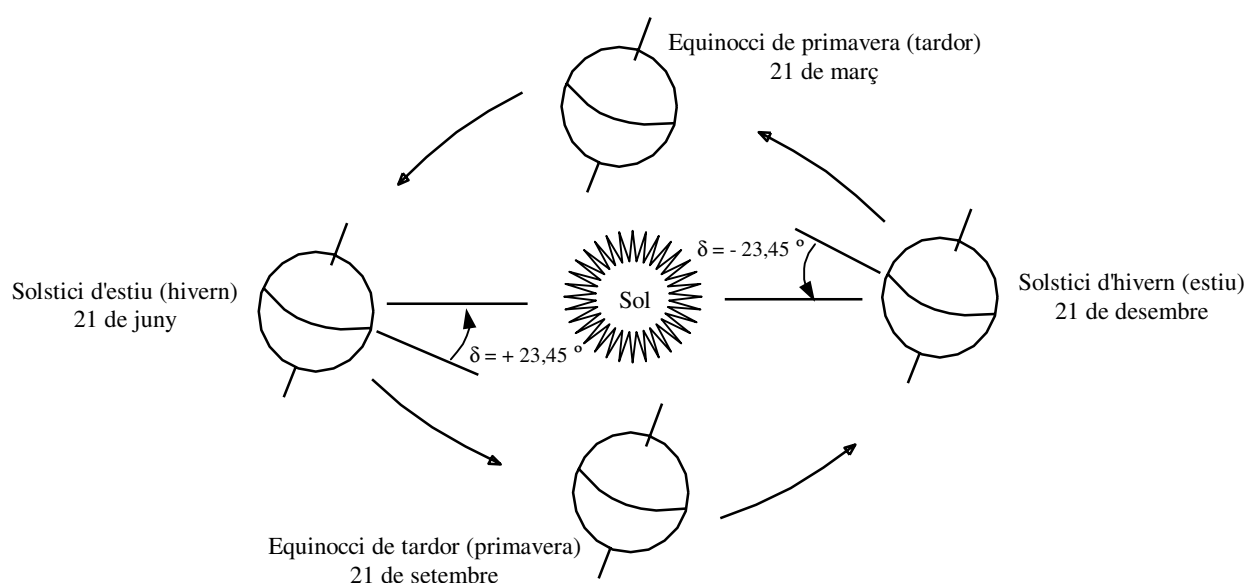


Fig. 2.4 Declinació (entre parèntesi, l'estació corresponent a l'hemisferi sud).

A mesura que la Terra gira al voltant del Sol (*translació*), gira, a la vegada, al voltant d'un eix imaginari que apunta cap a l'estrella Polar (*rotació*). L'eix normal a aquest, resta inclinat  $23^{\circ}27'8,2''$  (aproximadament  $23,45^{\circ}$ ) respecte del pla orbital, com mostra la figura 2.4. En conseqüència, l'angle entre l'Equador terrestre i el pla orbital marcat per la línia Sol-Terra varia al llarg de l'any entre  $\pm 23,45^{\circ}$ . Aquest angle l'anomenem *declinació* ( $\delta$ ) i ve donat per l'equació

$$\delta \cong 23,45^{\circ} \cdot \sin \left[ 360^{\circ} \cdot \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (2.2)$$

amb declinacions positives al nord de l'Equador i negatives al sud. El valor de la declinació calculat amb l'equació 2.2 pateix un error de  $+0,37^{\circ}$  (desviació màxima positiva) per l'u de maig, i de  $-1,70^{\circ}$  (desviació màxima negativa) pel nou d'octubre.

Com podem suposar, la declinació (ajudada una mica per l'excèntrica de l'òrbita) ens proporciona les diferents estacions anuals. Per exemple, per l'hemisferi nord, les declinacions negatives, estacions de tardor i hivern, implicaran una inclinació dels raigs solars molt més obliqua i molt menys perpendicular sobre la superfície terrestre que no pas per declinacions positives, corresponents a les estacions d'estiu i primavera.

Com il·lustra la figura 2.5, la posició relativa del Sol al firmament respecte d'un punt a la superfície terrestre es pot definir per dos angles: l'*altitud solar* ( $\alpha_s$ ), entesa com l'angle entre la línia que passa pel punt i el Sol, i la línia que passa pel punt i és tangent a la superfície terrestre, i l'*azimut solar* ( $\gamma_s$ ), entès com l'angle entre la línia anterior, la tangent a la superfície terrestre, i la línia coincident amb el meridià local, en direcció nord-sud terrestre. Es pren positiu mesurat cap a l'est i negatiu mesurat cap a l'oest en ambdós hemisferis. El complementari d' $\alpha_s$  s'anomena *zenit solar* i es representa per  $\zeta_s$ .

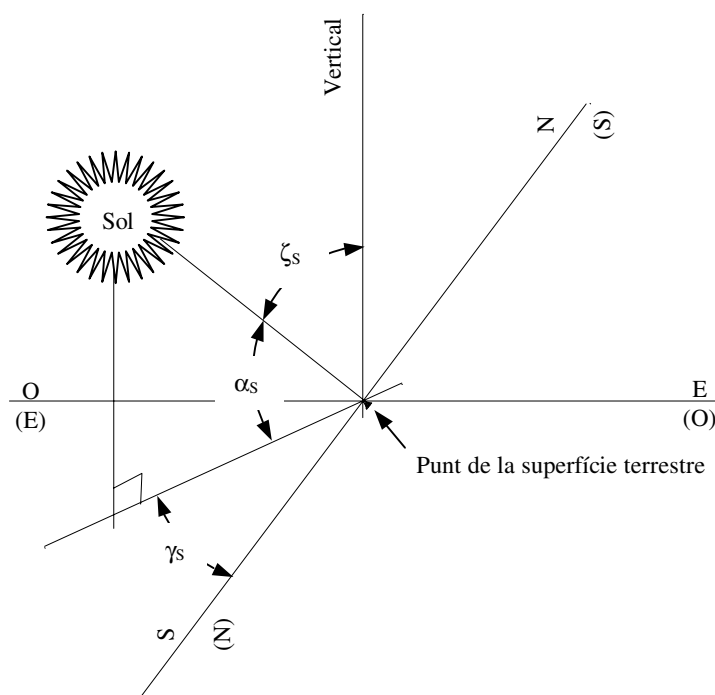


Fig. 2.5 Altitud, zenit i azimut solar per l'hemisferi nord (sud).

La posició del Sol al cel serà, doncs, funció de la situació del punt a la Terra, de l'època de l'any i del moment del dia.

- La posició del punt a la Terra vindrà donada per la *latitud*  $\phi$  (a l'equador,  $\phi = 0$ , mentre que al nord  $\phi$  és positiu i al sud  $\phi$  és negatiu).
- L'època de l'any vindrà donada per la declinació solar anteriorment definida.
- I el moment del dia s'especificarà per l'*angle horari*  $\omega$ .

L'*angle horari* es defineix com a 0 en el moment del migdia solar local ( $\gamma_s = 0$ ) i augmenta de  $15^\circ$  en  $15^\circ$  per cada hora que resti per arribar al migdia solar (p.ex., per a les 08.00 del matí --temps solar-- tindrem  $\omega = 60^\circ$ ) i disminueix de  $15^\circ$  en  $15^\circ$  per cada hora que passi del migdia solar (p.ex., per a les 15.00 de la tarda --temps solar-- tindrem  $\omega = -45^\circ$ ) a tots dos hemisferis. Podríem dir que és una mesura que ens relaciona el temps solar i la posició celeste del Sol. Si ens hi fixem, el fet que el Sol tardi 24 hores a “donar una volta sencera a la Terra” (pensem que és la Terra la que gira sobre d'ella mateixa en 24 hores), fa que per cada hora que passa, dels  $360^\circ$  que tenim per “voltar”, el Sol n'hagi recorregut  $15^\circ$  ( $360^\circ / 24 \text{ hores} = 15^\circ \text{ per hora}$ ). Fixem-nos, a la figura 2.6, com dividim el món en els diferents fusos horaris i com varia el temps per a cada regió: quan per a nosaltres són les 12 del migdia (meridià de Greenwich), a l'altre extrem de món són les 12 de la nit (línea internacional de canvi de data).

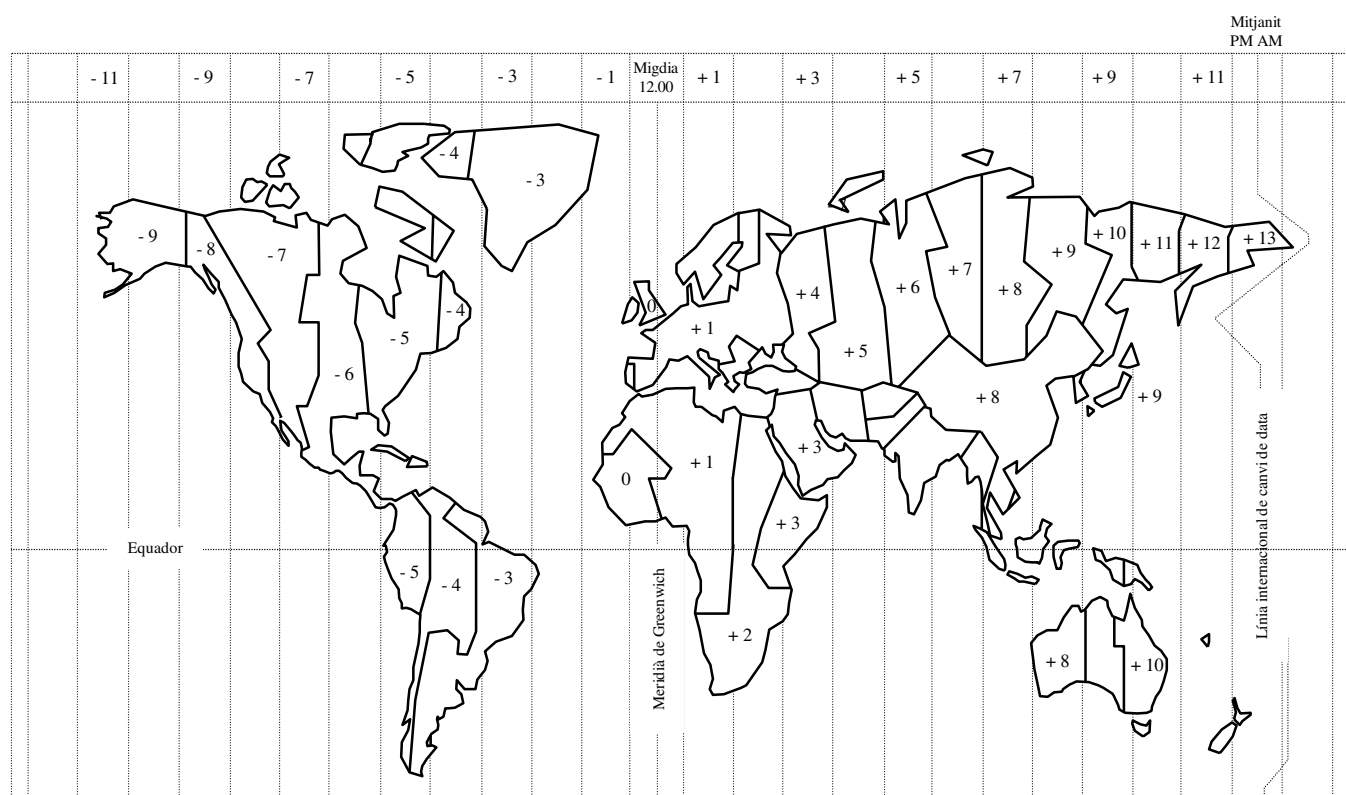


Fig. 2.6 Divisió horària del mapa terrestre. Els temps de relloige es mostren per sota o per sobre del temps de Greenwich, ignorant qualsevol tipus de variació estacional (p.ex., quan és migdia al Regne Unit, són les 7 del matí a Washington DC i les 9 de la tarda a Tòquio).

Les equacions que ens permeten relacionar els angles anteriors s'obtenen mitjançant geometria esfèrica i a partir de la qual podem escriure

$$\sin \alpha_s = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (2.3)$$

i

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \alpha_s} \quad (2.4)$$

### Exemple 2.2

Determina la posició del Sol a les 09.00 i a les 14.00 (temps solar) a Houston ( $\phi = 30^\circ$ ) i a Rio de Janeiro ( $\phi = -23^\circ$ ), el dia 1 de febrer.

De l'equació 2.2 tindrem

$$\delta \cong 23,45^\circ \cdot \sin \left[ 360^\circ \cdot \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right] = 23,45^\circ \cdot \sin \left[ 360^\circ \cdot \left( \frac{284 + 32}{365} \right) \right] = -17,5^\circ = -17^\circ 30' 59''$$

cosa que implica hivern a l'hemisferi nord i estiu al sud.

Les 09.00 impliquen 3 hores per arribar al migdia solar ( $12.00 - 09.00 = 3$ ). Això és un angle horari de  $\omega = 3 \cdot 15^\circ = 45^\circ$ . Les 14.00 impliquen 2 hores que passen del migdia solar ( $12.00 - 14.00 = -2$ ). Això és un angle horari de  $\omega = -2 \cdot 15^\circ = -30^\circ$ . A partir d'aquests resultats i de les equacions 2.3 i 2.4 podem omplir la taula inferior. Fixem-nos com el canvi ràpid de l'azimut solar per Rio és degut a què el Sol cau quasibé sobre del cap dels brasilers pel seu migdia solar ( $\alpha_s = 84,5^\circ$ ) i passa d'est a oest molt ràpidament.

	Houston		Rio de Janeiro	
	09.00	14.00	09.00	14.00
$\delta$	-17,5	-17,5	-17,5	-17,5
$\phi$	30	30	-23	-23
$\omega$	45	-30	45	-30
$\alpha_s$	25,7	34,4	47,6	88,7
$\gamma_s$	48,4	-35,4	61,4	-84,5

Els moments de sortida i posta de Sol així com la durada del dia es poden calcular a partir de l'equació 2.3 com

$$\alpha_s = 0 \rightarrow \sin \alpha_s = 0 \rightarrow 0 = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_{sp} \quad (2.5)$$

on  $\omega_{sp}$  és l'angle horari de sortida (o posta) del Sol i que es pot expressar com



$$\omega_{sp} = \arccos(-\operatorname{tg}\phi \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad (2.6)$$

La durada del dia  $d$  és dues vegades l'angle horari de posta (o sortida). En hores, queda com

$$d = \frac{2}{15^\circ/\text{hora}} \cdot \omega_{sp} \quad (2.7)$$

on  $\omega_{sp}$  s'expressarà ara en graus.

La tradició pagana mundial ha associat el moviment de la Terra i la durada dels dies de manera singular. Per exemple, cadascun dels dos punts de l'eclíptica (òrbita de la Terra al voltant del Sol) per als quals el valor de la declinació pren el seu valor màxim (+) o mínim (-) rep el nom de *solstici*, i marca els dies solars de durada màxima (nit més curta, solstici d'estiu, el 21 de juny) i de durada mínima (nit més llarga, solstici d'hivern, el 21 de desembre).

Similarment, cadascun dels dos punts de l'eclíptica en els quals la declinació val zero rep el nom d'*equinocci*. En tenim un a la primavera i un a la tardor i són els únics dies de l'any en els quals cada punt de la superfície terrestre es mou essencialment dintre del pla orbital relatiu del Sol. La figura 2.7 ens mostra com es veu la Terra des del Sol durant els solsticis i els equinoccis. Que les línies de latitud constant quedin rectes als equinoccis il·lustra el fet que durant aquests dies, i per cada punt de la superfície terrestre, el Sol sortirà per l'est i es pondrà per l'oest.

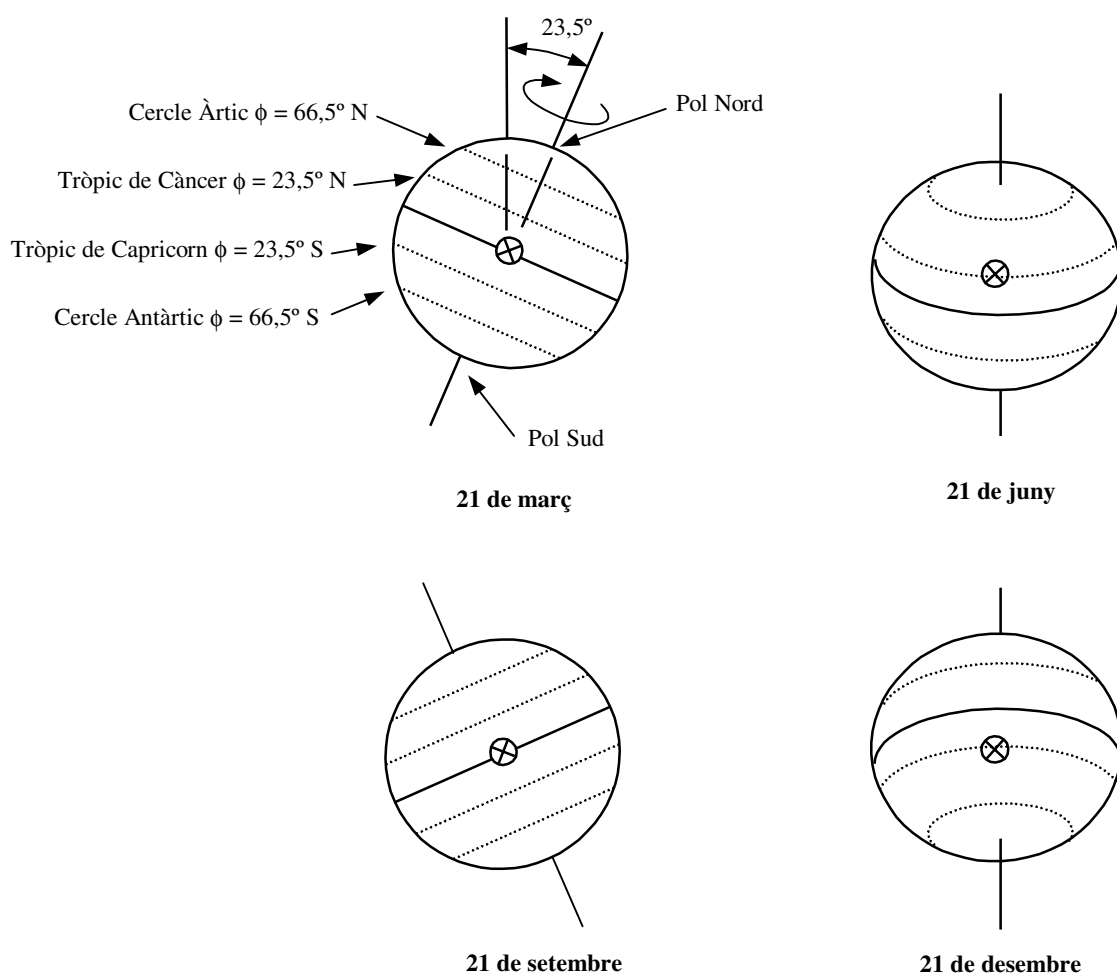


Fig. 2.7 La Terra vista des del Sol.

Els tròpics de Càncer, de latitud  $23,5^\circ$ , i de Capricorn, de latitud  $-23,5^\circ$ , són les latituds més al nord i al sud respectivament, a les quals el Sol assoleix un angle de zenit igual a  $0^\circ$  (directament sobre del cap) durant almenys un dia a l'any. Similarment, els cercles Àrtic i Antàrtic es defineixen com les latituds més enllà de les quals el Sol no s'aixeca del pla de l'horitzó almenys una vegada a l'any.

## 2.4 Temps solar

Com ja explicàvem a l'hora d'introduir el concepte d'angle horari, la Terra s'ha dividit de comú acord internacional en un sistema de 24 zones temporals, que determinen els fusos horaris a mode de talls de formatge al llarg dels  $360^\circ$  de la circumferència terrestre. Físicament aquests fusos comprenen la Terra existent entre dos meridians separats  $15^\circ$  (obviant algunes modificacions de tipus fronterer, polítiques o naturals) i tots vénen fixats com a positius a l'oest del meridià  $0^\circ$  o meridià de Greenwich. La magnitud que determina la posició d'aquests fusos horaris és la *longitud* i se simbolitza per la lletra  $\lambda$  ( $\lambda_0$  pel de referència, Greenwich).

El *dia solar* a qualsevol punt del planeta es defineix pel temps transcorregut entre dos migdies solars successius (entenent com a migdia solar el moment de qualsevol dia en el qual el Sol arriba a la seva màxima altitud). Malgrat això, degut a l'excentricitat de l'òrbita terrestre i als efectes de la declinació, la durada d'un dia solar no és constant i, de fet, pot augmentar o disminuir en 30 segons d'un dia a un altre. L'efecte acumulatiu d'aquest fenomen és una variació en l'escala de temps de fins a 16 minuts i 24 segons (màxim pel 4 de novembre,  $n = 309$ ) i de fins a -14 minuts i 22 segons (mínim, negatiu, per l'11 de febrer,  $n = 41$ ) respecte del temps mitjà. Aquesta variació (la diferència entre el temps solar veritable i el temps solar mitjà) rep el nom d'*equació de temps* i pren la forma<sup>1</sup>

$$ET = 0,0072 \cdot \cos C - 0,0528 \cdot \cos(2 \cdot C) - 0,0012 \cdot \cos(3 \cdot C) - \\ - 0,1229 \cdot \sin C - 0,1565 \cdot \sin(2 \cdot C) - 0,0041 \cdot \sin(3 \cdot C) \quad (2.8) \\ \text{on } C = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{366}$$

Per no haver d'adaptar l'hora contínuament, els nostres rellotges marquen una hora mitjana a vegades força lluny de l'hora solar veritable que ens proporciona l'aparent posició del Sol al cel. La relació final entre temps solar veritable (TSV) i temps oficial local (el del rellotge) ens ha de lligar totes aquestes variacions, i alguna més, d'aquesta manera:

$$TSV = \text{Hora oficial} - \varepsilon + ET + \frac{1}{15} \cdot (\lambda_0 - \lambda) \quad (2.9)$$

on  $\varepsilon$  és la correcció eventual d'estiu ( $\varepsilon = 2$  hores, d'abril a octubre) o bé d'hivern ( $\varepsilon = 1$  hora, de novembre a març), ET és la correcció, amb el seu signe, obtinguda de l'equació 2.8 i  $(1/15) \cdot (\lambda_0 - \lambda)$  és la correcció que afegim per efectes de la longitud del lloc en qüestió respecte de la del meridià de referència (Greenwich per a nosaltres). Aquesta correcció és de quatre minuts per cada grau de longitud (60 minuts / 15 graus-hora) i només cal tenir en compte que  $\lambda_0 = 0^\circ$  sempre, i que  $\lambda$  prendrà valors negatius si cau a l'est del meridià de Greenwich i positius si cau a l'oest.

<sup>1</sup> L'equació 2.8 cal utilitzar-la en mode **radians** i multiplicar el resultat obtingut per 60, perquè aquest resultat ens ve donat amb hores i fraccions decimals d'hora.

### Exemple 2.3

Per a la ciutat de Barcelona ( $\lambda = -2^{\circ}7'$ ), quin serà el temps solar veritable el dia u de desembre si el rellotge marca les 17.35?

Amb  $\lambda_0 = 0^{\circ}$ ,  $\varepsilon = 1$  hora (hivern) i

$$\frac{1}{15} \cdot (\lambda_0 - \lambda) = \frac{1}{15} \cdot (0^{\circ} - (-2,116^{\circ})) = 0,141^{\circ}$$

és a dir, 8 minuts 28 segons (el càlcul es fa amb graus centesimals), i obtenim la taula de resultats següent:

	<i>hores</i>	<i>minuts</i>	<i>segons</i>
<i>Hora oficial</i>	17	35	00
$\varepsilon$	- 1		
<i>ET</i>		+11	+1
$\frac{1}{15} \cdot (\lambda_0 - \lambda)$		+8	+28
<b><i>TSV =</i></b>	<b>16</b>	<b>54</b>	<b>44</b>

## 2.5 Angles solars relatius a superfícies inclinades

Per vèncer els efectes que la declinació té sobre de l'angle d'incidència de la radiació solar i aconseguir interceptar aquesta radiació de la forma més perpendicularment possible, les superfícies captadores cal que estiguin inclinades un cert angle respecte de la horitzontal del sol i, a la vegada, orientades al més meridionalment possible (això és el més paral·lelament possible al meridià nord-sud de referència).

El càlcul més important en l'estudi de la radiació solar és justament el de la determinació de l'angle d'incidència del raig solar un cop disposem de la nostra superfície inclinada i orientada arbitràriament per determinar posteriorment la quantitat d'energia que hi arribarà.

La posició del Sol queda establerta per l'altitud solar ( $\alpha_s$ ) i l'azimut solar ( $\gamma_s$ ). L'orientació de la superfície irradiada (o captador, per a nosaltres) quedarà també definida pel seu azimut ( $\gamma_c$ ), mesurat des del meridià local cap a l'equador (positiu cap a l'est i negatiu cap a l'oest tant per a l'hemisferi sud com per al nord) i, a més, per la seva *inclinació*  $\beta$ , mesurada respecte del pla horitzontal. Aquesta colla d'angles s'il·lustra a la figura 2.8.

L'angle d'incidència solar relatiu a la superfície inclinada es designa amb  $\theta$ . Per tant, la fracció de radiació solar instantànea que impactarà sobre la unitat de superfície serà

$$q_s = I_s \cdot \cos \theta \quad (2.10)$$

on  $\cos \theta$  escrit en funció dels angles que coneixem queda com

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \cos(\gamma_s - \gamma_c) \cdot \cos \alpha_s \cdot \sin \beta + \sin \alpha_s \cdot \cos \beta = \\ &= \sin \delta \cdot (\sin \phi \cdot \cos \beta - \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma_c) + \\ &+ \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot (\cos \phi \cdot \cos \beta + \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma_c) + \\ &+ \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma_c \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (2.11)$$

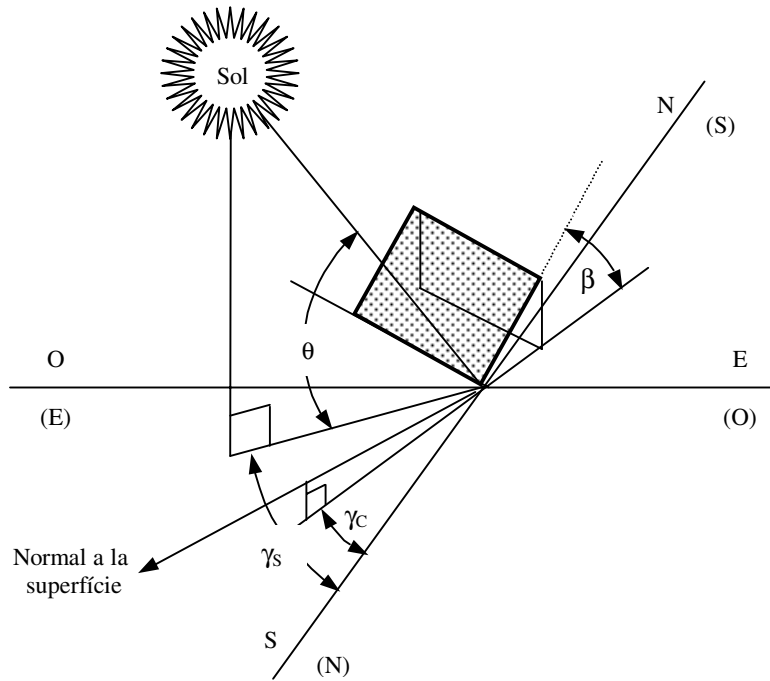


Fig. 2.8 Angles relatius a superfícies inclinades.

En alguns casos, l'equació anterior es pot simplificar:

$$\begin{aligned} \text{Superfície encarada al sud} &\rightarrow \cos \theta = \cos \gamma_s \cdot \cos \alpha_s \cdot \sin \beta + \sin \alpha_s \cdot \cos \beta = \\ (\gamma_c = 0^\circ) &= \sin(\phi - \beta) \cdot \sin \delta + \cos(\phi - \beta) \cdot \cos \omega \cdot \cos \delta \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \text{Superfície vertical} &\rightarrow \cos \theta = \cos \gamma_s \cdot \cos \alpha_s = \\ \text{encarada a l'equador} &= -\sin \delta \cdot \cos \phi + \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \omega \\ (\gamma_c = 0^\circ \text{ i } \beta = 90^\circ) & \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \text{Per una superfície horitzontal} &\rightarrow \cos \theta = \sin \alpha_s = \\ (\beta = 0^\circ) &= \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \omega \cdot \cos \delta \end{aligned} \quad (2.14)$$

A la pràctica, la inclinació del captador  $\beta$  es considera constant al llarg de l'any i s'agafen com a valors usuals els següents:

$$\begin{aligned} \text{estiu} &\rightarrow \beta = (\text{latitud geogràfica} - 15^\circ) \\ \text{hivern} &\rightarrow \beta = (\text{latitud geogràfica} + 10^\circ \text{ o } +15^\circ) \\ \text{anual} &\rightarrow \text{ajustem als valors hivernals} \end{aligned}$$

## 2.6 Mitjana mensual de radiació diària solar extraterrestre

Com vèiem a l'apartat 2.1, la quantitat de radiació que arriba al capdamunt de l'atmosfera es pot expressar mitjançant l'equació 2.1. Aquesta seria la quantitat d'energia radiant per unitat de temps i d'àrea perpendicular a la font (el Sol). Si ens interessés trobar la quantitat d'energia extraterrestre a qualsevol punt de l'esfera atmosfèrica (en superfície horitzontal), caldria multiplicar l'equació anterior pel sinus de l'altitud solar, com ara:

$$H_e = I_e(n) \cdot \sin \alpha_s = I_{CS} \cdot \left[ 1 + 0,034 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \cdot \sin \alpha_s \quad (2.15)$$

on  $H$  vol dir superfície horitzontal i el subíndex  $e$  vol dir extraterrestre.

La mitjana diària de radiació extraterrestre en una superfície horitzontal s'obté integrant l'equació anterior des del moment de la sortida ( $t_s$ ) al moment de la posta ( $t_p$ ) del Sol:

$$\begin{aligned} \overline{H}_e &= \int_{t_s}^{t_p} H_e = \\ &= \frac{24}{\pi} \cdot I_{CS} \cdot \left[ 1 + 0,034 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \cdot \left( \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_{sp} + \frac{\pi \cdot \omega_{sp}}{180} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta \right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

on la barra s'utilitza per indicar que és una mitjana diària en  $kWh/(m^2 \cdot dia)$  sempre que  $I_{CS}$  estigui en  $kW/m^2$  i  $\omega_{sp}$  estigui en graus.

La mitjana diària de radiació solar es pot transformar en una mitjana diària mensual de radiació solar seleccionant, per a cada mes, el dia en què la radiació solar diària es consideri aproximadament igual a la mitjana del mes. Els dies característics recomanats són els de la taula 2.1.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Actualment, amb l'existència dels fulls de càlcul, resoldre aquestes equacions, fins i tot d'hora en hora i de cada dia de l'any, és una tasca relativament senzilla.

Taula 2.1 Dies significatius per a cada mes

<i>Mes</i>	<i>Dia de l'any (n)</i>	<i>Data</i>
<i>Gener</i>	17	17 de gener
<i>Febrer</i>	47	16 de febrer
<i>Març</i>	75	16 de març
<i>Abril</i>	105	15 d'abril
<i>Maig</i>	135	15 de maig
<i>Juny</i>	162	11 de juny
<i>Juliol</i>	198	17 de juliol
<i>Agost</i>	228	16 d'agost
<i>Setembre</i>	258	15 de setembre
<i>Octubre</i>	288	15 d'octubre
<i>Novembre</i>	318	14 de novembre
<i>Desembre</i>	344	10 de desembre

**Exemple 2.4**

Determineu la mitjana diària mensual de radiació solar extraterrestre per una superfície horitzontal de latitud  $\phi = 40^\circ \text{ N}$  per al mes de maig.

Per al dia 15 de maig (135è de l'any), la declinació ve donada per l'equació 2.2.

$$\delta \cong 18,8^\circ$$

L'equació 2.6 ens proporciona l'angle horari de sortida o posta:

$$\omega_{sp} = \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta) = \arccos(-\tan(40) \cdot \tan(18,8)) = 106,6^\circ$$

Finalment, a partir de l'equació 2.16, la radiació diària en mitjana mensual serà:

$$\begin{aligned} \overline{H}_e &= \frac{24}{\pi} \cdot I_{cs} \cdot \left[ 1 + 0,034 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \cdot \left( \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_{sp} + \frac{\pi \cdot \omega_{sp}}{180} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta \right) = \\ &= \frac{24}{\pi} \cdot 1,353 \left[ \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right] \cdot \left[ 1 + 0,034 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot 135}{365}\right) \right] \cdot \left( \cos(40) \cdot \cos(18,8) \cdot \sin(106,6) + \frac{\pi \cdot 106,6}{180} \cdot \sin(40) \cdot \sin(18,8) \right) = \\ &= 10,88 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{dia}) = 39,15 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{dia}) \end{aligned}$$

## 2.7 Mitjana mensual de radiació diària solar terrestre sobre un captador

El dissenyador d'una instal·lació solar ha de ser capaç, per sobre de tot, de respondre a la pregunta de quina quantitat d'energia arriba al seu captador, finestra o celobert, de mitjana, cada hora, cada dia, cada mes o cada any. Un cop conegui aquesta dada ja podrà determinar les característiques del seu sistema tèrmic i dissenyar l'equip adequat per aprofitar aquesta energia.

A la superfície terrestre la insolació diària resta força allunyada dels nivells extraterrestres assolits a l'exterior de l'atmosfera: l'absorció, la reflexió i la dispersió de radiació per part de núvols i de la resta d'elements químics en suspensió i que formen la biosfera, retalla els nivells energètics de la radiació directa que arriba a la Terra de manera considerable i la transforma, a la vegada, en *radiació difusa*. Com a exemple, en dies estiuencs en els quals les ombres resten definides, més del 90% de la radiació és directa (radiació provinent directament del Sol, sense haver estat dispersada per l'atmosfera), i superant els 1.000 W/m<sup>2</sup> d'energia; en canvi, per dies amb nuvolositat apreciable, tot i que la il·luminació és uniforme, quasi no s'aprecia cap mena d'ombra pel baix nivell de radiació directa i l'elevat nivell de radiació difusa. En aquest últim cas parlem de nivells de 400 W/m<sup>2</sup>.

En l'àmbit nacional, hi ha tot un seguit d'estacions de mesura que, amb la utilització d'aparells específics, determinen la radiació diària que arriba a aquella zona en superfície horitzontal. A l'annex disposem de les taules d'aquesta dada en mitjana mensual i per a algunes ciutats espanyoles. Malgrat això, no es disposa generalment de dades de radiació solar sobre d'una superfície inclinada, i per tenir-les cal fer tot un seguit de càlculs que ara estudiarem.

La mitjana mensual de radiació diària sobre una superfície inclinada,  $\overline{H}_T$ , es pot expressar com

$$\overline{H}_T = \overline{R} \cdot \overline{H} \quad (2.17)$$

on  $\overline{H}$  és la mitjana mensual de radiació diària sobre una superfície horitzontal (obtinguda de mesures *in situ*, com les de l'annex) i  $\overline{R}$  és el quocient entre la mitjana mensual de radiació diària sobre la superfície del captador i sobre una superfície horitzontal per a cada mes, i que es pot avaluar considerant separatament els components de radiació directa, difusa i reflectida del total de la radiació que arriba a la superfície terrestre amb l'expressió

$$\overline{R} = \underbrace{\left(1 - \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\right)}_{\text{comp. directe}} \cdot \overline{R}_b + \underbrace{\left(\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\right)}_{\text{comp. difús}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right)}_{\text{comp. reflectit}} + \underbrace{\rho \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)}_{\text{comp. reflectit}} \quad (2.18)$$

on  $\overline{H}_d$  és la mitjana mensual de radiació difusa diària en superfície horitzontal,  $\overline{R}_b$  és el quocient entre la mitjana mensual de radiació directa (*beam*) sobre una superfície inclinada i una superfície horitzontal per a cada mes i  $\rho$  és la reflectància del sòl, que pot anar des de 0,2 per a superfície de pedres blanquinoses, fins a 0,7 per un superfície coberta de neu.

$\overline{H}_d$ , la radiació solar difusa, acostuma a ser difícil de calcular per què depèn de les condicions meteorològiques i de caràcter irregular. Malgrat això, la fracció difusa de la radiació total en mitjana mensual  $\overline{H}_d/\overline{H}$  es pot correlacionar amb un coeficient de transmissió de l'atmosfera que anomenem

índex de nuvolositat  $\overline{K}_T$ . L'índex de nuvolositat, per a cada mes, es pot prendre de les mateixes taules que tenim a l'annex o bé es pot calcular a partir de l'equació 2.19 com

$$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_e} \quad (2.19)$$

on  $\overline{H}$  és la mitjana mensual de radiació global diària en superfície horitzontal (la que trobem tabulada a l'annex) i  $\overline{H}_e$  és la mitjana mensual de radiació solar extraterrestre diària en superfície horitzontal, que ens proporciona l'equació 2.16.

La correlació que permet calcular  $\overline{H}_d/\overline{H}$  en funció de  $\overline{K}_T$  pren el nom de correlació de Liu i Jordan i s'expressa com:

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1,39 - 4,027 \cdot \overline{K}_T + 5,531 \cdot \overline{K}_T^2 - 3,108 \cdot \overline{K}_T^3 \quad (2.20)$$

Teòricament  $\overline{R}_b$  és una funció complicada de la transmissió de l'atmosfera. Tot i així es pot calcular per a cada mes com el quocient entre la radiació extraterrestre sobre una superfície inclinada i sobre una superfície horitzontal, segons consideracions geomètriques a partir de l'equació 2.21, com:

$$\overline{R}_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega'_s + (\pi/180) \cdot \omega'_s \cdot \sin(\phi - \beta) \cdot \sin\delta}{\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + (\pi/180) \cdot \omega_s \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta} \quad (2.21)$$

on  $\omega'_s$  és l'angle horari corresponent a la posta del Sol per una superfície inclinada donat per

$$\omega'_s = \min[\omega_s, \arccos(-\tan(\phi - \beta) \cdot \tan\delta)] \quad (2.22)$$

i  $\omega_s$  és l'angle horari corresponent a la posta del Sol per una superfície horitzontal i donat per l'equació 2.6.

Per il·lustrar aquest complex ball d'equacions, en donem un exemple.

### Exemple 2.5

*Trobeu la mitjana mensual de radiació diària incident sobre una superfície orientada al sud i inclinada  $41^\circ$  respecte de l'horitzontal a la ciutat de Lleida ( $\phi = 41^\circ 37'$ ) si la reflectància del sol és de  $\rho = 0,4$ .*



Aquests càlculs acostumen a ser enutjosos i llargs, per això la millor opció és dissenyar una taula de càlcul com la que tenim a la pàgina següent.

#### Aclariments:

- L'altitud solar màxima l'obtenim igualant a zero l'angle horari a l'equació 2.3 (perquè l'angle horari creix amb signe negatiu fins a zero al migdia solar, quan el Sol és més alt, i decreix amb signe positiu fins a arribar al mateix valor):

$$\alpha_s = \arcsin(\sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta)$$

- Atenció amb els valors de la columna 8: el resultat que obtenim ve donat amb kWh / (m<sup>2</sup>·dia) (si  $I_o(n)$  ve donat en kW/m<sup>2</sup>). Per tenir-ho tot en unes mateixes unitats, ens cal multiplicar per 3.600 i obtenir així el resultat en J/dia-m<sup>2</sup>.
- A la columna 12, per obtenir el factor  $\bar{R}_b$ , ens cal calcular el valor de l'angle horari en una superfície inclinada (equació 2.22), que ens ve definit com el valor mínim de dos angles: l'angle horari  $\omega_s$  propiament dit, i l'angle horari afectat per la inclinació de la superfície captadora i definit com  $\arccos(-\tan(\phi - \beta) \cdot \tan \delta)$  (que per al cas que el nostre captador tingui una inclinació corresponent a la latitud geogràfica, valdrà 90 graus).
- La columna 16 és la suma de les dues columnes anteriors (components directa i difusa de la radiació) més la constant de la radiació reflectida que val

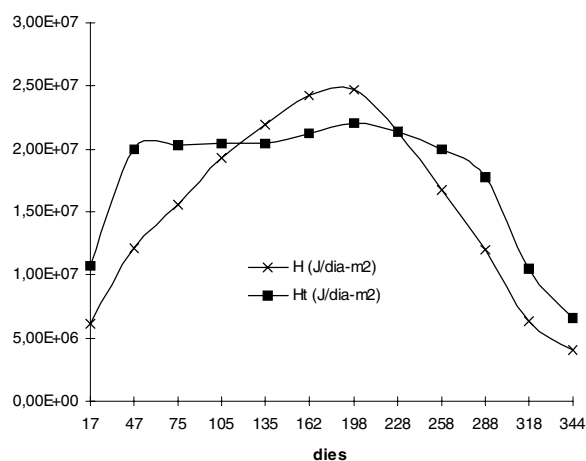
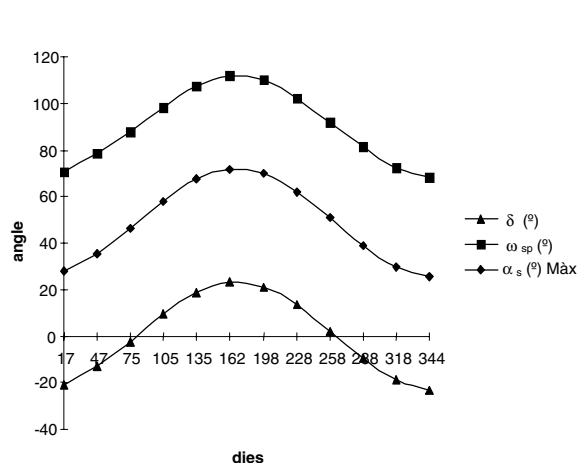
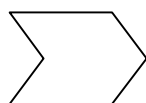
$$\text{Comp. reflectit} = \rho \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) = 0,4 \cdot \left( \frac{1 - \cos 41,61^\circ}{2} \right) = 0,05$$

- Fixem-nos en els gràfics de radiació; observem com la radiació directa que arriba a la superfície horitzontal  $\bar{H}$  augmenta a mesura que la declinació de la Terra augmenta perquè la seva altitud ho fa en conseqüència i l'energia del Sol augmenta la seva perpendicularitat respecte de la població en estudi ( $\alpha_s$  s'aproxima a 90° mentre  $\sin(90^\circ)$  s'aproxima a 1). En canvi, l'energia que arriba a la superfície inclinada és més elevada en els mesos d'hivern que no pas en els d'estiu perquè la inclinació del captador fa que aquest quedi més perpendicular al Sol durant l'hivern i, així, augmenta el guany d'energia durant el període de l'any que més es necessita.

1	2	3	4	5	6	7	8
MES	dia n	$\bar{H}$ (J/dia-m <sup>2</sup> ) s. annex	$\delta$ (°) Eq. 2.2	$\omega_{sp}$ (°) Eq. 2.5	$\alpha_s$ (°) Màx Eq. 2.3	$H_e$ (J/s-m <sup>2</sup> ) Eq. 2.15	$\bar{H}_e$ (J/dia-m <sup>2</sup> ) Eq. 2.16
G (17)	17	6,08E+06	-20,92	70,33	27,71	649,69	1,42E+07
F (16)	47	1,22E+07	-12,95	78,31	35,68	807,58	1,96E+07
M (16)	75	1,56E+07	-2,42	87,87	46,21	985,91	2,65E+07
A (15)	105	1,92E+07	9,41	98,40	58,04	1138,82	3,39E+07
M (15)	135	2,20E+07	18,79	107,44	67,42	1220,25	3,91E+07
J (11)	162	2,43E+07	23,09	112,05	71,72	1243,70	4,13E+07
J (17)	198	2,46E+07	21,18	109,96	69,81	1228,24	4,02E+07
A (16)	228	2,13E+07	13,45	102,16	62,08	1166,76	3,59E+07
S (15)	258	1,67E+07	2,22	91,95	50,85	1039,65	2,91E+07
O (15)	288	1,20E+07	-9,60	81,43	39,03	859,07	2,16E+07
N (14)	318	6,30E+06	-18,91	72,44	29,72	686,46	1,55E+07
D (10)	344	4,01E+06	-23,05	67,99	25,58	602,77	1,28E+07



9	10	11	12	13	14	15	16	17
$K_T = H/H_e$ annex o Eq. 2.19	$H_d/H$ Eq. 2.20	$1-H_d/H$	$\omega'_s$ (°) Eq. 2.22	$R_b$ Eq. 2.21	Comp. directe	Comp. difús	R	$H_T$ (J/dia-m <sup>2</sup> ) Eq. 2.17
0,43	0,44	0,56	70,33	2,37	1,34	0,38	1,77	1,08E+07
0,62	0,27	0,73	78,31	1,86	1,35	0,24	1,64	1,99E+07
0,59	0,30	0,70	87,87	1,41	0,99	0,26	1,30	2,03E+07
0,57	0,32	0,68	90	1,07	0,74	0,28	1,06	2,04E+07
0,56	0,32	0,68	90	0,88	0,60	0,28	0,93	2,04E+07
0,59	0,30	0,70	90	0,80	0,56	0,26	0,87	2,12E+07
0,61	0,28	0,72	90	0,84	0,60	0,25	0,90	2,21E+07
0,59	0,29	0,71	90	0,98	0,69	0,26	1,00	2,14E+07
0,57	0,31	0,69	90	1,26	0,87	0,27	1,19	2,00E+07
0,56	0,32	0,68	81,43	1,70	1,14	0,28	1,48	1,77E+07
0,41	0,46	0,54	72,44	2,22	1,21	0,40	1,66	1,04E+07
0,31	0,57	0,43	67,99	2,56	1,09	0,50	1,64	6,58E+06



A la taula següent es presenten les dades meteorològiques de 49 localitats espanyoles ordenades alfabèticament pel nom de la ciutat. Les dades inclouen:

$\phi$	latitud en graus nord (hi manca la longitud $\lambda$ )
$\bar{H}$	mitjana mensual de radiació diària sobre superfície horitzontal (en kJ/m <sup>2</sup> -dia)
$\bar{K}_T$	índex de nuvolositat

Aquests valors s'han d'anar modificant a mesura que vagin apareixent noves dades experimentals de radiació per a aquests punts del mapa estatal.

Albacete ( $\phi=38,92$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6410	9220	13990	16530	19820	23070	23240	19760	16400	11280	6310	5630
$\bar{K}_T$	0,49	0,5	0,54	0,49	0,51	0,56	0,58	0,56	0,58	0,55	0,44	0,48
Alacant ( $\phi=38,37$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	9360	13540	16244	20746	23720	25870	26088	22446	18522	13386	9264	7502
$\bar{K}_T$	0,58	0,63	0,58	0,59	0,6	0,62	0,64	0,61	0,6	0,59	0,53	0,52
Almeria ( $\phi=36,83$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	8918	12144	16748	20432	23404	24034	24534	22188	17962	13778	9796	7662
$\bar{K}_T$	0,53	0,54	0,58	0,58	0,59	0,58	0,61	0,60	0,57	0,56	0,53	0,50
Àvila ( $\phi=40,65$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6558	10194	12044	16260	19716	21236	24406	22664	16578	11076	6454	5004
$\bar{K}_T$	0,45	0,50	0,44	0,47	0,50	0,51	0,51	0,60	0,62	0,49	0,40	0,38
Badajoz ( $\phi=38,88$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6656	9504	13150	17588	21266	23320	23906	21142	16496	11638	7872	5568
$\bar{K}_T$	0,43	0,45	0,47	0,50	0,54	0,56	0,59	0,57	0,54	0,49	0,46	0,39
Barcelona ( $\phi=41,40$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6196	10006	13606	18170	21272	22734	22358	18966	15196	11764	6906	5862
$\bar{K}_T$	0,44	0,50	0,51	0,53	0,54	0,55	0,55	0,52	0,51	0,53	0,44	0,46
Bilbao ( $\phi=43,40$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	3804	6016	8824	9962	13562	13442	14110	11286	10722	8190	4400	3042
$\bar{K}_T$	0,30	0,32	0,34	0,30	0,35	0,32	0,35	0,31	0,37	0,38	0,30	0,27
Burgos ( $\phi=42,37$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	3708	7996	10780	14386	18110	21434	22964	20080	14452	10034	5170	2910
$\bar{K}_T$	0,27	0,42	0,41	0,42	0,46	0,52	0,57	0,56	0,49	0,46	0,34	0,24
Càceres ( $\phi=39,33$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6061	9614	14992	20273	23157	26877	31768	29218	22321	12749	7691	5852
$\bar{K}_T$	0,39	0,46	0,54	0,58	0,59	0,65	0,78	0,79	0,73	0,54	0,45	0,42
Cadis ( $\phi=36,47$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	8394	13264	16458	22270	25630	27322	27222	25710	20528	14594	9750	7878
$\bar{K}_T$	0,49	0,59	0,57	0,63	0,65	0,66	0,67	0,69	0,65	0,59	0,52	0,50
Castelló ( $\phi=39,98$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	7604	12424	15634	18496	21158	23044	23364	20306	17170	12126	7766	6806
$\bar{K}_T$	0,50	0,60	0,57	0,54	0,54	0,56	0,58	0,56	0,57	0,52	0,47	0,50

C, Real ( $\phi=38,98$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	5948	10424	12642	16584	20720	23024	25764	22956	17426	10974	6493	4612
$\bar{K}_T$	0,38	0,49	0,45	0,48	0,53	0,56	0,64	0,56	0,57	0,47	0,38	0,33
Còrdova ( $\phi=37,88$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	7400	11094	14156	17224	19014	24266	15722	23412	17988	11894	8228	6236
$\bar{K}_T$	0,46	0,51	0,50	0,49	0,48	0,59	0,46	0,63	0,58	0,49	0,46	0,42
La Coruña ( $\phi=43,37$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	5172	7638	11078	14676	15016	16876	18172	14926	13356	8244	6268	3938
$\bar{K}_T$	0,40	0,41	0,43	0,44	0,38	0,41	0,45	0,42	0,42	0,39	0,43	0,34
Conca ( $\phi=40,08$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6040	9212	11800	15266	18680	20928	23788	21468	15982	11076	6394	4968
$\bar{K}_T$	0,41	0,45	0,43	0,44	0,47	0,50	0,59	0,59	0,53	0,48	0,39	0,37
Girona ( $\phi=41,38$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	7238	10204	13624	15958	17958	17070	22052	18058	13652	10632	7400	5600
$\bar{K}_T$	0,53	0,53	0,51	0,47	0,46	0,41	0,55	0,50	0,46	0,48	0,48	0,46
Granada ( $\phi=37,18$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6880	9670	12250	15872	18594	21006	23686	18806	15452	11206	7414	5510
$\bar{K}_T$	0,41	0,44	0,43	0,45	0,47	0,51	0,59	0,51	0,49	0,46	0,41	0,36
Guadalaj, ( $\phi=40,63$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	4990	7658	9948	12998	16258	18372	23580	20474	14554	10034	5186	4166
$\bar{K}_T$	0,34	0,38	0,37	0,38	0,41	0,44	0,58	0,56	0,49	0,44	0,32	0,32
Huelva ( $\phi=37,25$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	7572	11858	1579 8	20796	24036	25632	26996	24840	20612	13088	8670	6684
$\bar{K}_T$	0,46	0,54	0,55	0,59	0,61	0,62	0,67	0,67	0,66	0,54	0,48	0,44
Oesca ( $\phi=42,15$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6434	11472	1499 4	17614	20608	22330	23894	20734	15420	11370	6772	4966
$\bar{K}_T$	0,47	0,59	0,57	0,52	0,53	0,54	0,59	0,57	0,52	0,52	0,44	0,41
Jaén ( $\phi=37,77$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	62070	9906	1467 1	18057	20189	24411	26835	24285	19646	11620	7774	6311
$\bar{K}_T$	0,38	0,45	0,52	0,51	0,51	0,51	0,66	0,65	0,63	0,48	0,43	0,42
Lleó ( $\phi=42,58$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	5600	10726	1365 2	17314	19144	23574	24820	21668	15406	10630	6972	4216
$\bar{K}_T$	0,42	0,56	0,52	0,51	0,49	0,57	0,61	0,60	0,53	0,49	0,44	0,35
Lleida ( $\phi=41,62$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6078	12168	1559 2	19226	21954	24262	24638	21340	16740	11980	6302	4006
$\bar{K}_T$	0,44	0,62	0,58	0,56	0,53	0,58	0,61	0,59	0,57	0,54	0,40	0,32

Logroño ( $\phi=42,45$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	5986	9630	13606	18254	21228	23572	25224	21396	16538	11808	6740	5024
$\bar{K}_T$	0,45	0,50	0,52	0,54	0,54	0,57	0,62	0,59	0,56	0,54	0,45	0,42
Lugo ( $\phi=43,10$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	3868	7238	8590	13566	13836	16734	17034	15242	11302	9146	5342	3156
$\bar{K}_T$	0,30	0,39	0,33	0,40	0,35	0,40	0,42	0,42	0,39	0,43	0,36	0,27
Madrid ( $\phi=40,42$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6362	9798	14150	19552	21184	23530	25874	22986	16118	10762	7326	6263
$\bar{K}_T$	0,43	0,48	0,52	0,57	0,54	0,57	0,64	0,63	0,54	0,47	0,45	0,47
Màlaga ( $\phi=36,85$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	8204	11556	17708	18882	22818	24870	25916	22316	18546	13020	10134	6236
$\bar{K}_T$	0,49	0,52	0,62	0,53	0,58	0,60	0,64	0,60	0,59	0,53	0,55	0,40
Múrcia ( $\phi=37,98$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	9546	11978	17208	11352	25288	25748	26922	23954	19050	13900	9670	7746
$\bar{K}_T$	0,59	0,55	0,61	0,61	0,64	0,62	0,67	0,64	0,62	0,58	0,54	0,53
Orense ( $\phi=42,33$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	2824	6790	14072	12094	8868	19184	16162	18176	12546	7158	5300	2440
$\bar{K}_T$	0,21	0,35	0,53	0,36	0,23	0,46	0,40	0,50	0,43	0,33	0,35	0,20
Oviedo ( $\phi=43,35$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	5360	7536	10426	12892	15280	16622	16204	14196	12100	8040	5610	4272
$\bar{K}_T$	0,41	0,40	0,40	0,38	0,39	0,49	0,40	0,40	0,42	0,38	0,38	0,37
Palència ( $\phi=42,00$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	4328	10120	12048	15530	20114	22470	24200	21866	15248	11222	6352	3672
$\bar{K}_T$	0,32	0,52	0,45	0,48	0,51	0,45	0,60	0,60	0,52	0,51	0,41	0,30
Palma M. ( $\phi=39,57$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	8364	12720	14462	17818	22922	24902	25634	22224	17606	12918	8960	6472
$\bar{K}_T$	0,55	0,61	0,52	0,51	0,58	0,60	0,63	0,61	0,58	0,56	0,53	0,47
Las Palmas ( $\phi=28,15$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	9766	11700	14880	17602	17844	15932	15358	14990	16624	12160	9650	7370
$\bar{K}_T$	0,44	0,44	0,46	0,48	0,45	0,39	0,38	0,40	0,49	0,42	0,41	0,36
Pamplona ( $\phi=42,85$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	4210	4346	11008	11318	17172	19970	21266	17748	13420	9948	4626	3244
$\bar{K}_T$	0,31	0,39	0,34	0,34	0,41	0,48	0,53	0,49	0,46	0,46	0,31	0,28
Pontevedra ( $\phi=42,43$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	5338	8862	12050	17942	16984	23022	23076	20420	14476	11226	6990	4918
$\bar{K}_T$	0,40	0,46	0,46	0,53	0,43	0,55	0,57	0,57	0,49	0,52	0,46	0,41
Salamanca ( $\phi=40,93$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	5822	8960	12436	17502	20848	22736	23068	20850	15534	10676	6114	4856
$\bar{K}_T$	0,40	0,45	0,46	0,51	0,53	0,55	0,57	0,57	0,52	0,47	0,38	0,38
Tenerife ( $\phi=28,47$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	9572	12014	15916	19778	21786	24178	25182	22878	18694	13258	9426	7170
$\bar{K}_T$	0,44	0,45	0,50	0,54	0,55	0,60	0,63	0,60	0,55	0,46	0,41	0,35

S, Sebastià ( $\phi=43,32$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	4762	6984	9546	10092	14434	14838	14922	12084	11542	9076	5226	3830
$\bar{K}_T$	0,37	0,37	0,37	0,30	0,37	0,36	0,37	0,34	0,40	0,43	0,36	0,33
Santander ( $\phi=43,47$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	4704	7268	9648	11338	15138	15740	15134	12028	11482	8984	5206	3574
$\bar{K}_T$	0,37	0,39	0,37	0,34	0,39	0,38	0,37	0,41	0,40	0,42	0,36	0,31
Saragossa ( $\phi=41,50$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	4336	10496	12982	17422	19766	23022	25138	22160	15990	10724	6264	3586
$\bar{K}_T$	0,31	0,53	0,49	0,51	0,50	0,56	0,62	0,61	0,54	0,48	0,40	0,29
Segòvia ( $\phi=40,95$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	5154	5748	11082	14626	17138	20578	23996	21666	15488	10612	5478	4164
$\bar{K}_T$	0,36	0,44	0,41	0,43	0,44	0,50	0,59	0,60	0,52	0,47	0,34	0,32
Sevilla ( $\phi=37,41$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	7160	11178	15446	19720	12400	23490	23782	21648	17544	12060	8330	6784
$\bar{K}_T$	0,43	0,51	0,54	0,56	0,57	0,57	0,59	0,59	0,56	0,49	0,46	0,45
Sòria ( $\phi=41,77$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	5258	7906	10570	13856	17800	20952	23374	19856	14056	9066	5182	4268
$\bar{K}_T$	0,38	0,40	0,40	0,41	0,45	0,50	0,60	0,55	0,48	0,41	0,33	0,34
Tarragona ( $\phi=41,42$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	7414	11544	13168	16562	18450	20552	21232	18172	13902	11168	7348	5962
$\bar{K}_T$	0,52	0,58	0,49	0,48	0,47	0,50	0,53	0,50	0,47	0,50	0,46	0,47
Terol ( $\phi=40,92$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6116	9338	11466	14408	18726	20444	22958	20276	14390	10532	6026	4192
$\bar{K}_T$	0,43	0,47	0,42	0,42	0,48	0,49	0,59	0,56	0,48	0,47	0,38	0,34
Toledo ( $\phi=39,85$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	6382	10640	12342	17184	19694	22030	24822	22266	16144	11058	6396	4562
$\bar{K}_T$	0,42	0,52	0,45	0,50	0,50	0,53	0,61	0,61	0,53	0,48	0,38	0,34
València ( $\phi=39,46$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	9338	10802	13856	18464	11686	11854	23068	24032	16032	11222	7536	6614
$\bar{K}_T$	0,61	0,52	0,50	0,55	0,55	0,53	0,57	0,66	0,53	0,48	0,45	0,48
Valladolid ( $\phi=41,65$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	4468	10354	12940	16958	19436	22800	24932	22760	16030	10924	6068	3624
$\bar{K}_T$	0,32	0,53	0,49	0,50	0,50	0,55	0,62	0,63	0,54	0,49	0,39	0,29
Vitòria ( $\phi=42,85$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$\bar{H}$ (kJ/m <sup>2</sup> -dia)	4458	8422	9198	11400	15312	16878	17628	14634	11556	9270	4916	3216
$\bar{K}_T$	0,34	0,44	0,35	0,35	0,39	0,41	0,44	0,41	0,40	0,43	0,33	0,27



## 3 Captadors solars fototèrmics

### 3.1 Tipus de captadors

L'objectiu essencial de qualsevol sistema tèrmic solar és transformar l'energia que prové del Sol per poder-la captar i transportar de la manera més econòmica i eficaç possible. Les aplicacions poden ser directes, en forma de calor, o bé indirectes, utilitzant aquesta calor per obtenir treball mecànic en un eix.

Quasi tots els sistemes tèrmics que utilitzen l'energia solar com a font primària es poden representar per un mateix diagrama bàsic (figura 3.1), que consisteix en el que s'entén per *captador solar*, l'element essencial, que ens permet absorbir l'energia radiant, més un element d'acumulació, que ens permet subministrar la citada energia quan ho exigeix la demanda.

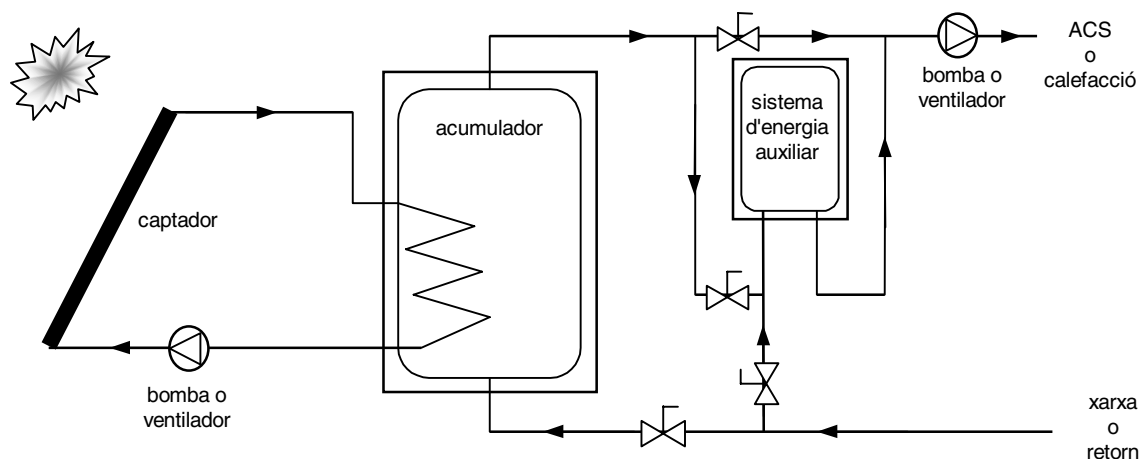


Fig. 3.1 Equema bàsic d'un sistema tèrmic solar.

En aquest capítol ens centrarem en l'estudi dels captadors solars en l'àmbit domèstic, perquè és l'aplicació que més endavant desenvoluparem. Una primera classificació de captadors seria la donada per la taula 3.1.



Taula 3.1 Classificació dels captadors solars.

<i>Temperatura del procés</i>	<i>Temperatura baixa (30 °C – 100 °C)</i>	<i>Temperatura mitjana (100 °C – 400 °C)</i>	<i>Temperatura alta (400 °C - 3.000 °C)</i>
<b>Captador</b>	Captador pla (no concentrador)	Concentrador lineal o esfèric	Concentrador de disc parabòlic Concentrador de camp d'heliòstats
<b>Aplicació</b>	Aigua calenta sanitària Calefacció Escalfament de piscines Assecatge Dessalinització Destil·lació	Processos industrials Refrigeració (cicles d'absorció) Processos químics Dessalinització	Centrals solars: fototèrmiques fotovoltaïques fotoquímiques Forns solars: tractaments tèrmics recerca de materials

De forma general, es pot fer una primera gran divisió entre captadors *no concentradors* i *concentradors*.

Els primers són, de lluny, els més utilitzats en aplicacions domèstiques i el *captador pla* és el més conegut. El disseny bàsic dels captadors plans utilitzats per escalfar aigua i aire es mostra a les figures 3.2 i 3.4 respectivament.

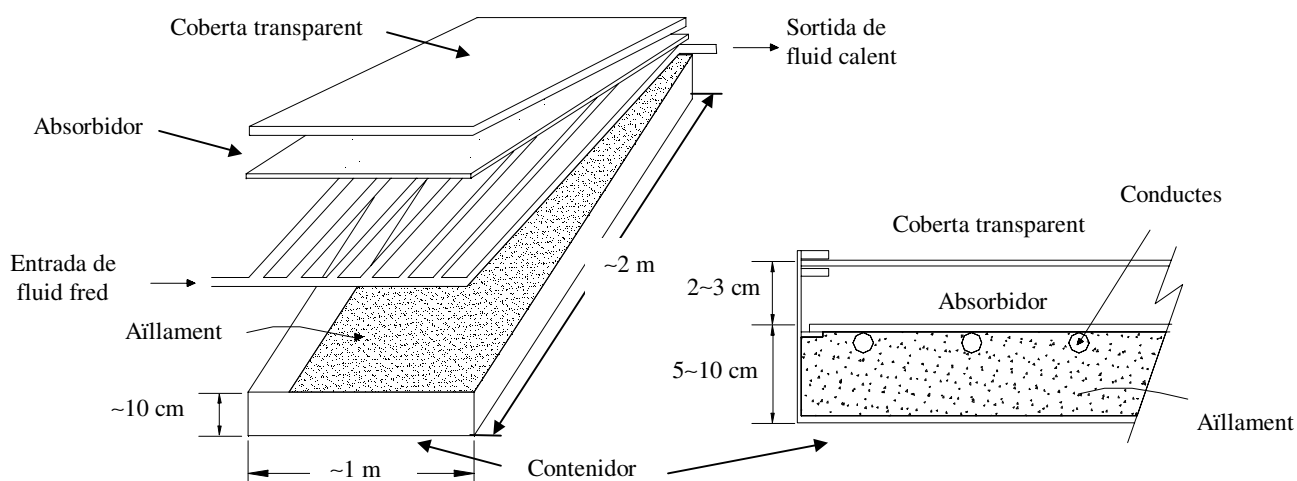


Fig. 3.2 Captador pla per a líquid de coberta única i secció transversal.

### 3.1.1 Captadors solars plans d'aigua

Els captadors plans d'aigua són els més utilitzats habitualment. Tot i així, la descripció que aquí se'n fa i els conceptes dels quals es tracta són aplicables a captadors que funcionin amb altres fluids portadors de calor (com, per exemple, aire o olis tèrmics).

El cor d'aquests captadors és la *superfície absorbidora* encarregada de transferir l'energia del Sol al fluid portador de calor. Els materials que formen aquesta superfície inclouen el coure i l'alumini (els més comuns), així com l'acer, el vidre i el plàstic. En sistemes per aigua, el fluid acostuma a circular per l'interior de tubs units a superfícies aletejades que serveixen d'absorbidor (figura 3.3).

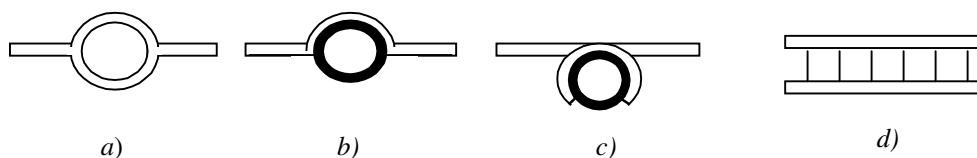


Fig. 3.3 Detalls dels tubs aletejats dels captadors per aigua: a) extrudit, b) soldat, c) unió forçada, d) multicanal per absorbidors de baixa conductivitat.

La superfície absorbidora s'acostuma a cobrir amb algun tipus de material que permeti una elevada absorptivitat solar i sovint ens podem trobar amb el que anomenem *superfícies selectives*. Les superfícies selectives són superfícies amb tractaments superficials de tipus negre de zinc, negre de crom i pintures acríliques, que, a més d'una elevada absorptivitat, tenen una baixa emissivitat a la banda infraroja.

D'altra banda, disposem d'una coberta per sobre de la superfície absorbidora que ens redueix les pèrdues per convecció i radiació tèrmica des del captador. Les cobertes poden ser de vidre, plàstic o fibra de vidre, però han de ser transparents per permetre el pas de la radiació. Per últim, cal un bon aïllament a les parts posterior i laterals del captador per limitar les pèrdues per conducció a l'exterior.

### 3.1.2. Captadors solars plans d'aire

Els sistemes solars per aire tenen una sèrie d'avantatges i de limitacions respecte als sistemes solars en què el fluid portador de calor és líquid.

En general, tenen una resposta ràpida a la radiació i es poden integrar en sistemes convencionals de calefacció, ventilació i aire condicionat mitjançant elements fàcils de controlar (com ara els ventiladors). L'avantatge més important és que no presenten cap mena de problema ni per congelació ni per corrosió. En aquest sentit, l'estanqueïtat del sistema per evitar fuites es relativitza i, si n'hi ha, no són tan importants com en el cas de sistemes per líquid.

Ara bé, els sistemes solars que utilitzen aire pateixen problemes produïts per velocitats a vegades excessivament elevades, i cal un estudi acurat per minimitzar els consums elèctrics dels ventiladors (cosa que s'aconsegueix minimitzant les pèrdues de càrrega en els conductes d'aire). També cal preveure un sistema de proteccions contra la pols i la humitat.

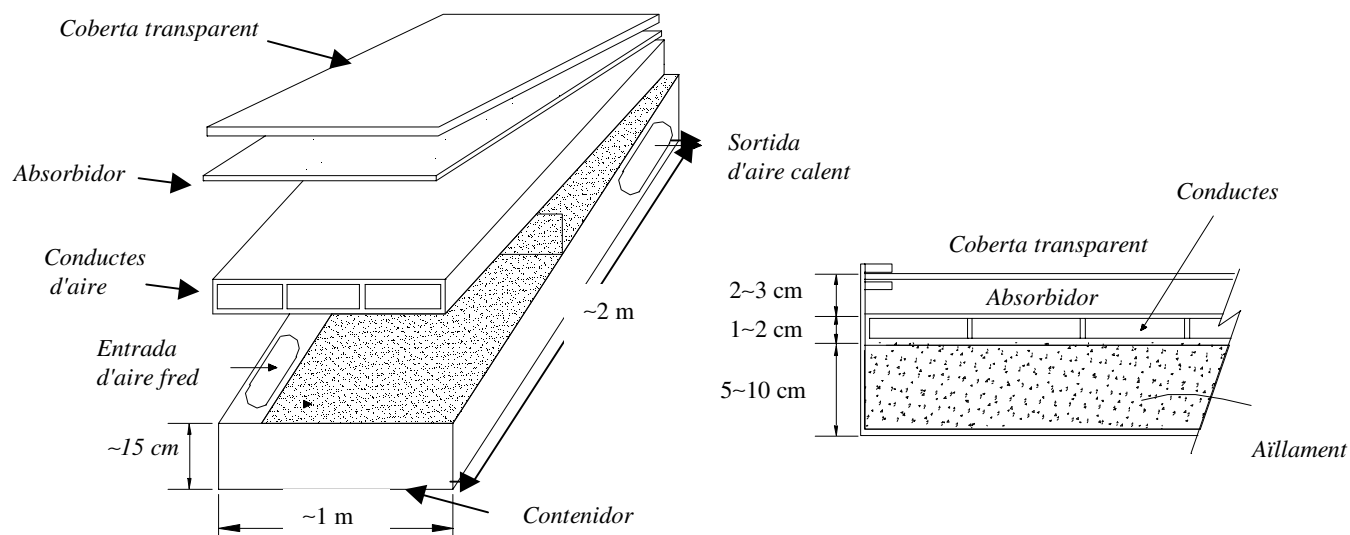


Fig. 3.4 Captador pla per aire de coberta única i secció transversal.

En els captadors solars d'aire, l'aire acostuma a circular entre dues plaques metàl·liques que separen l'aire de la coberta i l'aïllament posterior. En el captador d'aire, la placa absorbent pot ser metàl·lica o d'un altre material, però és habitual la utilització de plaques en forma de U o V per augmentar la superfície de contacte i, en conseqüència, l'acció d'escalfament.

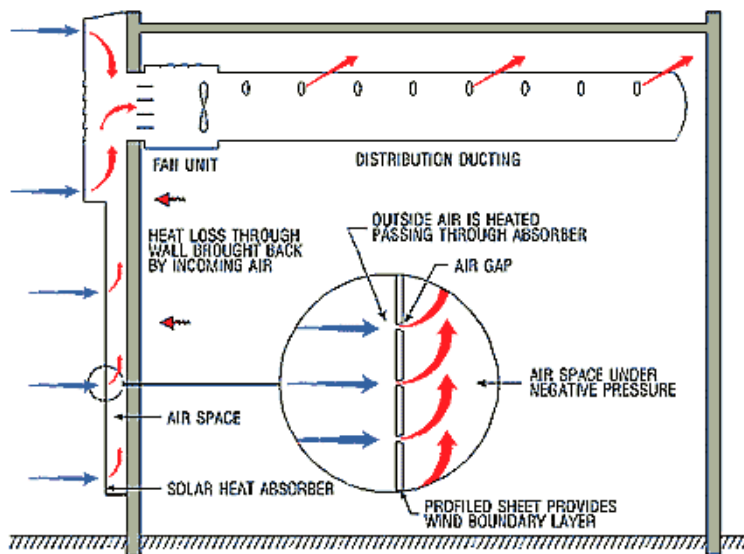


Fig. 3.5 Funcionament de sistema solar d'aire Solarwall (Estats Units) a l'hivern.

Els captadors solars d'aire són més fàcils d'integrar en la pell dels edificis. Poden formar part estructural de sostres, façanes, etc., i fins i tot poden tenir altres funcions no energètiques, com ara fer de barreres de so. A l'anterior figura es mostra un exemple de sistema solar d'aire basat en una superfície metàl·lica amb petits foradets perquè passi l'aire i que s'instal·la en façanes sud d'edificis.

### 3.1.3. Captadors de tub de buit

Altres tipus de captadors no concentradors són els que utilitzen els *tubs de buit* (figura 3.6). Aquests captadors aprofiten el buit creat al seu interior per eliminar les pèrdues per convecció i augmentar així la temperatura del fluid portador de calor amb menys necessitat de superfície de captació efectiva. També permeten més integració en l'àmbit arquitectònic perquè possibiliten la seva instal·lació, per exemple, a les arestes de la construcció.

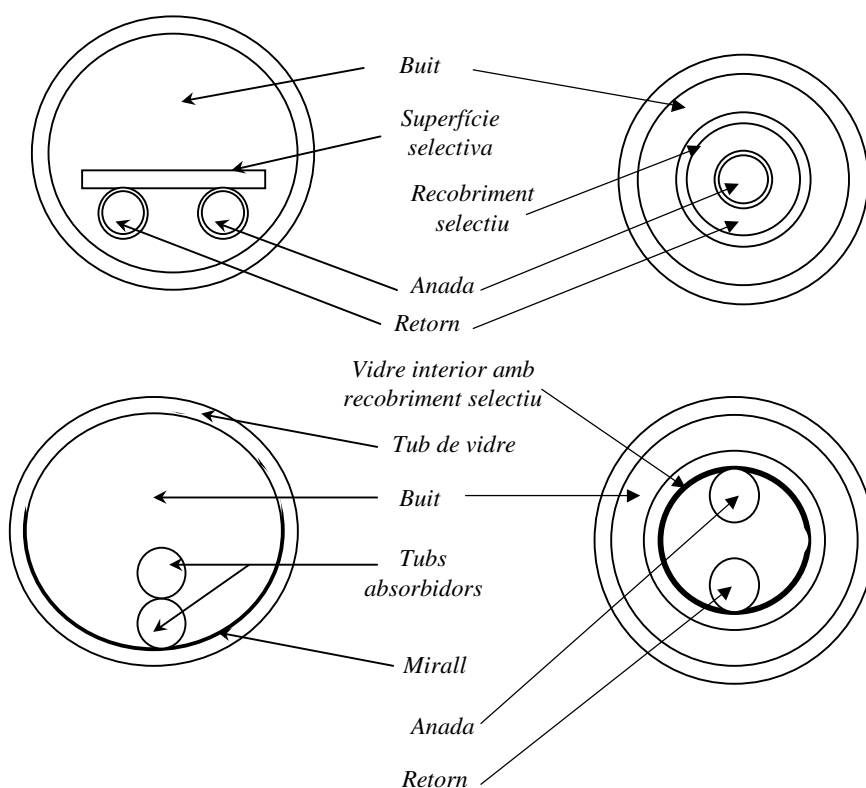


Fig. 3.6 Secció transversal d'alguns tubs de buit.

### 3.1.4. Captadors concentradors

Pel que fa a la segona família de captadors, els concentradors, i que nosaltres no estudiarem, els podem classificar en concentradors *lineals* o bé *puntuals*, i basen justament el seu mecanisme a concentrar l'energia solar mitjançant la utilització de miralls i vidres reflectants en un punt específic per on circula el fluid portador de calor. Per descomptat, aquests captadors poden fer arribar aquest fluid (que no acostuma a ser ja aigua sinó generalment oli tèrmic) fins a temperatures molt elevades per cobrir aplicacions en l'àmbit industrial, ja sigui donant energia tèrmica per a determinats processos o proporcionant vapor per fer funcionar una turbina i obtenir, així, electricitat. Una ullada més a fons

d'aquest tipus de captadors i la seva utilització la donarem al capítol corresponent a les centrals tèrmiques solars.

### 3.2 Mecanismes de transmissió de calor

L'estudi de l'aprofitament de l'energia solar en l'àmbit tèrmic domèstic passa per entendre el principi de funcionament del captador solar pla. El captador essencialment funciona pels *efectes selectius* de la coberta i de la superfície absorbidora, que permeten la transformació de l'energia radiant del Sol en energia calorífica apta per escalfar el nostre fluid de treball. Ara bé, per entendre aquesta transformació i aquest efecte selectiu de què parlem, ens cal entendre abans els mecanismes físics que ho regeixen.

Els mecanismes físics que regeixen la transmissió de calor són tres: la *conducció*, la *convecció* i la *radiació*. Tots ells esdevenen simultàniament a la natura i a vegades costa molt de separar-los. Per a tots ells, però, s'acompleix que:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = U \cdot \Delta T = \frac{\Delta T}{R} \quad (3.1)$$

On  $\dot{Q}$  és el flux d'energia per unitat de temps (Joules/s = W),  $A$  és la superfície de transmissió,  $U$  és un factor de proporcionalitat que anomenem *conductància tèrmica* i  $R$ , el seu invers, és la resistència tèrmica. És un valor que depèn del tipus de mecanisme de transmissió.

La *conducció* és deguda a la interacció mecànica entre les molècules veïnes en tots els estats de la matèria però és un tipus d'interacció que es presenta especialment en els *sòlids*. Els metalls, per sobre de tots, es veuen afavorits pel núvol d'electrons lliures que permet el pas fluid de l'ona tèrmica. L'equació 3.1, per al cas de la conducció, rep el nom de *lleï de Fourier*, i per a una direcció donada pren la forma

$$\frac{\dot{Q}_x}{A} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \approx -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.2)$$

On el coeficient  $\lambda$  s'anomena *conductivitat tèrmica* i és una característica física del medi en si. Si el medi és un sòlid,  $\lambda$  es considera aproximadament constant. Per a líquids i gasos,  $\lambda$  és funció de  $\sqrt{T}$  i no es pot predir perquè s'ha de mesurar experimentalment. Les seves unitats són

$$[\lambda] = \frac{\dot{Q}_x/A}{dT/dx} = \frac{W/m^2}{K/m} = \frac{W}{m \cdot K}$$

És a dir,  $\lambda = 1$  implica el sòlid que, sotmès a una diferència de temperatures d'1 K entre les seves cares, per cada metre de gruix deixa passar un flux tèrmic d'1 W.

L'equació 3.2 ve a dir que el flux de calor en una direcció determinada és proporcional al gradient de temperatures en aquella direcció (amb el signe canviat, ja que pel principi 0 de la termodinàmica, el flux va de positiu a negatiu en direcció oposada a l'increment del gradient de temperatures). L'equació 3.2 generalitzada per una direcció qualsevol queda com

$$\frac{\vec{Q}}{A} = -\lambda \cdot \left( \frac{dT}{dx} \vec{i} + \frac{dT}{dy} \vec{j} + \frac{dT}{dz} \vec{k} \right) = -\lambda \nabla T \quad (3.3)$$

La *convecció* és el tipus de transmissió de calor característic de les *interfícies* (superfícies comunes a sòlid i fluid) ja siguin sòlid-líquid o sòlid-gas. La interacció mecànica entre el cos i el fluid juntament amb la deformabilitat i densitat variable (en funció de la temperatura) d'aquest últim provoca que tot el fluid es posi en moviment i es deformi a causa de la temperatura i la transmissió de calor. La convecció es podria entendre com una conducció acompanyada d'un moviment. Si aquest moviment del fluid és natural, simplement afectat per la gravetat, parlem de *convecció natural*. Si, pel contrari, afegim un moviment artificial (agitació, ventilació, etc) parlem de *convecció forçada*. L'equació 3.1 per al cas de la convecció rep el nom de llei de Newton de la convecció i s'expressa com

$$\frac{\dot{Q}}{A} = h \cdot \Delta T = h \cdot (T_{\text{paret}} - T_{\text{fluid}}) \quad (3.4)$$

On  $h$  és el coeficient superficial de transferència de calor per convecció i, a diferència de  $\lambda$ , no és una propietat del fluid ni del sòlid: es calcula a partir de números adimensionals com el n° de Nusselt ( $Nu$ ), Reynolds ( $Re$ ), Prandtl ( $Pr$ ), i on es tenen en compte les propietats físiques del fluid així com la seva velocitat i la geometria dels sòlids en contacte amb ell.

Per últim, la *radiació* no és res més que l'emissió d'energia electromagnètica deguda a la pròpia temperatura del cos ( $T > 0$  K). Així, com la conducció i la convecció són interaccions mecàniques, la radiació és una interacció electromagnètica esdevinguda en medis transparents o semitransparents que permet l'intercanvi energètic en forma d'ones (o també *quantums* d'energia) entre els cossos a diferents temperatures. Sovint es pot considerar un fenomen restringit a la superfície de la matèria i no al seu volum sencer i no necessita cap tipus de suport massic per transmetre's. És el fenomen predominant a altes i baixes temperatures i ve regit per la llei de la radiació, la llei de Steffan-Boltzmann, de la forma:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \sigma \cdot \Delta T^4 = \sigma \cdot (T_{\text{cos 1}}^4 - T_{\text{cos 2}}^4) \quad (3.5)$$

On  $\sigma$  és la constant de Steffan-Boltzmann i que val  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)}$ .

Recordem com al capítol anterior (figura 2.1) vèiem quin era l'espectre de la radiació solar (de forma semblant als espectres d'emissió de tots els cossos) quan consideràvem el Sol com un cos negre emetent aproximadament a 6.000 K. El concepte de *cos negre* és una idealització que ens permet quantificar el fenomen de la radiació com ho fa l'equació 3.5. Un cos negre és un cos ideal capaç d'absorbir totes les ones incidents, en totes direccions i en totes les longituds d'ona: és un absorbidor perfecte. A la vegada, per la primera llei de la termodinàmica, cal que sigui un emissor perfecte, que emeti la màxima quantitat de radiació possible (perquè si no, s'aniria escalfant progressivament).

Ara bé, els cossos reals (també anomenats *opacs*) no són pas *negres*, és a dir, absorbeixen i emeten radiació a diferents nivells sempre per sota del nivell d'absorció i emissió del cos negre a aquella mateixa temperatura. La relació entre la radiació emesa pels cossos reals, els de la natura, i la del cos negre ens defineixen les propietats radiants dels primers.

a) Emitància o emissivitat

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{\text{Energia emesa pel cos real}}{\text{Energia emesa pel cos negre}} = \frac{E}{\sigma \cdot T^4}$$

Quocient que ens proporciona la llei de Steffan-Boltzmann modificada per cossos reals

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Pel cos negre  $\varepsilon_b = 1$  (on el subíndex b indica *blackbody*).

b) Absortància o absorptivitat

$$\alpha = \frac{Q \text{ absorbida}}{Q \text{ absorbida pel cos negre}} = \frac{Q \text{ absorbida}}{Q \text{ incident en el cos negre}} \quad \alpha_b = 1$$

c) Reflectància o reflectivitat

$$\rho = \frac{Q \text{ reflectida}}{Q \text{ incident en el cos negre}} \quad \rho_b = 0$$

d) Transmissivitat o transmissivitat

$$\tau = \frac{Q \text{ transmesa}}{Q \text{ incident en el cos negre}} \quad \tau_b = 0$$

Propietats que, relacionades de la manera següent, permeten obtenir la *lleï de Kirchoff* de la radiació

$$\frac{Q_{\text{absorbida}} + Q_{\text{reflectida}} + Q_{\text{transmesa}}}{Q_{\text{incident}}} = \frac{Q_{\text{incident}}}{Q_{\text{incident}}}$$

És a dir,

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

I si volem que el primer principi de la termodinàmica s'acompleixi caldrà que  $\varepsilon \cong \alpha$  amb el què tindrem finalment:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

### 3.3 Principi de funcionament d'un captador solar pla

Un *captador solar pla* és un tipus particular de bescanviador de calor que transfereix l'energia radiant del Sol a un fluid, augmentant-ne la temperatura i provocant una variació del seu estat energètic. Com dèiem, el captador funciona segons els *efectes selectius* de la coberta i de la superfície absorbidora afavorits pel fet que els espectres de la radiació solar i la radiació tèrmica són disjunts. Expliquem-ho.

La distribució espectral de l'energia per un cos real segueix aproximadament la distribució espectral del seu homòleg ideal, el cos negre. Ara bé, per a cada temperatura existeix un espectre específic que desplaça el seu pic energètic cap a longituds d'ona cada vegada més petites a mesura que augmenta la temperatura. Si ens fixem en la figura 3.7, veiem com un cos a 400 K emetrà energia amb el pic a 8  $\mu\text{m}$  (radiació tèrmica), mentre que un cos a 6.000 K (radiació solar) tindrà aquest pic als 0,5  $\mu\text{m}$  (rang del visible).

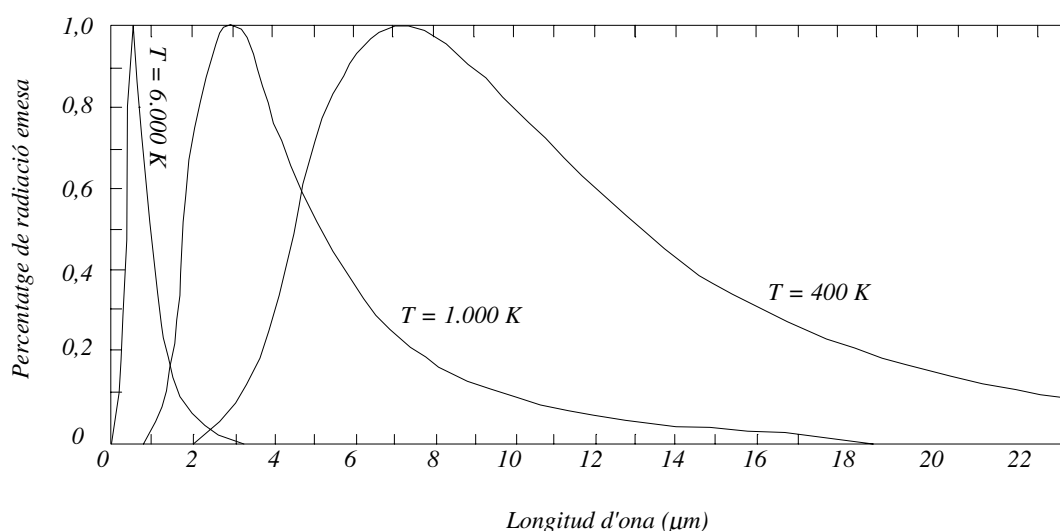


Fig. 3.7 Distribució espectral normalitzada de la radiació del cos negre a temperatures diferents.

A nivell percentual tindrem el següent:

Tipus de radiació	Temperatura d'emissió (K)	Rang ( $\mu\text{m}$ )	% d'energia en el rang considerat
Radiació solar	6.000	0,25 - 4,14	98%
Radiació tèrmica	300	5 - 80	98%

Aquest fet de tan poca consideració aparent és fonamental per entendre el funcionament dels captadors. Fixem-nos ara en la figura 3.8, la qual ens mostra el valor de la transmissió en funció de la longitud d'ona per un vidre de 6 mm de gruix amb diferents continguts d'òxids. El cas amb 0,5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  seria el d'un vidre normal de finestra. La seva transmissió té un pic a 0,3  $\mu\text{m}$  mentre que més enllà baixa en picat (i té tot seguit un comportament poc regular).



És a dir, per longituds d'ona petites, el vidre és transparent a la radiació i deixa passar les ones mentre que per longituds més enllà de  $0,5 - 0,6 \mu\text{m}$  n'és totalment opac. El cas amb  $0,02\%$  de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  seria el d'un vidre utilitzat en energia solar amb menys contingut en òxids per fer-lo més transparent i allargar aquest comportament d'alta transmissivitat fins a  $3 \mu\text{m}$  ( $\tau = 0,9 - 1$ ), mentre que més enllà baixa en picat. És a dir, per longituds d'ona entre  $0$  i  $3 \mu\text{m}$ , aquest tipus de vidre és transparent a la radiació i deixa passar les ones mentre que per longituds més enllà de  $3 \mu\text{m}$  és totalment opac a elles, no les transmet i les ha de reflectir.<sup>1</sup>

Situem-nos ara en un captador: la *coberta* de vidre (o en general qualsevol superfície transparent que actuï com a coberta) deixa passar la radiació solar (ja que el  $98\%$  de la seva energia cau entre  $0,25$  i  $4,14 \mu\text{m}$ ) perquè escalfi la superfície captadora del seu interior. Aquesta superfície captadora arriba a altes temperatures però que resten sempre per sota dels  $100 - 150^\circ\text{C}$ . La radiació emesa a aquesta temperatura és de naturalesa tèrmica i el vidre, en aquest cas, no pot deixar sortir aquesta radiació perquè la seva transmissivitat per a aquestes longituds d'ona és quasi nul·la. L'ambient entre coberta i superfície augmenta de temperatura i afavoreix la captació energètica i l'eficiència.

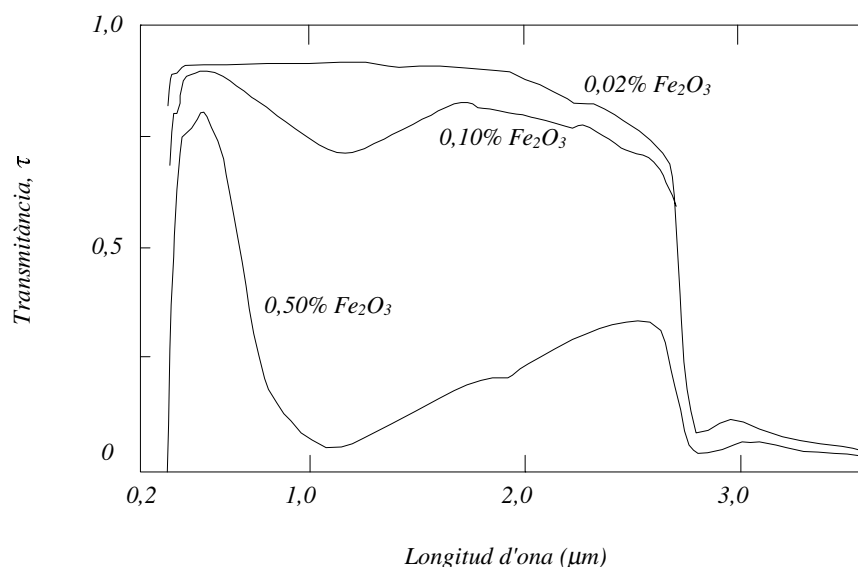


Fig. 3.8 Transmissivitat d'un vidre de  $6 \text{ mm}$  de gruix amb diferents continguts d'òxid.

En l'àmbit terrestre, el comportament del vidre és imitat per les mol·lècules de  $\text{CO}_2$  de l'atmosfera en el que es coneix per *efecte hivernacle*. Aquest component atmosfèric té les bandes d'absorció desplaçades majoritàriament al voltant de la banda tèrmica, fet que implica *transparència* per a l'energia del Sol i *opacitat* per a l'energia tèrmica evacuada des de la Terra. Resultat: un augment de temperatura global del planeta.

<sup>1</sup> Noteu com el nostre rang de visió va de  $0,4$  a  $0,7 \mu\text{m}$ ; per aquest motiu per als humans, el vidre és transparent perquè caiem en el seu rang d'alta transmissivitat.

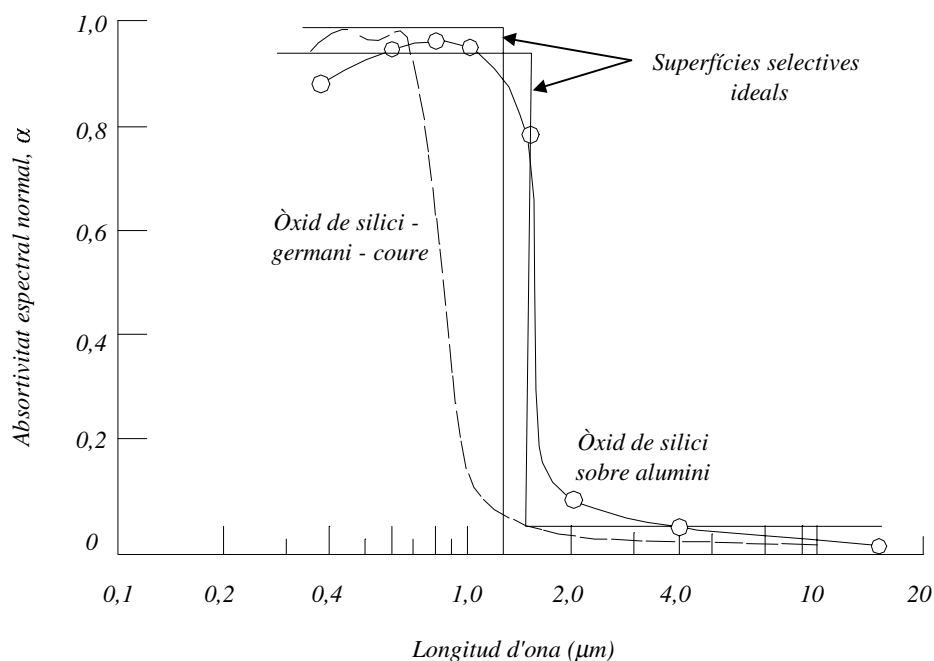


Fig. 3.9 Absortivitats d'algunes superfícies selectives.

Un últim element per tractar és la *superfície captadora* o placa absorbidora, que acaba de completar els efectes selectius del captador. En aquest cas, l'efecte que busquem és d'alguna manera invers: volem una alta absortivitat en l'espectre solar i molt baixa emissivitat en el rang d'ona llarga (rang del tèrmic). Això s'aconsegueix mitjançant *recobriments selectius* com ara negre de platí, negre de crom i alguns compostos atacats amb àcids, que tenen un comportament com el mostrat a la figura 3.9.

### 3.4 Equació fonamental d'un captador solar pla

En règim no transitori, permanent, el funcionament d'un captador solar ve descrit mitjançant un balanç energètic, que ens indica la part de l'energia incident que es transforma en energia útil, en pèrdues tèrmiques i en pèrdues òptiques. La figura 3.10 ens mostra els fluxos energètics en un captador pla: dels  $1.000 \text{ W/m}^2$  que ens poden arribar com a radiació incident, només n'aprofitem un 60%.

La radiació solar incident cal, doncs, que sigui absorbida i a la vegada retinguda. És a dir, d'una banda cal observar quines seran les pèrdues òptiques i, de l'altra, quines seran les pèrdues tèrmiques.

Les *pèrdues òptiques* tenen en compte la radiació solar que ja no és transmesa pel vidre (a causa de la reflexió i l'absorció per part del mateix vidre), i la que no és absorbida per la superfície captadora (a causa de la seva reflexió). És a dir

$$P_{\text{op}} = I_s \cdot A_c \cdot (1 - \tau \cdot \alpha) \quad (3.6)$$

On  $I_s$  és la radiació solar incident instantànea sobre la superfície de captació  $A_c$  del vidre,  $\tau$  és la transmissivitat del vidre i  $\alpha$  és l'absortivitat de la superfície captadora.

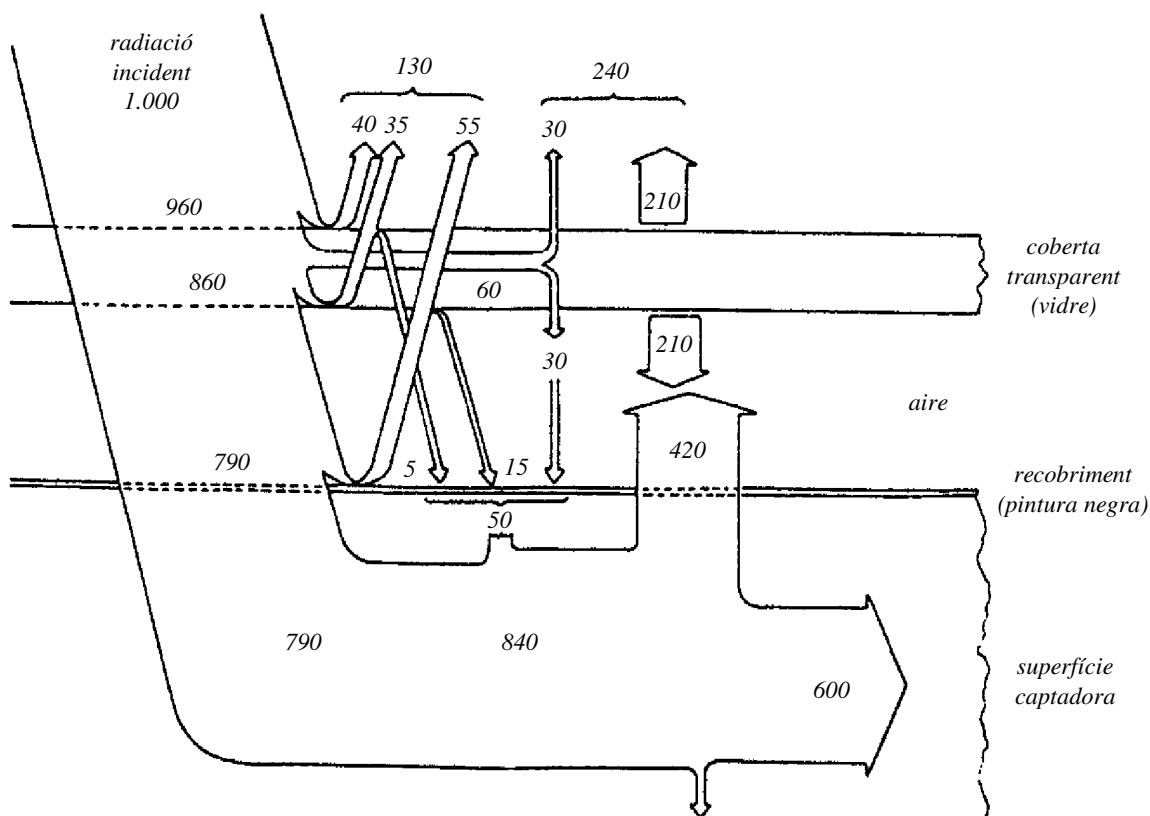


Fig. 3.10 Fluxs energètics en un captador pla.

Les *pèrdues tèrmiques* avaluen la quantitat d'energia que cedim al medi ambient deguda a pèrdues per convecció i radiació:

- a) Les pèrdues degudes a la *convecció* vindrien donades per la llei de Newton (equació 3.4) modificada sensiblement:

$$P_{\text{conv}} = U \cdot A_p \cdot (T_m - T_a) \quad (3.7)$$

On  $U$  és el coeficient global d'intercanvi per convecció,  $A_p$  l'àrea de placa (que coincideix amb  $A_c$  en el cas d'un captador pla però no en el cas d'un concentrador),  $T_a$  la temperatura ambient i  $T_m$  la temperatura mitjana de placa.

- b) Les pèrdues degudes a la *radiació* vindrien donades per la llei de Steffan-Boltzmann (equació 3.5):

$$P_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot A_p \cdot \sigma \cdot (T_m^4 - T_a^4) \quad (\text{Eq.3.8})$$

on  $\varepsilon$  seria l'emissivitat de la placa captadora.

La combinació de les equacions 3.7 i 3.8 ens porta, després d'un cert tractament matemàtic, a una equació final en funció de la diferència de temperatures i un *coeficient global de pèrdues*  $U_L$  que engloba tant les pèrdues per convecció com per radiació:

$$P_{\text{term}} = P_{\text{conv}} + P_{\text{rad}} = U_L \cdot A_p \cdot (T_m - T_a) \quad (3.9)$$

Així doncs, la calor utilitzable pel captador serà l'energia incident menys les pèrdues:

$$\begin{aligned} Q_{\text{util}} &= Q_{\text{incident}} - P_{\text{op}} - P_{\text{term}} = \\ &= I_s \cdot A_c \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot A_p \cdot (T_m - T_a) = \\ &= A_c \cdot \left[ I_s \cdot (\tau \cdot \alpha) - \frac{U_L}{C} \cdot (T_m - T_a) \right] \end{aligned} \quad (3.10)$$

On tot és conegut excepte  $C$ , la **raó de concentració**, relació entre l'àrea de captació i l'àrea de placa ( $= A_c / A_p$ ), que pel cas de captadors plans val sempre 1 però no així pel cas dels concentradors.

L'equació 3.10 té el petit inconvenient de venir donada en funció de la temperatura mitjana de placa  $T_m$ , variable normalment desconeguda i difícil de trobar. És per això que normalment s'intenta donar en funció d'una variable més manejable i fàcil de mesurar com és la temperatura d'entrada del fluid  $T_e$ . La modelització en funció d'aquesta última variable transforma l'equació anterior en:

$$Q_{\text{util}} = A_c \cdot F_R \cdot \left[ I_s \cdot (\tau \cdot \alpha) - \frac{U_L}{C} \cdot (T_e - T_a) \right] \quad (3.11)$$

On  $F_R$  és el factor de calor remoguda (de l'anglès *removed*), que ens avalua l'eficàcia de l'intercanvi energètic entre la placa i el fluid. El seu efecte és el de reduir l'obtenció d'energia útil calculada, respecte de la que resultaria si tot el captador estigués a la temperatura d'entrada del fluid. Aquesta reducció és deguda al fet que la temperatura del fluid es va incrementant a mesura que circula pel captador i, com a conseqüència, també ho fan les pèrdues.

Els productes  $F_R(\tau\alpha)$  i  $F_R U_L$ , que són dades que utilitzarem als temes que segueixen, s'obtenen fàcilment a partir de la recta de rendiment de captador o bé a partir de la modelització de les transferències energètiques existents en el captador. De la seva obtenció en parlem a l'apartat següent.

### 3.5 Recta de rendiment d'un captador solar pla

Els captadors es proven generalment seguint el procediment recomanat pel National Bureau of Standards americà i/o els procediments de l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) sota l'Standard 93 77. El procediment consisteix a fer funcionar el captador en un banc de proves (figura 3.11, per al cas d'un captador d'aigua) sota condicions estacionàries, és a dir, mantenint pràcticament constants la radiació solar, la velocitat del vent, la temperatura ambient i d'entrada del fluid al captador, durant un període de temps en què la temperatura de sortida del fluid i la calor útil extreta no variïn apreciablement.

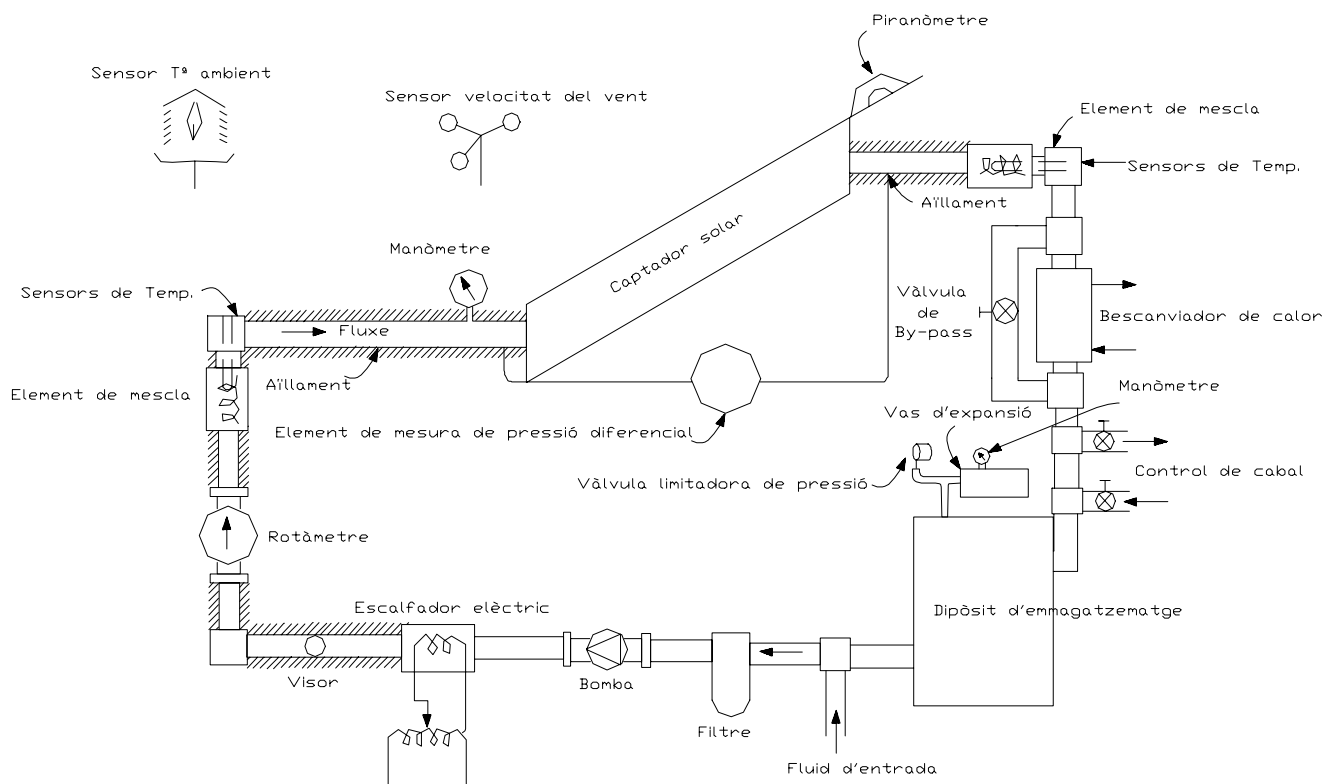


Fig. 3.11 Banc d'assaig per a l'obtenció de la recta de rendiment d'un captador per aigua.

L'eficàcia o rendiment instantani del captador pla ( $C = 1$ ) en aquests tipus d'assaigs és la raó entre l'energia útil expressada per l'equació 3.11 i la disponible, p.ex. el producte  $I_s \cdot A_c$

$$\eta = \frac{Q_{\text{util}}}{I_s \cdot A_c} = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s} \quad (3.12)$$

Per al banc d'assaig, aquest rendiment es trobarà a partir del salt entàlpic del fluid al seu pas pel captador mitjançant l'equació 3.13

$$\eta = \frac{Q_{\text{util}}}{I_s \cdot A_c} = \frac{\dot{m}_{\text{fluid}} \cdot c_p \cdot (T_e - T_s)}{I_s \cdot A_c} \quad (3.13)$$

On  $\dot{m}_{\text{fluid}}$  és el cabal màssic de fluid (aigua o aire) circulant pel captador,  $c_p$  n'és la capacitat calorífica i  $(T_e - T_s)$  és el salt tèrmic del fluid entre l'entrada i la sortida del captador.

Tornant a l'equació 3.12 i suposant constant  $U_L$ , l'eficàcia del captador es pot representar per una recta de variable independent  $(T_e - T_s)/I_s$ , pendent  $-F_R U_L$  i ordenada en l'origen  $F_R(\tau\alpha)$ . Aquests valors de  $-F_R U_L$  i  $F_R(\tau\alpha)$  són els que ens permetran calcular, al capítol 5, el rendiment mitjà d'una instal·lació solar durant un període de temps determinat.

La figura 3.12 mostra la corba d'eficiència instantània per un captador pla típic, amb el punt d'estancament o punt de rendiment nul, quan no hi ha circulació de fluid i s'arriba a la màxima temperatura (temperatura d'estancament).

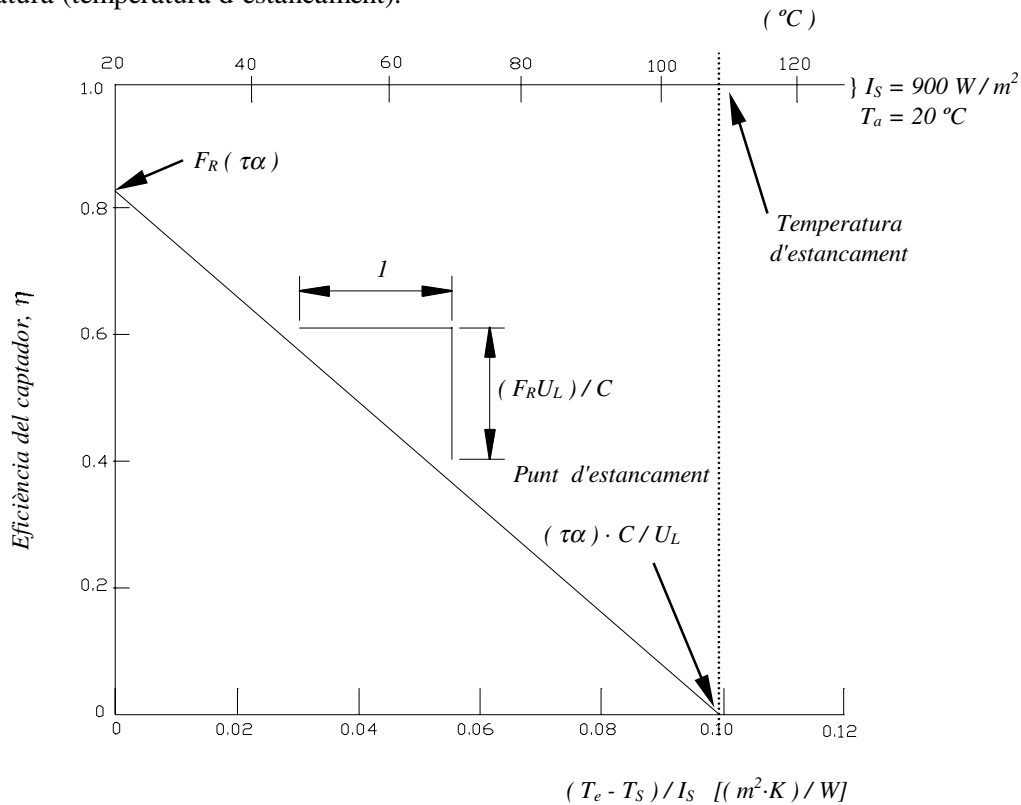


Fig. 3.12 Corba d'eficiència instantània per un captador pla típic.

La figura 3.13 ens mostra el comportament de diferents tipus de captadors. La recta de rendiment D correspondria a un captador d'una sola coberta i superfície no selectiva (coincident amb la de la figura 3.12). El captador sense coberta F (per a piscines) és útil només per als casos en què es volen assolir temperatures de fins a 28 °C. El comportament relativament pobre del captador d'aire E es deu principalment al baix valor de  $F_R$ . Una segona coberta i/o una superfície captadora selectiva (C i B) milloren clarament el rendiment. Més enllà dels 100 °C de temperatura, els captadors de tubs de buit (A) tenen el millor comportament.

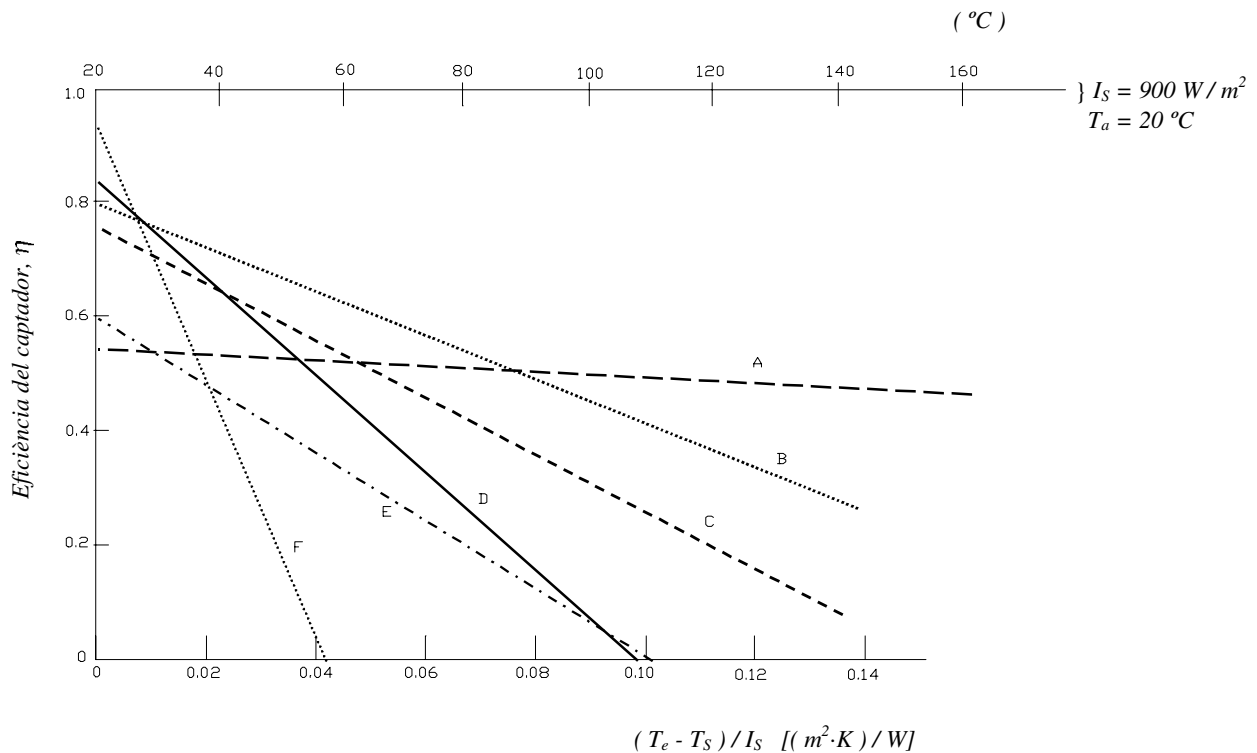


Fig. 3.13 Corbes d'eficiència instantània per diferents tipus de captador pla.

### Exemple 3.1

Escriviu l'expressió de l'eficiència instantània pel captador de la figura 3.12 i determineu la quantitat d'energia que en podem extreure si  $I_s = 850 \text{ W/m}^2$ ,  $T_a = 25 \text{ °C}$  i  $T_e = 75 \text{ °C}$ .

De la figura 3.12 tenim que  $F_R(\tau\alpha) = 0,83$ . De la intersecció amb l'eix OX i considerant la raó de concentració  $C = 1$ , perquè en un captador pla l'àrea de captació  $A_c$  i la de placa  $A_p$  valen el mateix, tindrem:

$$\frac{(\tau \cdot \alpha) \cdot C}{U_L} = \frac{(\tau \cdot \alpha)}{U_L} = 0,098 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2}{\text{W}}$$

Així doncs,

$$\frac{F_R(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)/U_L} = F_R U_L = \frac{0,83}{0,098} = 8,47 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2}$$

i de l'equació 3.12 tindrem finalment

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s} = 0,83 - 8,47 \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s}$$

Substituint els valors de l'enunciat tindrem

$$\eta = 0,32 \text{ i } Q_{\text{util}} = \eta \cdot I_s = 0,32 \cdot 850 = 282 \text{ W/m}^2$$

A vegades, la recta de rendiment del captador es representa en funció de la diferència entre la temperatura mitjana de placa  $T_m$ , o la temperatura de sortida del fluid  $T_s$ , i la temperatura ambient. Són representacions molt similars a la de l'eficàcia del captador en funció de la temperatura d'entrada del fluid  $T_e$ , però donen una interpretació diferent al pendent i a l'ordenada en l'origen. Si coneixem el cabal de fluid circulant pel captador, podem determinar els valors de  $-F_R U_L$  i  $F_R(\tau\alpha)$  corregits per un factor  $K$  definit com:

$$K \left\{ \begin{array}{l} = \frac{G_{\text{fluid}} \cdot c_p}{G_{\text{fluid}} \cdot c_p - \left( \frac{\text{pendent}}{2} \right)} \quad \text{quan} \quad \eta = f\left(\frac{T_m - T_a}{I_s}\right) \quad (3.14.a) \\ = \frac{G_{\text{fluid}} \cdot c_p}{G_{\text{fluid}} \cdot c_p - (\text{pendent})} \quad \text{quan} \quad \eta = f\left(\frac{T_s - T_a}{I_s}\right) \quad (3.14.b) \end{array} \right.$$

On  $G_{\text{fluid}}$  és el cabal màssic de fluid que circula pel captador per unitat de superfície captadora ( $\text{kg/s} \cdot \text{m}^2$ ). Així, els valors corregits de  $F_R U_L$  i  $F_R(\tau\alpha)$  s'obtindran aplicant el factor  $K$  com:

$$(F_R \cdot U_L)_{\text{corregit}} = -K \cdot (F_R \cdot U_L)_{\text{original}}$$

$$[F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)]_{\text{corregit}} = K \cdot [F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)]_{\text{original}}$$



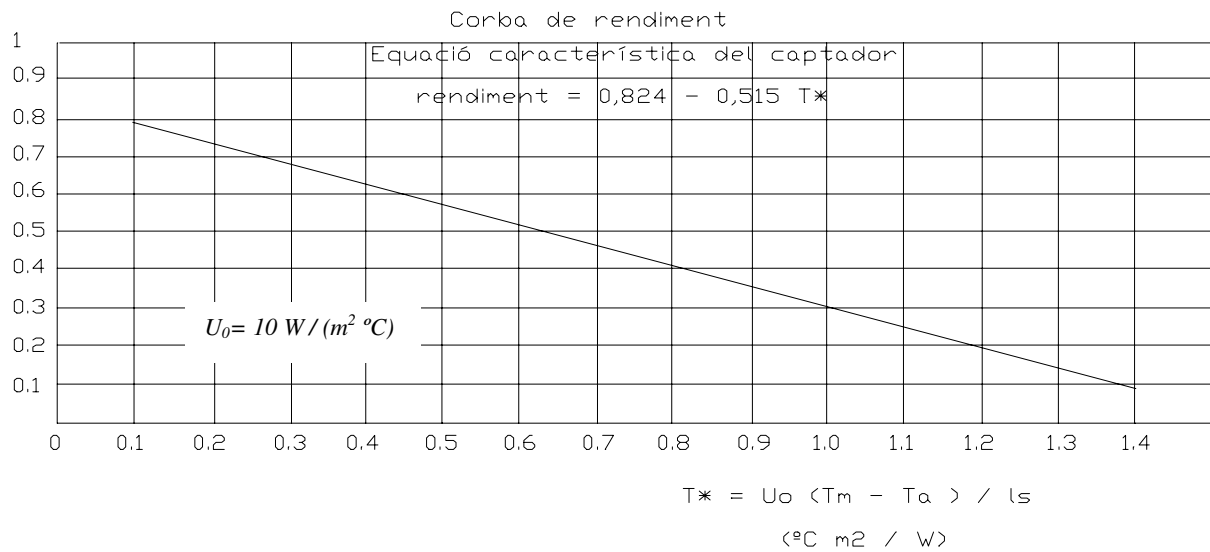


Fig. 3.14 Recta de rendiment d'un captador comercial (companyia Roca).

### Exemple 3.2

La figura 3.14 mostra la recta de rendiment del captador solar fabricat per la casa Roca. Com podem veure, la variable independent està en funció de la temperatura mitjana de placa i no pas en funció de la d'entrada del fluid. Suposant que el cabal de fluid circulant (aigua + anticongelant) sigui de  $0,015 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$  ( $c_p = 3.350 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ), trobeu els valors de  $F_R U_L$  i  $F_R(\tau\alpha)$  corregits pel canvi de variable.

En aquest cas, amb  $U_o = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$  tenim una equació de rendiment com la següent:

$$\begin{aligned} \eta &= F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \cdot \frac{(T_m - T_a)}{I_s} = 0,824 - 0,515 \cdot T^* = \\ &= 0,824 - 0,515 \cdot U_0 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{I_s} = 0,824 - 5,15 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{I_s} \end{aligned}$$

Per obtenir l'equació en funció de  $\frac{(T_e - T_a)}{I_s}$  utilitzem l'equació 3.14.a per obtenir el factor de correcció K:

$$K = \frac{G_{\text{fluid}} \cdot c_p}{G_{\text{fluid}} \cdot c_p - \left( \frac{\text{pendent}}{2} \right)} = \frac{0,015 \cdot 3.350}{0,015 \cdot 3.350 - \left( \frac{-5,15}{2} \right)} = 0,951$$

i obtenir els valors corregits de  $F_R U_L$  i  $F_R(\tau\alpha)$

$$F_R U_L = -K \cdot (\text{pendent}) = -0,951 \cdot (-5,15) = 4,9 \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$$

$$F_R(\tau\alpha) = K \cdot (\text{ordenada en l'origen}) = 0,951 \cdot 0,824 = 0,784$$

De l'equació 3.12 tindrem finalment la recta de rendiment que necessitem:

$$\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s} = 0,784 - 4,9 \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s}$$



## 4 Instal·lacions i constituents

Les instal·lacions domèstiques d'aprofitament de l'energia solar no només disposen d'un seguit de captadors i bescanviadors sinó que necessiten tot un conjunt específic de constituents que permetin el funcionament autònom de les instal·lacions i la seva correcta regulació en funció de les necessitats energètiques de l'habitatge o construcció per la qual s'hagi dissenyat.

Tres són les aplicacions bàsiques en energia solar tèrmica: *aigua calenta sanitària* (ACS), *escalfament de piscines* i *calefacció* (ja sigui per aigua calenta, calefacció tradicional o sòl radiant, o bé directament per aire). En tots els casos cal entendre que, per economia, senzillesa de la instal·lació i poca perillositat, els fluids portadors de calors més utilitzats seran l'aigua i l'aire.

### 4.1 Aigua calenta sanitària

En tota instal·lació per a la producció d'aigua calenta sanitària (ACS) cal disposar, a part dels captadors, dels elements següents (veure figura 4.2):

- Dipòsit acumulador
- Canonades
- Bombes
- Vàlvules
- Dipòsit d'expansió
- Purgadors
- Termòstats

A l'hora de dissenyar una instal·lació solar per ACS se'ns poden presentar tot un seguit d'alternatives, segons el tipus de circulació que imposem del fluid portador de calor. Distingim dos tipus de circulació bàsics: per *termossifò* o bé *forçada*.

La *circulació per termossifò* (figura 4.1.a) se'ns pot presentar tant en un circuit obert com en un de tancat, on l'única diferència és que en el primer l'aigua procedent dels captadors es mescla a l'acumulador amb la provinent de xarxa i en el segon no hi ha mescla.

En els circuits amb *termossifò* no existeix cap element mecànic que faci circular l'aigua pels captadors; el moviment es produeix per la diferència de temperatures entre l'aigua freda de l'acumulador i la calenta dels captadors, ja que l'aigua, en escalfar-se, disminueix la seva densitat, que fa que amb el pes més elevat de l'aigua freda de l'acumulador es provoqui una circulació natural. Aquesta circulació es mantindrà mentre hi hagi una diferència de temperatures suficient entre l'aigua del dipòsit i la del captador (normalment uns 10 °C).

Quan aquesta diferència de temperatures no existeix, la circulació s'atura fins que es torna a crear una diferència suficient.

Per al bon funcionament d'aquesta instal·lació hem de tenir en compte els aspectes següents: l'acumulador ha d'estar entre 30 i 70 cm per sobre dels captadors; les canonades han de ser al més curtes possible i no han de ser d'un diàmetre inferior a ½ polzada.

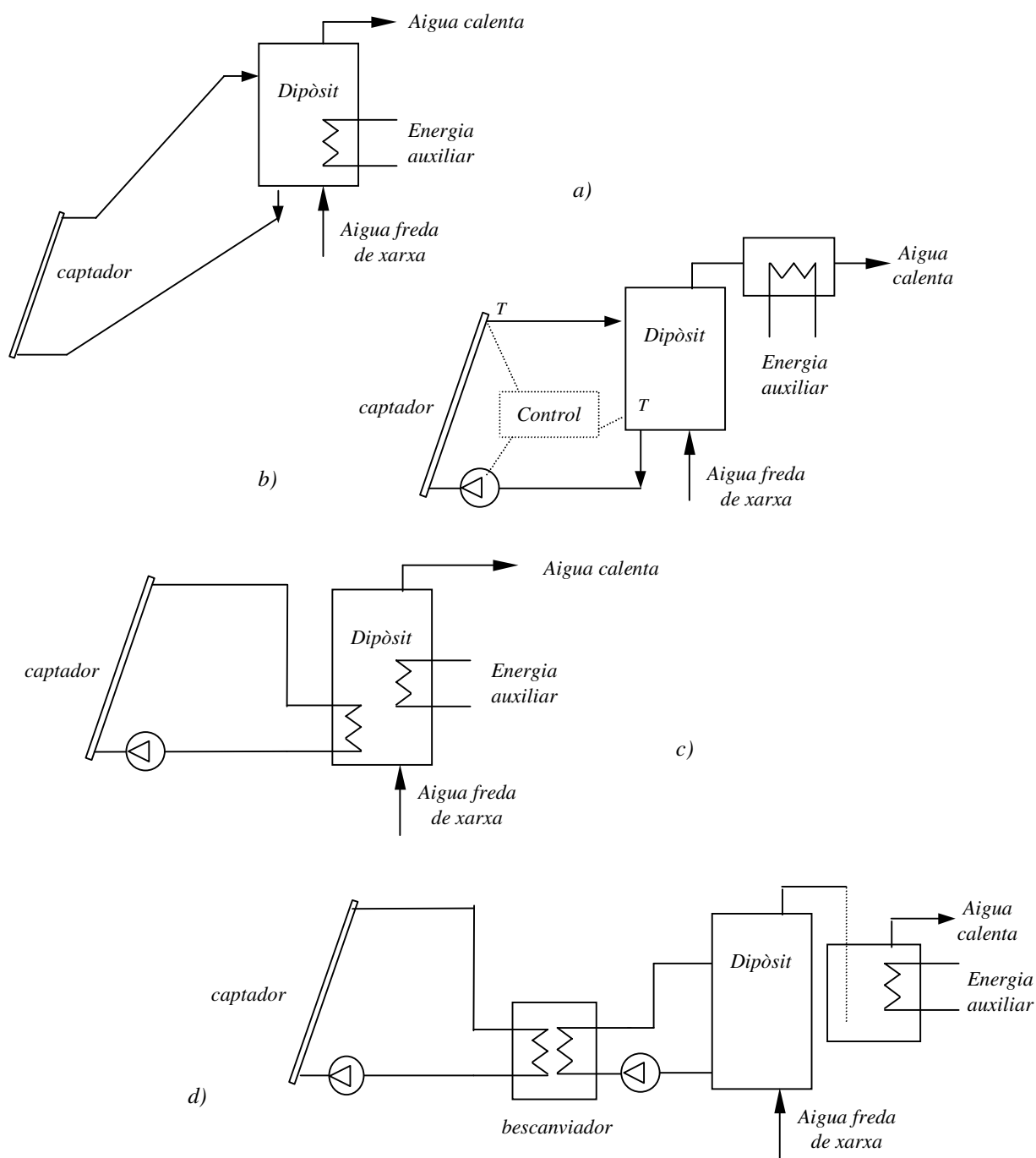


Fig. 4.1 Configuracions més comunes dels sistemes per líquid: a) Sistema de circulació natural; b) Circulació forçada de dipòsit únic; c) Sistema amb circuit primari tancat; d) Sistema amb circuit primari tancat i bescanviador exterior.

Les instal·lacions amb *circulació forçada* (figures 4.1.b, c i d) es diferencien de les altres en què tenen un circulador o bomba que fa circular el fluid per la instal·lació. En aquest cas ja no és necessària la col·locació de l'acumulador per sobre dels captadors i cal anar amb compte de no fer circular l'aigua calenta a la nit, ja que perdriem tota l'energia guanyada durant el dia.

Així mateix, els circuits poden ser oberts o tancats. En un *circuit obert* el fluid escalfat en els captadors és el mateix que el que després utilitza l'usuari (figures 4.1.a i b). Són els sistemes amb més rendiment, els més senzills i econòmics, però presenten alguns problemes greus: el fet que l'aigua de consum circuli pels captadors duu problemes de corrosió i d'incrustacions calcàries en els tubs, que no podem eliminar del circuit de consum i a l'hivern, si les temperatures baixen per sota de 0 °C, l'aigua que hi ha tant en els captadors com en les canonades de connexió es pot congelar, per tant, les instal·lacions amb circuit obert només poden funcionar en climes càlids o només en l'època d'estiu.

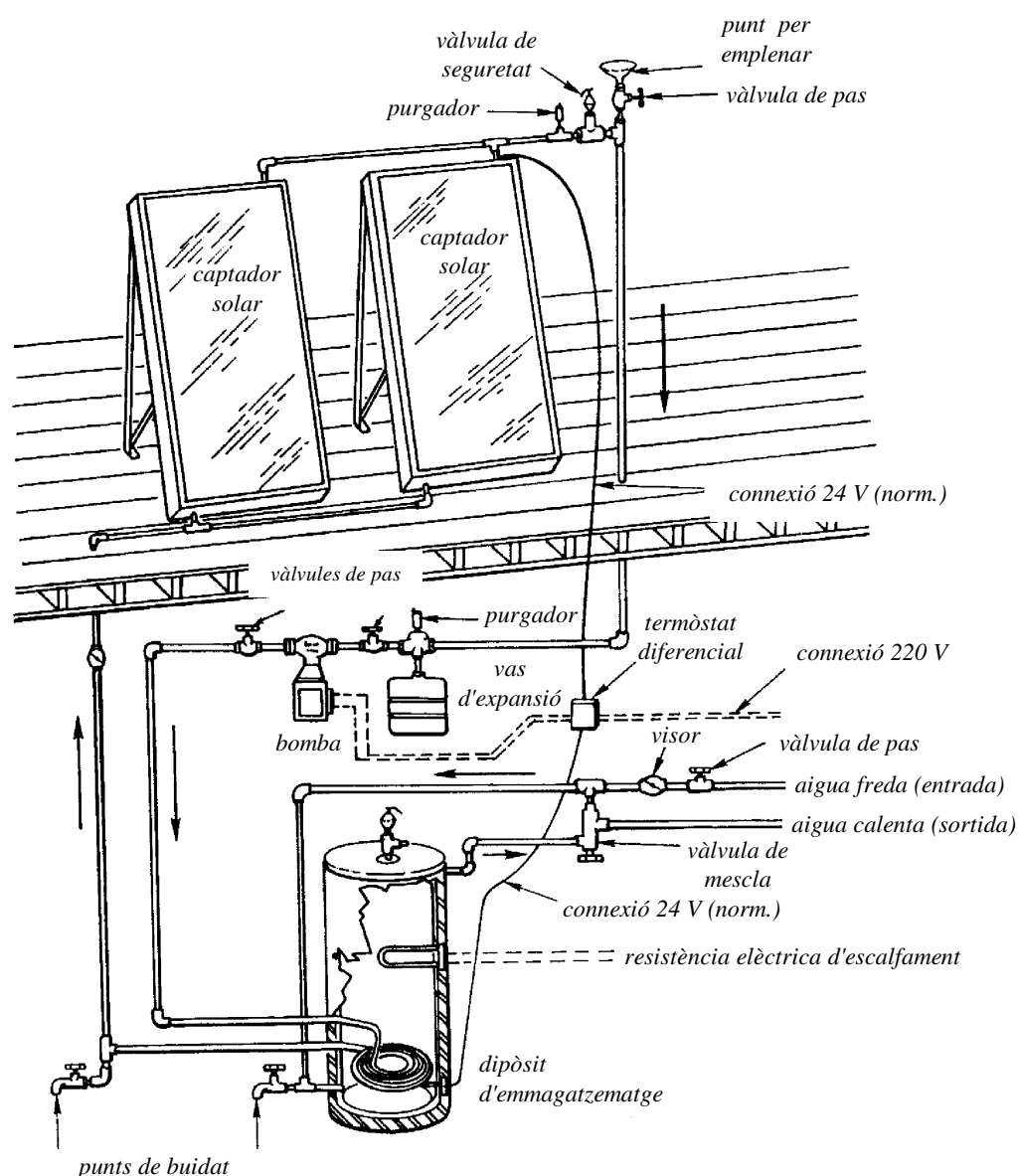


Fig. 4.2 Sistema d'escalfament solar d'ACS, que mostra el sistema de control.

El control acurat del funcionament de qualsevol sistema solar és essencial perquè la seva eficiència sigui màxima. En aquest sentit, cal comentar l'existència del regulador diferencial que observem a la figura 4.1.b. Aquest sistema de control permet, d'una banda, computar i emmagatzemar la informació tècnica del sistema d'energia solar, i de l'altra, realitzar el control diferencial de la temperatura dels captadors solars i la temperatura dels dipòsits que ens comanda, a la vegada, el règim de funcionament del circulador del primari (bomba de circulació). En el moment que la temperatura del líquid en els captadors arriba a tenir una temperatura més elevada (entre 5 i 7 °C) que la del líquid en el dipòsit d'acumulació, s'activa la sortida de potència que ens mou la bomba. Quan aquest diferencial de temperatura (programable) disminueix suficientment, la bomba es para. I així successivament en funció de la despesa i de la radiació incident.

Per la seva banda, i com ja havíem comentat en capítols anteriors, en el cas del *circuit tancat* (figures 4.1.c i d) hi ha dos circuits, un de primari, per on hi circula el fluid calent dels captadors i que després cedeix la calor a l'acumulador a través d'un bescanviador, i un de secundari, format per l'aigua de consum que s'escalfa a l'acumulador.

El fet d'introduir un element més en la instal·lació, com és el bescanviador, influeix tant en el cost com en el rendiment d'aquesta instal·lació (vegeu l'apartat 4.1.1). Però aquesta separació de circuits és molt beneficiosa, ja que pel primari podem fer circular aigua amb anticongelant, que ens protegeix de les baixes temperatures.

#### 4.1.1 Factor captador-bescanviador

A mesura que la instal·lació creix, també ho fa l'acumulador (vegeu l'apartat 4.1.2 Altres elements) i l'intercanvi de calor mitjançant els bescanviadors de tipus serpentin o camisa comença a perdre eficàcia. En aquests casos es disposa d'un bescanviador de calor independent (normalment *de plaques*) que ens connecta els circuits primari, on tindrem la solució aigua + anticongelant, i secundari o d'ús.

Un bescanviador de calor només és un dispositiu que permet aportar un canvi en l'estat d'un fluid que hi circuli a través. Normalment és un canvi de temperatura però ens podem trobar amb bescanviadors que també ens proporcionin canvis de fase. Una de les característiques dels bescanviadors és la seva *eficiència*, normalment simbolitzada per la lletra  $\varepsilon$ , i que ens en mesura les pèrdues de calor: és la relació entre l'energia absorbida del primari per part del bescanviador i l'energia cedida pel mateix al secundari (valor que sempre es mourà entre 0 i 1). Òbviament, en aquest traspàs energètic tindrem sempre certes pèrdues que podrem avaluar.

Malgrat que aquest bescanviador de calor no és una part del captador, és convenient definir un altre factor d'eficàcia  $F'_R$  (com ara el  $K$  utilitzat pel canvi de la variable independent de la recta de rendiment del captador, estudiat al tema anterior), que substitueixi a  $F_R$  perquè té en compte el rendiment combinat del captador i el bescanviador. La relació  $F'_R / F_R$ , denominada *factor captador-bescanviador*, és un índex que varia entre 0 i 1 i indica la disminució de l'energia útil obtinguda deguda a la utilització del bescanviador:

$$\frac{F'_R}{F_R} = \frac{1}{1 + \left( \frac{A_C \cdot F_R \cdot U_L}{(\dot{m} \cdot c_p)_C} \right) \cdot \left[ \left( \frac{(\dot{m} \cdot c_p)_C}{\varepsilon \cdot (\dot{m} \cdot c_p)_{\min}} \right) - 1 \right]} \quad (4.1)$$

On  $(\dot{m} \cdot c_p)_C$  és el producte del cabal màssic i la capacitat calorífica del fluid circulant per la banda dels captadors (circuit primari, aigua + anticongelant),  $(\dot{m} \cdot c_p)_{\min}$  és el producte del cabal màssic per la capacitat calorífica que resulti mínim dels fluids circulant pel primari i el secundari (vegeu l'exemple 4.1) i  $\varepsilon$  és l'eficiència del bescanviador (o rendiment del bescanviador) explicat anteriorment.

El factor  $F'_R / F_R$  és un indicador de l'augment de temperatura que necessitem en el fluid del primari per cobrir les pèrdues energètiques que ens imposa el bescanviador per la seva eficiència. Una altra manera de veure-ho seria considerar  $F'_R / F_R$  com la fracció d'augment en l'àrea de captador necessària per proporcionar la mateixa quantitat d'energia que es necessitaria si el bescanviador tingués una eficiència  $\varepsilon = 1$ .

#### Exemple 4.1

A la instal·lació de l'exemple 3.2 hem decidit separar el circuit dels captadors del circuit de consum amb un bescanviador l'eficiència del qual val  $\varepsilon = 0,7$ . Determineu el factor captador-bescanviador en el cas que es mantinguin totes les variables de l'exemple 3.2.

De l'exemple 3.2 tenim

$$F_R \cdot U_L = 4,9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Pel circuit primari, pels captadors, hi circularà una solució d'aigua més anticongelant de característiques:  $\dot{m} = 0,015 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$ ,  $c_p = 3.350 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  i

$$(\dot{m} \cdot c_p) = 0,015 \cdot 3.350 = 50,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Pel circuit secundari, el d'ús, s'hi acostuma a fer circular el mateix cabal d'aigua que pel primari,  $\dot{m} = 0,015 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$ . Però el fluid ja no és aigua més anticongelant sinó només aigua, cosa que implica un canvi en la capacitat calorífica del fluid:  $c_p = 4.180 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ . El producte del cabal per la capacitat calorífica del fluid circulant pel circuit secundari valdrà ara

$$(\dot{m} \cdot c_p) = 0,015 \cdot 4.180 = 62,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Per tant, el producte mínim del cabal per la capacitat calorífica respectiva serà el corresponent al circuit primari:

$$(\dot{m} \cdot c_p) = (\dot{m} \cdot c_p)_{\min} = 0,015 \cdot 3.350 = 50,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Imposant  $A_C = 1 \text{ m}^2$  per tenir-ho tot en les mateixes unitats, l'equació 4.1 quedarà finalment com



$$\begin{aligned}\frac{F'_R}{F_R} &= \frac{1}{1 + \left( \frac{A_C \cdot F_R \cdot U_L}{(\dot{m} \cdot c_p)_C} \right) \cdot \left[ \left( \frac{(\dot{m} \cdot c_p)_C}{\varepsilon \cdot (\dot{m} \cdot c_p)_{\min}} \right) - 1 \right]} \\ &= \frac{1}{1 + \left( \frac{4,9}{50,25} \right) \cdot \left[ \left( \frac{50,25}{0,7 \cdot 50,25} \right) - 1 \right]} = 0,96\end{aligned}$$

Aquest factor implica que, per a un sistema amb dos circuits i un bescanviador, caldria un 4% més de superfície captadora per obtenir la mateixa energia que un sistema amb un únic circuit i sense bescanviador.

#### 4.1.2 Altres elements

##### a) Conduccions

Com passa amb algun altre component de les instal·lacions solars d'aigua calenta, les conduccions utilitzades no suposen cap novetat si les comparem amb les emprades en altres aplicacions com la calefacció. Així, els materials més utilitzats són el ferro galvanitzat, el coure i els materials plàstics.

El *coure* és el material més aconsellable per la seva elevada resistència a la corrosió, maleabilitat i ductilitat, i a més resisteix la corrosió, tant dels líquids que hi circulen per l'interior com dels agents exteriors, aire, humitat o elements constructius que hi entrin en contacte. En contacte amb l'aigua, aviat queda cobert per una fina capa d'òxid, de color verdós, que el protegeix. El coure és relativament fàcil de treballar ja que es pot tallar, corbar i soldar. La seva baixa rugositat permet que a igual diàmetre la pèrdua de càrrega sigui més baixa que per a altres materials. Pot resistir sense rebentar una o més gelades.

L'*acer galvanitzat* és un material molt utilitzat en instal·lacions convencionals per al transport d'aigua calenta. No ha d'usar-se en els circuits primaris, per l'elevat deteriorament que la protecció de zinc pateix amb temperatures superiors a 65 °C. És una mica més econòmic que el coure si bé és més difícil de treballar. Produeix més pèrdues de càrrega i menys resistència, cosa que obliga a col·locar tubs amb un gruix considerable i, per tant, un pes superior.

Per últim, les *canonades de plàstic* tenen qualitats semblants a les del coure i la seva utilització s'està generalitzant cada vegada més. El problema de l'elecció de la canonada rau en la gran diversitat de materials existents. En general es poden usar sense problemes les canonades de polietilè reticulat així com les de propilè, sempre que el fabricant garantitzi el seu ús per a temperatures de fins a 120 °C. Són fàcils de treballar i en petits diàmetres tenen un cost similar al del coure.

##### b) Acumulador

L'altre element bàsic de tota instal·lació és l'*acumulador de calor* (figura 4.3), que consisteix en un dipòsit de dimensions considerables on es va acumulant la calor cedida per l'aigua escalfada pel captador. Ha de complir dues condicions, d'una banda ha de resistir la corrosió produïda per l'aigua i, de l'altra, ha d'estar convenientment aïllat per no perdre la calor de l'aigua provinent dels captadors.

Per a instal·lacions en habitatges unifamiliars s'han estandarditzat les capacitats de 150 i 300 litres, (per a 2 i 4 m<sup>2</sup> de superfície captadora), encara que se'n fabriquen des de 60 fins a 12.000 litres en una àmplia gamma de capacitats.

A l'hora de seleccionar el material de què estarà fabricat el nostre acumulador, hem de tenir en compte els efectes que la corrosió hi pot tenir. Per evitar-la, procurarem no utilitzar diferents metalls en la instal·lació (per exemple, el coure provoca una corrosió més accelerada en l'acer galvanitzat). Això que acabem de dir no és sempre possible, i per tant, per evitar la corrosió podem utilitzar mètodes electrolítics o, si s'utilitzen aigües molt agressives, sistemes de protecció catòdica.

Actualment, es fabriquen acumuladors amb o sense bescanviador de calor. Aquest bescanviador està format per un serpentí o bé per una doble paret, o cambra, que envolta al dipòsit acumulador (sistema de camisa). En acumuladors de 150 l, la superfície del bescanviador acostuma a ser d'1,2 m<sup>2</sup> i en els de capacitat de 300 l la superfície és de 2,4 m<sup>2</sup>.

Els acumuladors s'aïllen freqüentment amb escuma de poliuretà i a vegades amb fibra de vidre. L'espessor d'aquest aïllant pot anar des dels 30 mm fins als 50 mm.

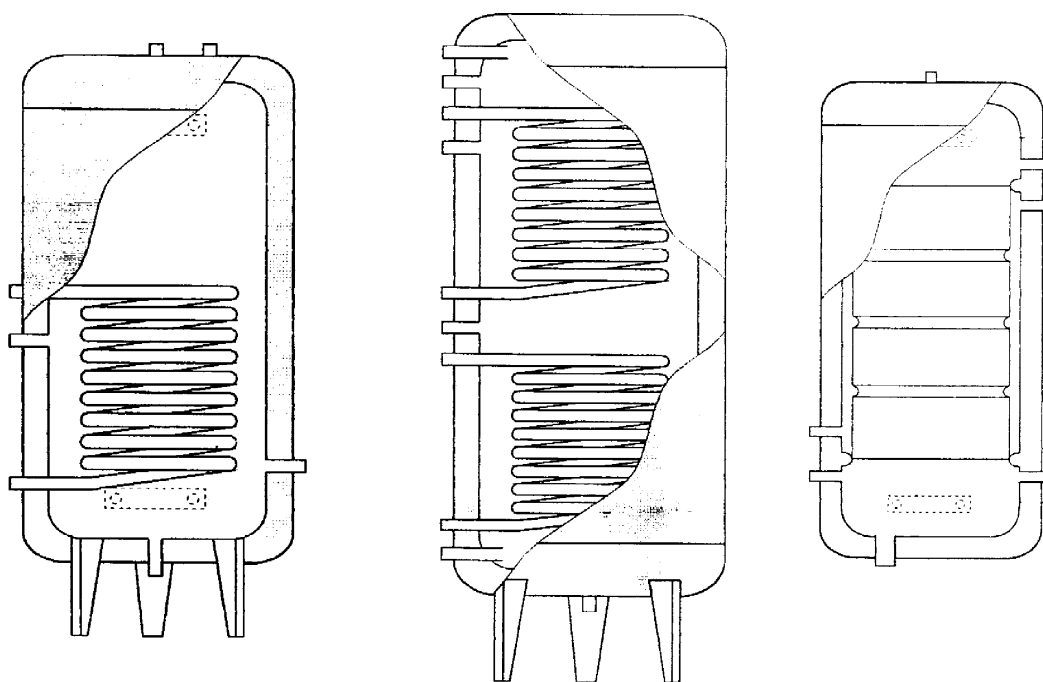


Fig. 4.3 Acumuladors amb serpentí, doble serpentí i de doble cambra (LKN).

Per poder disposar d'aigua calenta quan no hi ha prou aportacions solars, els acumuladors incorporen resistències elèctriques per escalfar l'aigua. Per a acumuladors de 150 litres s'utilitzen resistències de 2.200 W i per als acumuladors de 300 litres, resistències de 2.500 W de potència. Els acumuladors disposen de termòmetres i vàlvules de seguretat per limitar la pressió a què puguin arribar a treballar. Les pressions màximes a què es pot arribar a treballar són: el circuit primari a unes 3 atm, i el secundari, a unes 8 atm.

### c) Bombes de circulació

L'element que ens permet fer circular el fluid és el circulador o la bomba de l'aigua, i se selecciona en funció de les pèrdues de càrrega de la instal·lació i el cabal circulant. S'aconsella triar un cabal per al primari de 75 l/h per cada  $\text{m}^2$  de captador, estant aquests connectats en paral·lel, que pot reduir-se fins a 50 l/h a canvi de patir algun augment en la temperatura. Per al secundari es recomana un 20% més.

La forma pràctica de seleccionar la bomba serà anar a les corbes característiques cabal-pressió que ens dóna el fabricant. Es fabriquen bombes des de 50 fins a 2.800 W, que poden treballar amb aigua fins a una temperatura de 120 °C i que puguin assegurar cabals de fins a 60  $\text{m}^3/\text{h}$ .

### d) Vas d'expansió

En les instal·lacions d'energia solar tèrmica, per permetre la dilatació de l'aigua en el circuit del primari s'ha de col·locar un vas d'expansió d'una capacitat suficient. El vas d'expansió pot ser un dipòsit obert col·locat a la màxima alçada del circuit, encara que s'usa més freqüentment un dipòsit tancat, format per dues parts separades per una membrana elàstica. En una d'aquestes parts es tanca gas a pressió i en l'altra queda un espai lliure que serà el que ocuparà l'aigua. La capacitat del vas d'expansió està en funció de la capacitat total del circuit, de la temperatura de l'aigua i de la pressió a què es treballa.

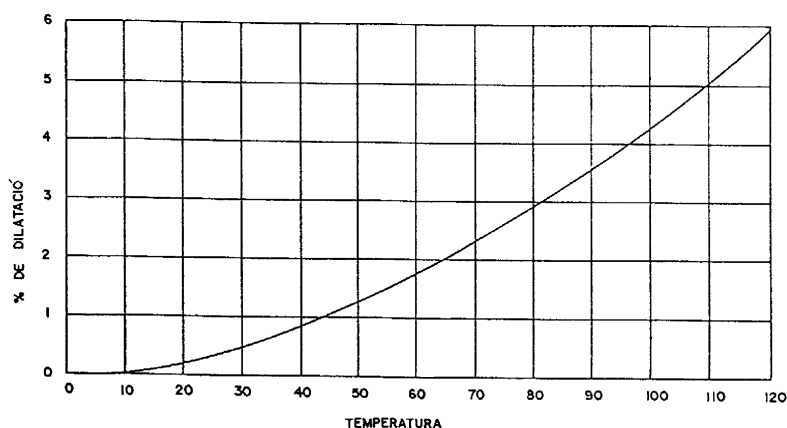


Fig. 4.4 Corba de dilatació de l'aigua per diferents temperatures.

Les instal·lacions d'energia solar tèrmica tendeixen a fer-se en circuit tancat, utilitzant per tant dipòsits d'expansió tancats, que presenten certs avantatges respecte als oberts. Poden ubicar-se a qualsevol lloc de la instal·lació, no absorbeixen oxigen de l'aire, per tant, no augmenten la corrosió i eliminen les pèrdues de líquid portador de calor per evaporació.

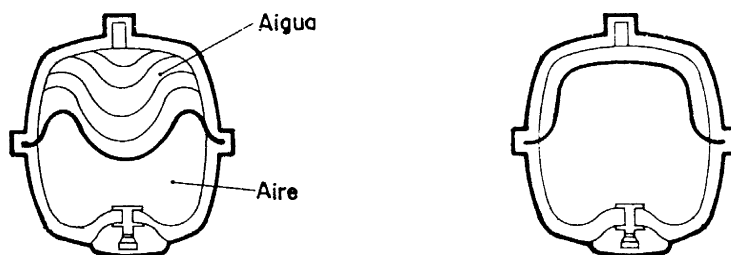


Fig. 4.5 Secció d'un vas d'expansió tancat.

## 4.2 Calefacció

La calefacció de locals amb energia solar ha de permetre una reducció de la despesa energètica de calefacció convencional considerable. El principal problema és, però, l'acumulació de l'energia per poder-ne disposar en el moment en què sigui necessària (justament quan el Sol ja no hi és).

En aquest sentit, la casa pot funcionar com a captador i acumulador de forma passiva (amb una construcció bioclimàtica i elements constructius adequats) o bé activa (amb la utilització de captadors solars i elements d'acumulació), i ens ha de permetre una regulació i control del flux energètic de forma correcta.

La calefacció acostuma a disposar de l'aire per transportar la calor. Però ens podem trobar amb el cas que sigui el mateix aire el que passi pels captadors solars o bé que aquest aire passi per un bescanviador i que sigui l'aigua el fluid que hagi passat pels captadors. Un tercer tipus de calefacció és la denominada calefacció per *sòl radiant*, normalment utilitzada en països freds a causa de la seva inèrcia, que fa circular l'aigua per uns tubs sota terra perquè escalfin el sòl i per convecció natural, posteriorment, l'ambient.

### 4.2.1 Calefacció amb aigua

La figura 4.6 ens mostra un esquema de sistema de producció solar d'aigua calenta sanitària combinada amb la calefacció amb radiadors, però també haguéssim pogut fer passar l'aigua per un bescanviador de calor aigua-aire i llençar aire calent als locals. Disposem, com sempre, d'un tanc d'acumulació d'on obtenim tota l'energia que necessitem en el moment que la necessitem. La circulació es fa amb bombes.

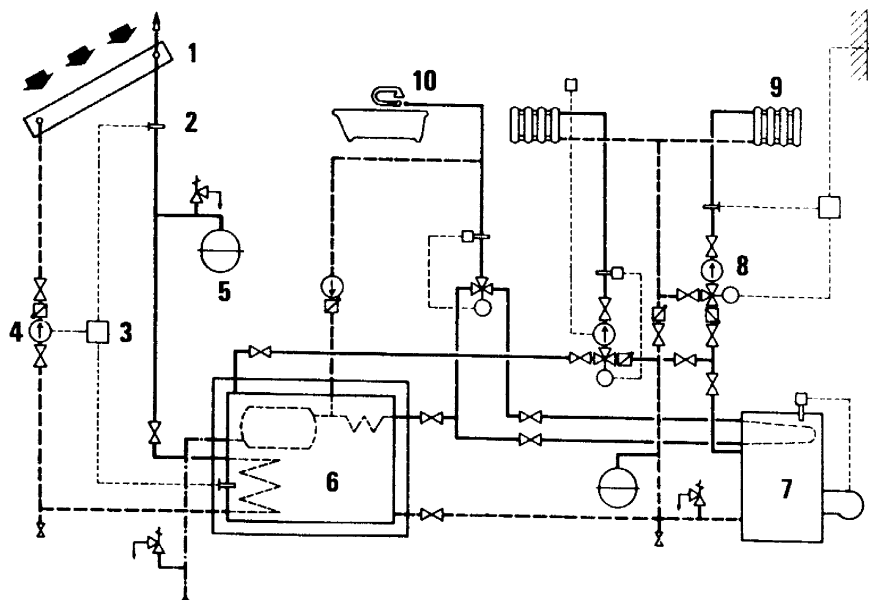


Fig. 4.6 Calefacció amb radiadors. 1) Captadors. 2) Termòstat. 3) Comandament. 4) Bomba. 5) Dipòsit d'expansió. 6) Acumulador d'aigua calenta amb bescanviador de calor i escalfador. 7) Caldera auxiliar de calefacció. 8) Bomba. 9) Radiador o sòl radiant. 10) Presa d'ACS (Font: CEAC, amb permís dels editors).

### 4.2.2 Calefacció amb aire

La figura 4.7 ens mostra la configuració d'un sistema de calefacció solar per aire. En aquest cas, l'obtenció d'aigua calenta es veu certament desfavorida perquè l'aire no té una capacitat calorífica suficient per escalfar l'aigua i es necessita un sistema de suport prou potent. En aquest cas, l'aire passa pels captadors per arribar directament a la zona que es vol calefactar i l'acumulació no es fa en un medi fluid sinó en un medi sòlid com és ara el *llit de còdols* o acumuladors de grava (figura 4.8), per on l'aire passa amb un temps de residència prou elevat com per transferir la seva energia a les pedres i permetre, així, l'acumulació.

També podem utilitzar un medi que canviï de fase a la temperatura de treball, com ara les sals foses o les cires. En aquest cas l'acumulació es denomina de *calor latent*, i aquestes sals o cires acumulen la calor de canvi de fase. En la calefacció amb aire, la circulació es fa amb ventiladors.

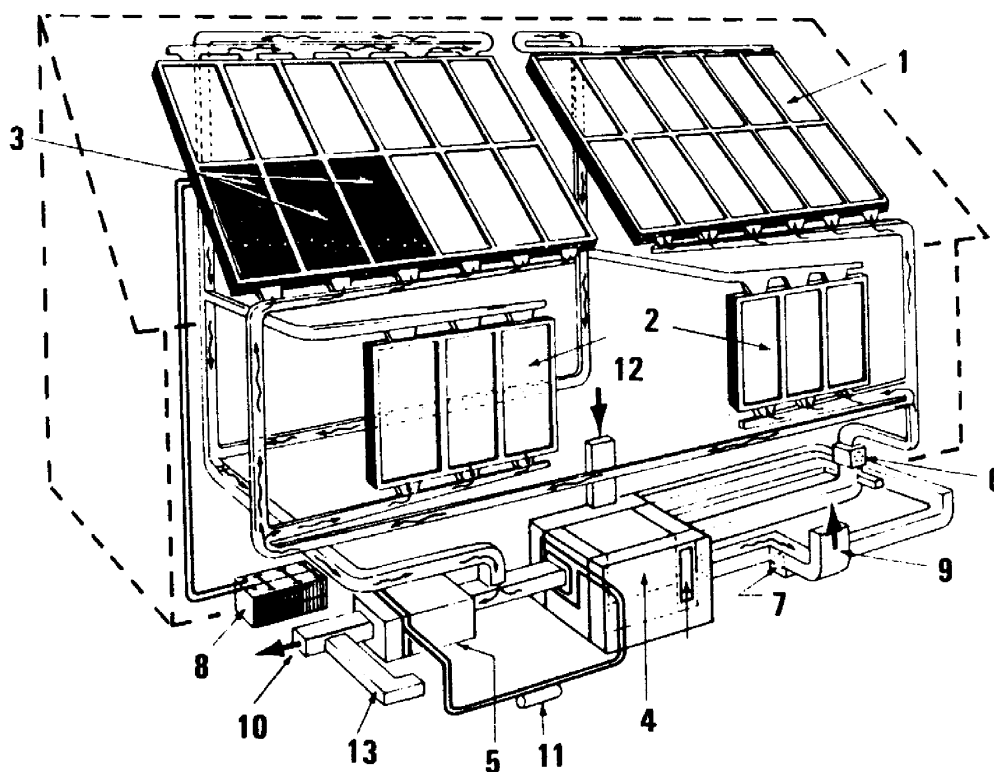


Fig. 4.7 Calefacció per aire amb acumulació de calor latent i cèl·lules solars. 1) Captadors tipus aire. 2) Captadors verticals al mur sud. 3) Cèl·lules fotovoltaïques. 4) Acumulador principal de calor latent. 5) Acumulador secundari de calor latent. 6) Ventilador del circuit primari. 7) Ventilador del circuit de distribució. 8) Acumulador elèctric. 9) Aire calent a l'habitacle. 10) Sortida d'aire. 11) Compressor (bomba de calor). 12) Aire fred de l'habitacle. 13) Conducte de bypass (Font: CEAC, amb permís dels editors).

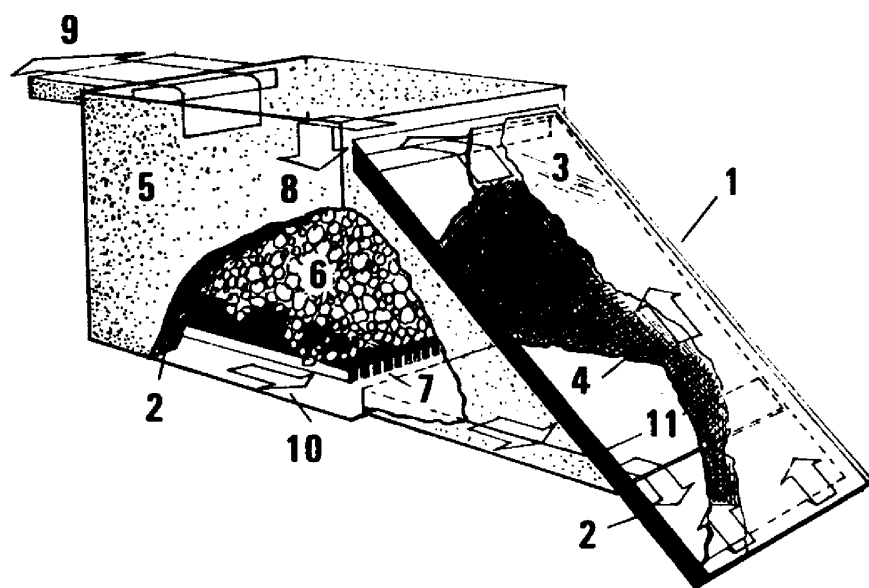


Fig. 4.8 Esquema de principi d'un sistema de calefacció solar per aire amb acumulador de llit de còdols. 1) Captador solar tipus aire. 2) Aïllament. 3) Tapa transparent. 4) Placa absorbidora negra. 5) Dipòsit. 6) Grava. 7) Separador. 8) Aire calent del captador. 9) Aire calent a l'habitacle. 10) Aire fred de retorn al captador. 11) Cambra d'aire (Font: CEAC, amb permís dels editors).

#### 4.2.3 Calefacció amb sòl radiant

La calefacció amb sòl radiant utilitza l'aigua que circula pels captadors per fer-la circular a la vegada per un circuit tancat de tubs que volta el sòl de l'habitacle de la manera que mostra la figura 4.9. Els tubs es col·loquen sobre del forjat de manera que escalfin el terra que es trepitja i a la vegada escalfin, per convecció natural, l'ambient que hi ha en contacte. Un sistema de sòl radiant té, però, una certa inèrcia que cal estudiar en cada cas. En general, és més favorable en ambients freds i de càrrega tèrmica molt constant.

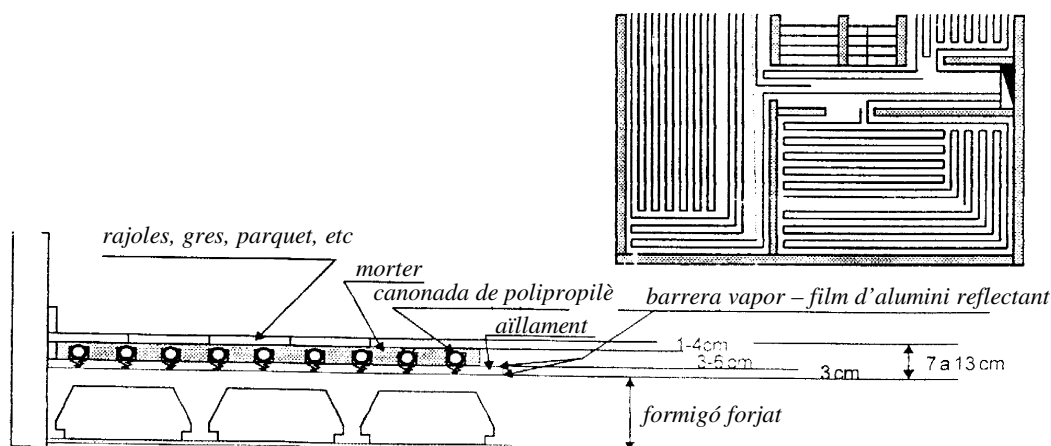


Fig. 4.9 Secció i esquema d'una instal·lació de calefacció amb sòl radiant (LKN).

### 4.3 Piscines

L'aprofitament de l'energia solar per a la producció d'aigua calenta sanitària i per a la calefacció de locals es dificulta pel fet que la demanda energètica no es correspon amb l'oferta solar. Això implica una compensació a base d'acumuladors de calor. Les piscines, en canvi, no tenen aquest inconvenient i s'utilitzen en moments estiuencs i de bon temps. Són, doncs, la possibilitat d'aprofitament ideal de l'energia solar, al millor preu i amb un manteniment quasi nul.

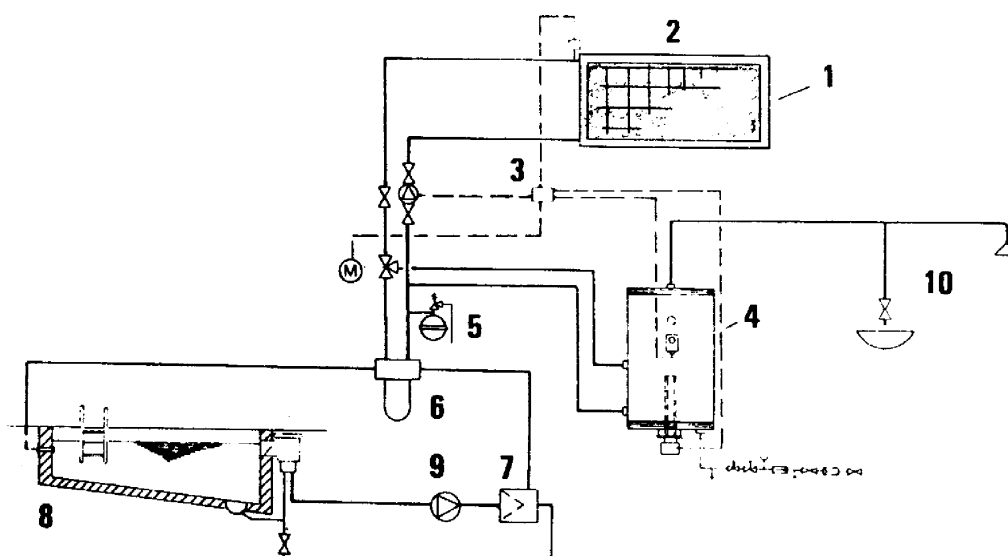


Fig. 4.10 Preparació d'aigua calenta solar combinada amb la calefacció de la piscina. 1) Captadors solars. 2) Termòstat. 3) Comandament. 4) Acumulador d'aigua calenta. 5) Dipòsit d'expansió. 6) Bescanviador de calor. 7) Instal·lació de filtres. 8) Piscina. 9) Bomba. 10) Presa d'ACS (Font: CEAC, amb permís dels editors).

La temperatura d'una piscina resta entre els 20 °C i 28 °C, per la qual cosa els rendiments dels captadors són força elevats. La calefacció pot ser solar indirecta amb circuit obert (figura 4.12) o tancat (figura 4.11), i solar directa, mitjançant la utilització de plàstics que directament tirats sobre de la piscina i a un costat escalfen l'aigua que circula per sota o per dins, respectivament, d'una infinitat de petits canals de material plàstic (polipropilè, cautxú...).

La superfície de captació necessària va en funció de la superfície de la piscina que s'ha d'escalfar, ja que és per la superfície per on l'aigua intercanvia calor amb el medi. A les nostres latituds cal muntar captadors amb una superfície aproximadament del 30% de la de la piscina, i augmentar-la fins al 50% si la instal·lació està en una zona especialment freda.

El cost d'aquests equips pot oscil·lar en funció del tipus de muntatge que es faci i variarà bàsicament en funció de la ubicació dels captadors i del sistema de regulació. De manera orientativa, el cost per una piscina de 25 m<sup>2</sup> pot estar entre les 250.000 i les 425.000 pessetes.

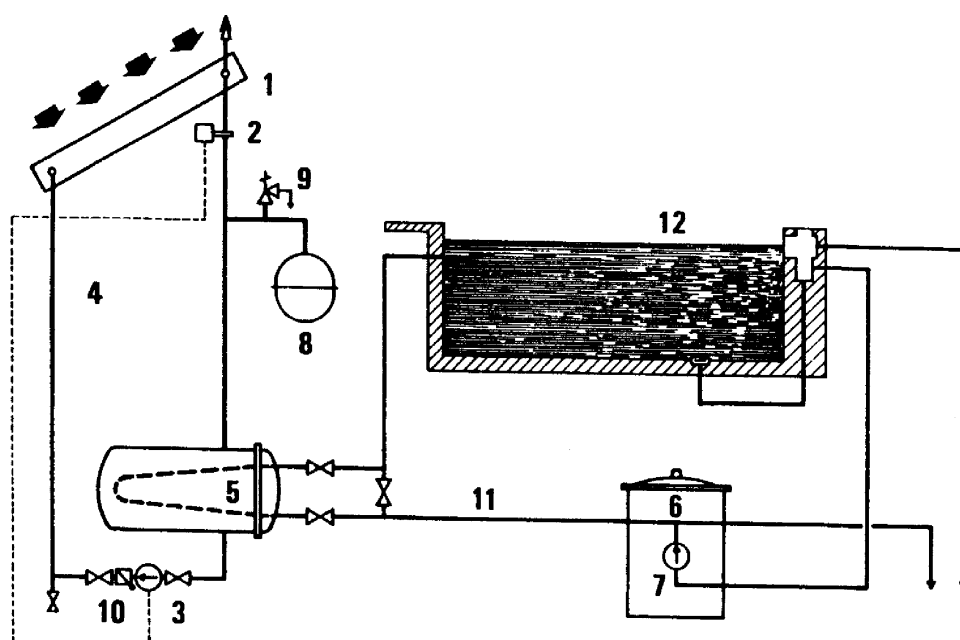


Fig. 4.11 Calefacció solar d'una piscina en circuit tancat. 1) Captadors solars. 2) Termòstat. 3) Comandament. 4) Circuit captador primari. 5) Bescanviador de calor. 6) Filtres de la piscina. 7) Bomba de la piscina. 8) Dipòsit d'expansió. 9) Vàlvula de retenció. 10) Dispositiu de retenció. 11) Circuit secundari. 12) Aigua de la piscina (Font: CEAC, amb permís dels editors).

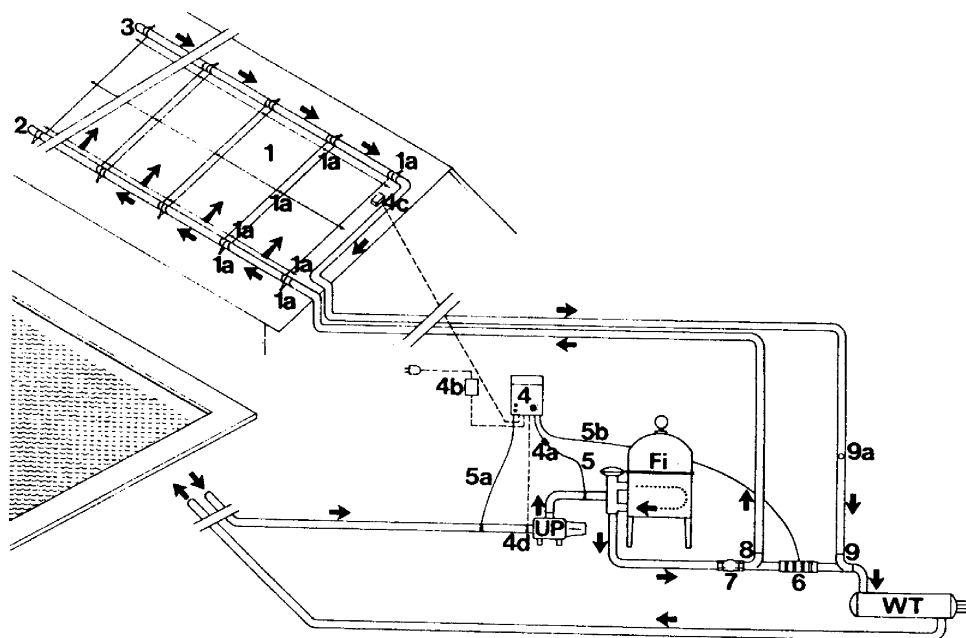


Fig. 4.12 Calefacció solar d'una piscina en circuit obert. 1) Captadors solars. 1a) Unions i fixacions. 2) Terminal. 3) Vàlvula de purga d'aire. 4) Comandament. 4a) Filtre de protecció. 4b) Transformador 220 V - 24 V. 4c) Sensor de radiació solar. 4d) Sensor de temperatura de la piscina. 5) Impuls hidràulic connectat. 5a) Impuls hidràulic desconnectat. 5b) Canonada de comandament a la vàlvula. 6) Vàlvula de comandament. 7) Vàlvula de retenció. 8) Sortida cap als captadors. 9) Retorn dels captadors. 9a) Vàlvula de comporta. Fi) Filtre existent. UP) Bomba existent. WT) Bescanviador de calor existent (Font: CEAC, amb permís dels editors).



#### 4.4 Control i manteniment

Per a un bon resultat energètic, cal que el propietari de la instal·lació verifiqui periòdicament el funcionament dels diferents elements que formen la mateixa, que estableixi els diferents elements de seguretat i que fixi un programa de manteniment adequat. Els elements de control i seguretat bàsics que cal establir en una instal·lació d'energia solar són els següents:

- Controls de funcionament:
  - Termòstat diferencial de control
  - Indicador de la pressió en el circuit primari
  - Termòstat de regulació de l'energia auxiliar
  - Purgadors automàtics d'aire
  - Bombes de circulació
- Elements de seguretat:
  - Vàlvules de seguretat en primari i secundari
  - Dipòsits d'expansió

La taula 4.1 ens dóna una llista de les operacions de manteniment més habituals en aquests casos. Principalment, cal fer un manteniment acurat dels aïllaments i la seva protecció UV, dels filtres, dels bescanviadors, de les bombes i de la qualitat del líquid en el primari.

#### 4.5 Connexió de captadors

Un punt important per tractar és el de la connexió dels captadors. En el funcionament de les instal·lacions que hem vist fins ara, el fluid portador de calor, el fluid que passa pels captadors, recircula de manera controlada per l'interior de l'element acumulador cedint la calor absorbida en els captadors de manera progressiva. Inicialment tot està a una mateixa temperatura, però durant les seves diferents recirculacions, el fluid anirà augmentant la temperatura així com la de l'acumulador fins a arribar a la de consigna que haguem fixat i el sistema aturarà el seu funcionament. Aquest procés durarà un cert temps. I és bàsicament per modificar aquest temps que s'estudia el tipus de connexió entre els diferents captadors d'una instal·lació.

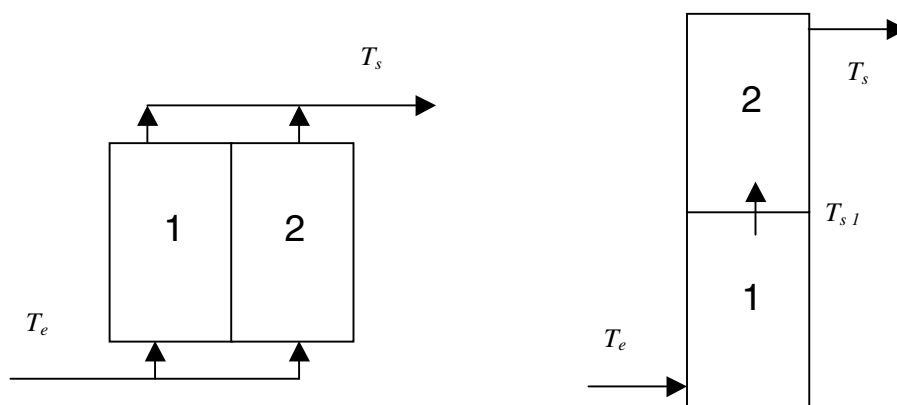


Fig. 4.13 Connexions en paral·lel i en sèrie

Taula 4.1 Operacions de neteja i manteniment més usals en una instal·lació de captadors solars.

Sistema	Operació	Freqüència (mesos)	Observacions
<b>Camp de captadors</b>	<b>Neteja</b>	<b>12</b>	Amb aigua, detergent i rasqueta. Realitzar l'operació en hores de baixa insolació, a l'aurora o a la posta.
	<b>Estructura</b>	<b>12</b>	Llimar i arreglar amb <i>mini</i> i pintura aquelles parts de l'estructura de suport que presentin corrosió i comprovar els cargols de subjecció (a partir del 2n any).
	<b>Vidres (captadors)</b>	<b>6</b>	Inspecció visual. En cas de trencament, s'han de substituir. En cas de condensacions, comprovar les finestres de ventilació.
	<b>Juntes (captadors)</b>	<b>6</b>	Comprovació visual d'esquerdes, deformacions i degradacions.
	<b>Absorbidor (captadors)</b>	<b>6</b>	Inspecció visual de corrosions, deformacions. En cas de fuites, canviar el captador.
	<b>Connexions (captadors)</b>	<b>6</b>	Inspecció visual de l'aparició de fuites.
	<b>Carcassa (captadors)</b>	<b>6</b>	Deformacions i oscil·lacions.
<b>Circuit primari</b>	<b>Fluid portador de calor</b>	<b>12</b>	Comprovar una vegada a l'any la seva densitat (concentració de glicol) i el seu ph (estat de degradació). Un ph < 5 indica que cal renovar el fluid.
		<b>60</b>	Canvi de fluid.
	<b>Estanqueïtat</b>	<b>24 (màx.)</b>	Efectuar la prova de pressió (2n any).
	<b>Aïllament</b>	<b>12</b>	Inspecció visual sobretot de les unions: comprovació de la humitat en aïllament situat sobre juntes i soldadures (a partir dels primers 18 mesos).
	<b>Purgadors</b>	<b>12</b>	Neteja i comprovació del seu correcte funcionament.
	<b>Serpentí</b>	<b>60</b>	Neteja amb desincrustant.
	<b>Bomba</b>	<b>12</b>	Estanqueïtat, lubricació i mesura del dielèctric.
	<b>Termòstat</b>	<b>12</b>	Neteja, control, regulació i comprovació amb un equip de prova.
	<b>Dipòsit d'expansió</b>	<b>12</b>	Comprovació de la pressió.
	<b>Bescanviador</b>	<b>12</b>	Neteja i inspecció del bescanviador en els llocs amb aigua molt dura (Canàries, Mallorca i Catalunya).
		<b>60</b>	Neteja i inspecció del bescanviador en els llocs amb aigua tova.
<b>Circuit secundari</b>	<b>Pressòstats</b>	<b>12</b>	Neteja, engreix, control de funcionament i regulació.
	<b>Vàlvules de tall</b>	<b>12</b>	Engreixar i reajustar el premsaestopes.
	<b>Vàlvules de seguretat</b>	<b>12</b>	Moure-les per evitar incrustacions
	<b>Acumulador</b>	<b>24 (màx.)</b>	Comprovació de l'ànode de sacrifici (al 1r any)
<b>Electricitat</b>	<b>Interruptors</b>	<b>12</b>	Netejar i ajustar borns.
	<b>Comptadors</b>	<b>12</b>	Neteja i ajustar borns.
	<b>Diferencials</b>	<b>12</b>	Control de funcionament. Mesura de la presa de terra.
	<b>Armari elèctric</b>	<b>12</b>	Neteja.

Els captadors es poden connectar en paral·lel, en sèrie (com mostra la figura 4.13) o en combinació. Però el seu comportament, per la característica de la seva recta de rendiment, variarà en funció del cabal circulat per cada un d'ells i de la temperatura d'entrada a aquests captadors. Aquesta recta ens diu, en essència, que a mesura que augmenta la temperatura d'entrada del fluid al captador, disminueix el seu rendiment, és a dir, la calor absorbida és més petita i el salt de temperatures entre entrada i sortida del captador també disminueix.

Si la connexió es fa en *paral·lel*, els cabals circulat per cada captador seran els mateixos i els salts tèrmics també, amb la qual cosa la recta de rendiment del captador es podrà assumir com la "recta de rendiment" de la instal·lació i el sistema funcionarà tal com hem explicat al primer paràgraf.

Ara bé, sembla lògic pensar que si aconseguim fer arribar el fluid a l'acumulador a una temperatura més elevada, el temps que tardi el dipòsit a arribar a la temperatura d'acumulació serà inferior. I és en aquest cas quan es pot decidir la connexió en *sèrie*: el fluid sortirà del primer captador a una temperatura  $T_{s,1}$ , que serà a la vegada la d'entrada del següent. Tot i així, pel fet que la temperatura d'entrada al segon captador augmenta, el rendiment no serà el mateix i la instal·lació es comportarà, globalment, en un entremig.

L'estudi del cas de connexió en sèrie ens ha de portar a l'obtenció d'una recta idèntica a la de l'equació 3.12, però no representant a un únic captador sinó al conjunt de tota la instal·lació. No cal ni que els captadors siguin idèntics: la condició és que cada un d'ells vingui descrit pels dos paràmetres ja coneguts:  $F_R U_L$  i  $F_R (\tau\alpha)$ . Fixant-nos en la figura 4.13, la calor útil que podem aprofitar dels dos captadors (en aquest cas captadors plans, amb  $C = 1$ ) és:

$$Q_{u,1} + Q_{u,2} = A_1 \cdot F_{R1} \cdot [(\tau\alpha)_1 \cdot I_S - U_{L1} \cdot (T_e - T_a)] + A_2 \cdot F_{R2} \cdot [(\tau\alpha)_2 \cdot I_S - U_{L2} \cdot (T_{s,1} - T_a)] \quad (4.2)$$

On  $T_e$  és la temperatura d'entrada al primer captador i  $T_{s,1}$  la de sortida, que és a la vegada la d'entrada al segon captador i que es troba com:

$$T_{s,1} = T_e + \frac{Q_{u,1}}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (4.3)$$

Eliminant  $T_{s,1}$  d'aquestes dues últimes equacions podem escriure:

$$Q_{u,1+2} = \{A_1 \cdot F_{R1} \cdot (\tau\alpha)_1 \cdot (1 - K) + A_2 \cdot F_{R2} \cdot (\tau\alpha)_2\} I_S - \{A_1 \cdot F_{R1} \cdot U_{L1} \cdot (1 - K) + A_2 \cdot F_{R2} \cdot U_{L2}\} \cdot (T_e - T_a) \quad (4.4)$$

on  $K$  val:

$$K = \frac{A_2 \cdot F_{R2} \cdot U_{L2}}{\dot{m} \cdot c_p}$$

La forma de l'equació 4.4 ens suggereix que la combinació dels dos captadors es pot considerar com un únic captador amb les característiques següents:

$$\begin{aligned}
A_C &= A_1 + A_2 \\
F_R(\tau\alpha) &= \frac{A_1 \cdot F_{R1} \cdot (\tau\alpha)_1 \cdot (1-K) + A_2 \cdot F_{R2} \cdot (\tau\alpha)_2}{A_C} \\
F_R U_L &= \frac{A_1 \cdot F_{R1} \cdot U_{L1} \cdot (1-K) + A_2 \cdot F_{R2} \cdot U_{L2}}{A_C}
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Si tres o més captadors es disposen en sèrie, aquestes equacions 4.5 es poden utilitzar pels dos primers captadors per definir un nou "primer" captador equivalent i es poden anar aplicant successivament per tants captadors com tinguem. Si els dos captadors són idèntics, les equacions anteriors es redueixen a:

$$\begin{aligned}
F_R(\tau\alpha) &= F_{R1}(\tau\alpha)_1 \cdot \left(1 - \frac{K}{2}\right) \\
F_R U_L &= F_{R1} U_{L1} \cdot \left(1 - \frac{K}{2}\right)
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Per  $N$  captadors idèntics en sèrie, l'aplicació repetida de les equacions anteriors porta a les expressions següents:

$$\begin{aligned}
F_R(\tau\alpha) &= F_{R1}(\tau\alpha)_1 \cdot \left[ \frac{1 - (1-K)^N}{N \cdot K} \right] \\
F_R U_L &= F_{R1} U_{L1} \cdot \left[ \frac{1 - (1-K)^N}{N \cdot K} \right]
\end{aligned} \tag{4.7}$$

### Exemple 4.2

Estudiem el comportament de tres disposicions amb un total de sis captadors. Les característiques comunes són les següents (amb fluid circulant com el de l'exemple 3.2):

Radiació instantània escollida:  $I_s = 1.000 \text{ W/m}^2$

Temperatura ambient:  $15^\circ\text{C}$

Captador en estudi: *Roca*

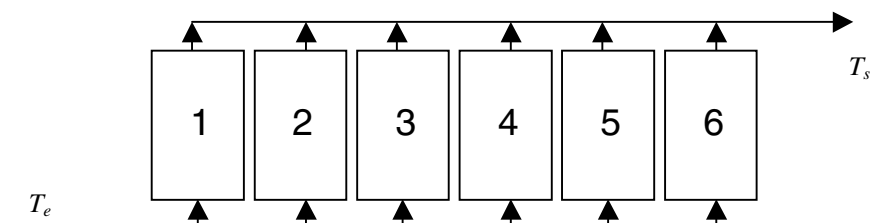
Recta de rendiment:  $\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s} = 0,784 - 4,9 \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s}$

Àrea de captació:  $1,9 \text{ m}^2$

Energia màxima aprofitable:  $1.000 \text{ W/m}^2 \cdot 1,9 \text{ m}^2 \cdot 6 \text{ captadors} = 11.400 \text{ W}$

Cabal circulant:  $0,015 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$

**a) Connexió en paral·lel**



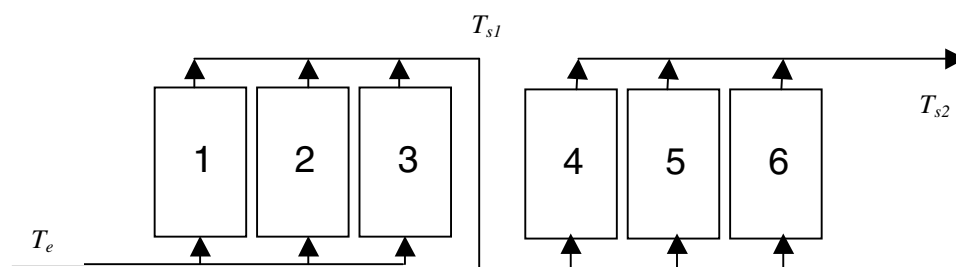
Per a una connexió en paral·lel com la de la figura, el cabal circulant per cada captador valdrà:

$$\dot{m}_{\text{fluid}} = 0,015 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \cdot A_c = 0,015 \cdot 1,9 = 0,0285 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Suposant diferents temperatures d'entrada, la variació dels paràmetres del captador (p.ex., principalment la variació del seu rendiment en funció d'aquesta temperatura) ve reflectida a la taula següent:

$T_e$ (d'assaig)	$\eta$ (Eq. 3.12)	$(T_s - T_e)$ (Eq. 3.13)	$T_s$	$Q_u$ (total, dels 6 captadors) (W)
0	0,858	17,06	17,06	9.774
10	0,809	16,09	26,09	9.216
20	0,760	15,11	35,11	8.658
30	0,711	14,14	44,14	8.100
40	0,662	13,16	53,16	7.542
50	0,613	12,19	62,19	6.984
60	0,564	11,21	71,21	6.426
70	0,515	10,24	80,24	5.868
80	0,466	9,26	89,26	5.304

Fixem-nos com es va reduint el salt tèrmic i el rendiment a mesura que la temperatura d'entrada al captador augmenta i com, en conseqüència, la calor útil total disminueix.

**b.1) Connexió en sèrie (2) paral·lel (3)**

Si volem reduir el temps de resposta del sistema augmentant la temperatura de sortida del fluid, forçosament hem de passar per algun tipus de connexió en sèrie. L'estudi d'aquesta connexió es pot fer tal com hem fet anteriorment, observant quin és el comportament de cada captador i estudiant-lo per separat.

El grup dels tres primers captadors i el grup dels tres segons, pel fet d'estar connectats en paral·lel, es comporten igual. És a dir, és com si formessin un únic captador a través del qual hi passessin:

$$\dot{m}_{fluid} = 0,015 \frac{kg}{s \cdot m^2} \cdot A_c \cdot 3 = 0,015 \cdot 1,9 \cdot 3 = 0,0855 \frac{kg}{s}$$

Els resultats vénen reflectits a la taula inferior. Fixem-nos en dues coses: primer, el rendiment total és el valor mitjà dels rendiments parcials, i segon, la calor útil total és inferior que en el cas anterior tot i que la temperatura final de sortida és més elevada. És a dir, la calor no s'aprofita de forma tan eficaç com en el cas en paral·lel.

La calor útil es calcula mitjançant l'equació 3.13 amb  $c_p = 3.350 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  (aigua + anticongelant):

$$\eta = \frac{Q_{util}}{I_s \cdot A_c} = \frac{\dot{m}_{fluid} \cdot c_p \cdot (T_e - T_s)}{I_s \cdot A_c}$$

$T_e$	$\eta_1$	$T_{s1}-T_e$	$T_{s1}$	$\eta_2$	$T_{s2}-T_{s1}$	$T_{s2}$	$T_{s2}-T_e$	$Q_u$	$\eta_{tot}$
0	0,858	17,06	17,06	0,774	15,40	32,47	32,47	9.299	0,816
10	0,809	16,09	26,09	0,730	14,52	40,61	30,61	8.768	0,769
20	0,760	15,11	35,11	0,685	13,64	48,76	28,76	8.236	0,722
30	0,711	14,14	44,14	0,641	12,76	56,90	26,9	7.705	0,676
40	0,662	13,16	53,16	0,597	11,88	65,04	25,04	7.173	0,629
50	0,613	12,19	62,19	0,553	11,00	73,19	23,19	6.642	0,583
60	0,564	11,21	71,21	0,509	10,12	81,33	21,33	6.111	0,536
70	0,515	10,24	80,24	0,464	9,24	89,48	19,48	5.579	0,489
80	0,466	9,26	89,26	0,420	8,36	97,62	17,62	5.048	0,443

Aquest rendiment final  $\eta_{\text{tot}}$ , però, es pot trobar d'una manera molt menys molesta, a partir de les equacions que hem vist ara fa un moment, a l'apartat 4.5, trobant una recta de rendiment global, de tota la instal·lació. En aquest cas tenim "dos" captadors idèntics (en realitat dos grups de tres captadors idèntics) units en sèrie i dels quals en podem treure la recta de rendiment comú a partir de les equacions 4.6 vistes anteriorment.

En primer lloc avaluem el factor  $K$  tenint en compte que ara el segon captador al qual es refereix aquest factor és el conjunt de tres en paral·lel, amb la qual cosa tenim:

$$K = \frac{A_2 \cdot F_{R2} \cdot U_{L2}}{\dot{m} \cdot c_p} = \frac{1,9 \cdot 3 \cdot 4,9}{0,0855 \cdot 3.350} = 0,0975$$

Calculat el factor  $K$ , podem trobar els nous valors de  $F_R U_L$  i  $F_R (\tau \cdot \alpha)$  que faran ara referència no ja a un captador sinó a tota la instal·lació:

$$F_R (\tau \alpha) = F_{R1} \cdot (\tau \alpha)_1 \cdot \left(1 - \frac{K}{2}\right) = 0,784 \cdot \left(1 - \frac{0,0975}{2}\right) = 0,746$$

$$F_R U_L = F_{R1} \cdot U_{L1} \cdot \left(1 - \frac{K}{2}\right) = 4,9 \cdot \left(1 - \frac{0,0975}{2}\right) = 4,66$$

La recta de rendiment de la instal·lació prendrà ara la forma:

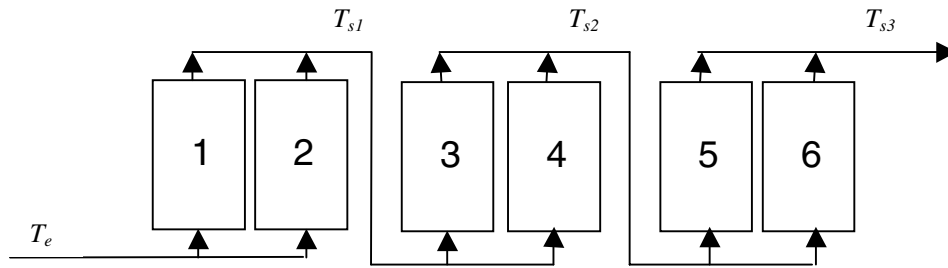
$$\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s} = 0,746 - 4,66 \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s}$$

L'estudi pas a pas que hem fet anteriorment, el podem fer ara amb un sol pas a partir de la nova recta de rendiment. Els valors obtinguts utilitzant l'equació anterior vénen reflectits a la taula següent:

$T_e$	$\eta_{\text{tot}} \text{ (cas b.1)}$	$\eta_{\text{tot}} \text{ (cas b.2)}$
0	0,816	0,777
10	0,769	0,732
20	0,723	0,688
30	0,676	0,643
40	0,630	0,599
50	0,583	0,555
60	0,536	0,510
70	0,490	0,466
80	0,443	0,422

### b.2) Connexió en sèrie (3) paral·lel (2)

Una altra opció podria ser la següent:



En aquest cas, el cabal circulant per captaors amb igual comportament valdrà:

$$\dot{m}_{fluid} = 0,015 \frac{kg}{s \cdot m^2} \cdot A_c \cdot 2 = 0,015 \cdot 1,9 \cdot 2 = 0,057 \frac{kg}{s}$$

I el valor del factor  $K$  no es veurà afectat:

$$K = \frac{A_2 \cdot F_{R2} \cdot U_{L2}}{\dot{m} \cdot c_p} = \frac{1,9 \cdot 2 \cdot 4,9}{0,057 \cdot 3.350} = 0,0975$$

La recta de rendiment del conjunt valdrà ara:

$$\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s} = 0,71 - 4,437 \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s}$$

Fixem-nos en com han disminuït els rendiments. Tot i així, aconseguim més temperatura a l'entrada de l'acumulador i una reducció del temps de resposta del sistema acumulador.



#### 4.6 Reglament d'instal·lacions tèrmiques en edificis (RITE)

Al 1998 s'aprova per llei (Reial Decret 1751/1998 del 31 de juliol) el nou *Reglament d'instal·lacions tèrmiques en edificis*, RITE, i les seves *Instruccions Tècniques Complementàries* (abreviades ITE), pel qual es regula el disseny, construcció, utilització i regulació de tot tipus d'instal·lacions fluidotèrmiques en edificis. Una de les Instruccions Tècniques Complementàries fa referència a Instal·lacions Específiques. En particular, la ITE 10.1 fa referència a la Producció d'ACS mitjançant sistemes solars actius i especifica tot un seguit de criteris generals de disseny i càlcul d'obligat compliment dels quals en fem un abstracte seguidament.

##### ITE 10.1.3.1. Disposició dels captadors

Els captadors es disposaran en files que han de tenir el mateix nombre d'elements. Les files han de ser paral·leles i estar ben alineades.

Per cada fila, la connexió dels captadors es farà en paral·lel i només podran disposar-se en sèrie quan la temperatura d'utilització de l'aigua calenta sigui més elevada de 50°C. Les files es connectaran entre si també en paral·lel. Només poden disposar-se en sèrie quan els captadors dintre de les files s'hagin connectat en paral·lel i es necessiti una temperatura d'utilització de l'aigua més gran dels 50 °C.

No s'han de connectar en sèrie més de tres captadors ni més de tres files de captadors connectades en paral·lel.

La connexió entre captadors i entre files es realitzarà de manera que el circuit resulti equilibrat hidràulicament (retorn invertit); contràriament, s'instal·laran vàlvules d'equilibri.

L'entrada del fluid portador de calor s'efectuarà per l'extrem inferior del primer captador de la fila i la sortida per l'extrem superior de l'últim. L'entrada tindrà un pendent ascendent en el sentit de l'avanç del fluid de l'1%.

Els captadors s'orientaran cap al sud geogràfic, i admeten desviacions com a màxim de 25° respecte a aquesta orientació.

L'angle d'inclinació dels captadors sobre un pla horitzontal es determinarà en funció de la latitud geogràfica  $\beta$  i del període d'utilització de la instal·lació:  $\beta^\circ$  per a una instal·lació anual,  $(\beta + 10)^\circ$  per a una utilització hivernal i  $(\beta - 10)^\circ$  per a una utilització estiuenca. S'admeten en qualsevol dels tres casos desviacions de  $\pm 10^\circ$  de màxim.

La separació entre files de captadors s'estableix de manera que al migdia solar del dia més desfavorable (altura solar mínima) del període d'utilització, l'ombra de l'aresta superior d'una filera ha de projectar-se, com a màxim, sobre l'aresta inferior de la filera següent. El càlcul es pot fer acurat o, com la norma indica, mitjançant taules. La distància entre fileres de captadors  $d$  serà igual o més gran que el valor  $d$  obtingut mitjançant l'expressió:

$$d = k \cdot h \quad (4.8)$$

On  $d$  és la separació entre files,  $k$  és l'alçada del captador (totes dues magnituds expressades amb la mateixa unitat de mesura i l'última entesa com l'alçada entre l'aresta superior del captador i el sòl, en vertical) i  $h$  és un coeficient el valor del qual obtenim de la taula 4.2 en funció de la inclinació dels captadors respecte a un pla horitzontal.

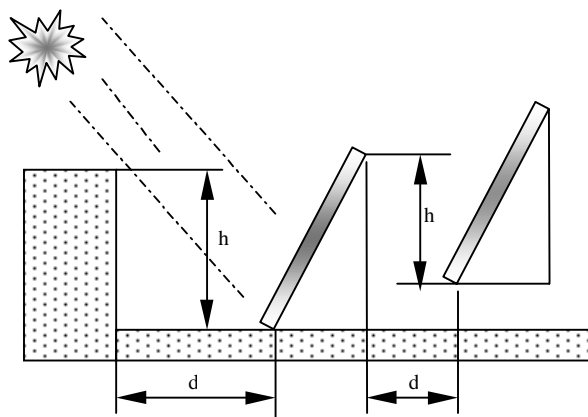


Fig. 4.14 Separació entre files de captadors.

Taula 4.2 Coeficient de separació entre files de captadors segons l'angle d'inclinació.

Inclinació (°)	20	25	30	35	40	45	50	55
Coeficient $k$	1.532	1.638	1.732	1.813	1.879	1.932	1.970	1.992

El cabal del fluid portador es determinarà en funció de la superfície total de captadors instal·lats. El seu valor estarà comprès entre 0,012 l/s i 0,016 l/s·m<sup>2</sup> d'àrea de captadors. En les instal·lacions on els captadors estiguin connectats en sèrie, el cabal de la instal·lació s'obtindrà aplicant el criteri anterior i dividint el resultat pel nombre de captadors connectats en sèrie.

#### ITE 10.1.5. Sistema de control

El control de funcionament normal de les bombes serà sempre de tipus diferencial i cal que actuï en funció de la diferència entre la temperatura del fluid portador a la sortida de la bateria de captadors i la del dipòsit d'acumulació.

El sistema de control actuarà i estarà ajustat de manera que les bombes no estiguin en funcionament quan la diferència de temperatures sigui inferior a 2°C i no estiguin parades quan la diferència sigui superior a 7°C. La diferència de temperatures entre els punts d'encesa i de parada del termòstat diferencial no serà inferior a 2°C.

### Annex al capítol 4

Relació d'empreses dedicades a les energies renovables a Catalunya<sup>1</sup> extret de la *Guia Professional de les energies renovables a Catalunya*, editada per **APERCA** (Associació de Professionals de les Energies Renovables de Catalunya):

Seu social: Institut Català d'Energia (**ICAEN**)  
 Avinguda Diagonal, 453 bis, 2  
 Telèfon: 93 439 28 00  
 Fax: 93 419 72 53  
 Adreça electrònica: [aperca@suport.org](mailto:aperca@suport.org)

A - Enginyeria i Projectes; B - Fabricant d'equips; C – Comercial; D - Instal·lador

Empreses i dades	Arquitectura bioclimàtica				Solar tèrmica				Solar fotovoltaica				Eòlica			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
ABAC (Josep Bacaicoa) c/ Renaixença, 9-11, 4 rt, 08041 Barcelona Tel.: 93 450 32 12 Fax: 93 450 43 21 <a href="mailto:j.bacaicoa@cgac.es">j.bacaicoa@cgac.es</a>	⊗	⊗			⊗		⊗									
BCN Cambra Lògica Projectes (Xavier Traver) c/ Sant Joan,8, 08629 Torrelles de Llobregat Tel.: 689 01 36 Fax: 689 05 45 <a href="mailto:bcn@bcnprojectes.es">bcn@bcnprojectes.es</a>	⊗	⊗			⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗				
BCN Solaring Materials S.L. ( Eduardo Oistrach) c/ Sant Joan,8, 08629 Torrelles de Llobregat Tel.: 636 21 12 Fax: 636 06 85 <a href="mailto:bcn@bcnprojectes.es">bcn@bcnprojectes.es</a>							⊗									
BIOSOL (Pere Puigpiqué) c/ Juan de Mena, 29, bxos, 3a, 08035 Barcelona Tel.: 428 12 80 Fax: 428 52 77 mòbil: 909 307 188 <a href="mailto:biosol@tinn.net">biosol@tinn.net</a>										⊗	⊗	⊗		⊗	⊗	⊗
Chromagen (Carles Gutiérrez) Avda. Arrahona 41-43 Pol. Santa. 08210 Barberà del Vallès Tel.: 718 15 00 Fax: 718 01 03 <a href="mailto:chrogen@teleline.es">chrogen@teleline.es</a>					⊗	⊗	⊗		⊗							
Comercial TECCA, S.A. (Aleix Boada) c/ Teixidors 1, 17820 Banyoles (Girona) Tel.: (972) 57 52 16 Fax: (972) 57 39 04 <a href="mailto:tecca@gic.es">tecca@gic.es</a>					⊗		⊗	⊗								
Ecosolar (Antoni Carres) Latorre, 62 baixos local, 08201 Sabadell Tel.: 715 50 41 Fax: 727 02 24					⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗				
ECOTÈCNIA S. Coop (Miquel Miró) c/ Amistat 23, 08005 Barcelona Tel.: 225 76 00 Fax: 221 09 39 <a href="mailto:acotecnia@ecotecnia.com">acotecnia@ecotecnia.com</a>									⊗	⊗	⊗		⊗	⊗	⊗	⊗

<sup>1</sup> Dades de juny de 1999

Empreses i dades	Arquitectura bioclimàtica				Solar tèrmica				Solar fotovoltaica				Eòlica			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Energy Resources, S.A. (Daniel Castells Batllò) Major de Sarrià 185-187 àtic. 08017 Barcelona Tel.: 252 38 40 Fax: 252 38 45	Construcció i gestió de minicentrals hidràuliques															
ELEKTRON (Josep Viver) c/ Mora d'Ebre, 50, B-2, 08023 Barcelona Tel.: 210 83 09 Fax: 219 01 07 elektron@arrakis.es									⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗
ENERSOFT (Victor Almagro) c/ Casp, 46, 5è G, 08010 Barcelona Tel.: 317 18 27 Fax: 317 16 35					⊗											
Energia Renovable GATMA (Ramon Gastó) Avda President Tarradellas 45-47, 25001 Lleida Tel.: (973)22 36 36 Fax: (973) 20 04 44 mòbil: 908 53 18 65					⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗
Ermont (Benjamí Nadal) c/ Cardenal Vidal Barraquer 5, 43550 Uldecona Tel.: (977) 72 10 16 Fax: (977) 72 10 16		⊗					⊗	⊗			⊗	⊗			⊗	⊗
Fidela Frutos Schwöbel (Fidela Frutos) c/ Palau 4, 1r 1a. 08002 Barcelona Tel.: 317 88 08 Fax: 317 88 08	⊗	⊗														
GPF Gestió Programes de Formació (Xavier Fusté) c/ Bruc 88 2on, 08009 Barcelona Tel.: 487 70 25 Fax: 2159718							⊗									
Inalco (Manuel Rico) c/ Santa Caterina 16, 08930 Sant Adrià Tel.: 462 16 64 Fax: 462 16 64 mòbil: 670 253 247					⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗				
Instal·lacions Segarra S.L. (Ramon Segarra) c/ Pere Grau 72, 08320 Manou Tel.: 540 28 75 Fax: 555 12 52							⊗				⊗					
Instal·lacions Vilellas S.L. (Manuel Vilellas) c/ Trinquet 32, 08034 Barcelona Tel.: 204 74 16 Fax: 205 39 48 SOLAR@teleline.es							⊗	⊗			⊗					⊗
Intiam Ruai (Pere Sòria / Joan Fr.) c/ Major de Sant Pere 64, 08222 Terrassa / 43205 Tel.: 784 04 77 Fax: 784 05 17 telf (Reus): (977) 75 32 92 intiam@ctv.es	⊗				⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗				
J.J.R.-93 S.L. c/ Montblanc 28, bxos, 43006 Tarragona Tel.: (977) 20 82 98 Fax: (977) 20 82 98											⊗	⊗				
LKN Sistemas Leken (Josep Fradera) P. Ind. Congost, Mas Pujols nau G, 08520 Les Franqueses Tel.: (93) 840 29 33 Fax: (93) 840 29 42 lksolar@cetib.ictnet.es					⊗	⊗	⊗	⊗								

Empreses i dades	Arquitectura bioclimàtica				Solar tèrmica				Solar fotovoltaica				Eòlica			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Mastervolt Ibèrica (Francisco Pros) Port Sportiu, local 15, 08320 Masnou Tel.: 555 52 11 Fax: 555 85 65 massvolt@intercom.es									⊗	⊗	⊗	⊗			⊗	
Mastilfels S.L. (Sergio Torrens) c/ Almogàvers, 66 1r B. 08018 Barcelona Tel.: 300 39 90 Fax: 300 39 90					⊗			⊗	⊗			⊗	⊗			⊗
Parc Eòlic Baix Ebre S.A. (Ramon Cardús) Barcelona 166, 43500 Tortosa Telf. 977 44 53 08 Fax: 977 44 53 97																⊗
Plàstics Tècnics (Joaquim Font) Avd. Maresme, 251, 08301 Mataró Tel.: 757 30 25 Fax: 757 21 83							⊗	⊗								
PROSANT Torelló (Ramon Vaqué) c/ Verdaguer, 18, 08572 Sant Pere de Torelló Tel.: 858 40 24 Fax: 8509130		⊗														
ROURE VERD S.L. Mas Figueres, 30, 17832 Esponellà Tel.: (972) 57 52 16 Fax: (972) 57 39 04					⊗		⊗	⊗								
SCHWEIZER (Isidor Rando) Mas Asperó, 3, 08770 Sant Sadurní d'Anoia Tel.: (93) 891 14 40 Fax: (93) 818 37 09					⊗	⊗	⊗									
SIEMENS S.A. c/ Juan Fernández, 1, 08940 Cornellà Tel.: (93) 474 22 12 Fax: (93) 474 42 34										⊗	⊗					
SISTEMES ENERGETICS SOLARS S.L. (Josep Solà) c/ Coll i Vehí, 49, 17100 La Bisbal Tel.: (972) 64 08 94 Fax: (973) 64 15 08 mòbil: 909 323 663 ses.cim@ses-energia.com					⊗		⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗		⊗	⊗
Solar Difusió (Antoni Montiel) Passeig Anselm Calvé, 19 baixos. 08262 Callús Tel.: 877 65 01 Fax: 877 65 04					⊗			⊗	⊗			⊗				
SOLAR INGENIERIA 2000 S.L. (Eduardo Oistrach) Avda. La Pineda, 2, 08860 Castelldefels Tel.: (93) 636 21 12 Fax: (93) 636 06 85 mòbil: 610 463 510 gerencia@solaring.es	⊗				⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗
Soltemia (Will Foreman) c/ Horta Novella 109-111. 08201 Sabadell Tel.: 726 53 66 Fax: 714 48 26					⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗				
TECNOLAND Avda. d'Enclar, 96, Santa Coloma - Andorra Tel.: (07-376) 23073 Fax: (07-376) 66167												⊗	⊗		⊗	⊗
Teric Anoia (Isidre Puiggròs) Sant Josep, 102, 08700 Igualada Tel.: 804 41 53 Fax: 805 49 96 ipcterice@teleline.es	⊗	⊗			⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗	⊗		⊗	⊗

[illegible]



## 5 Comportament a llarg termini dels sistemes fototèrmics

Fins ara hem vist quin era el comportament instantani d'un captador solar definit per la recta de rendiment característica (capítol 3) i de quina manera afecten els diferents elements constitutius, com ara un bescanviador, en el resultat final d'obtenció d'energia útil (capítol 4). És el moment d'entendre de quina manera podem estudiar aquests sistemes i optimitzar-ne el seu comportament al llarg de tot l'any perquè l'energia solar que rebem es pugui aprofitar i pugui cobrir les nostres necessitats tèrmiques en l'àmbit domèstic.

### 5.1 Càlcul de càrregues tèrmiques

Les necessitats tèrmiques que podem trobar en l'àmbit domèstic són poques i ben definides: sistemes de calefacció per aigua o directament per aire i obtenció d'ACS per al consum propi. Energèticament, aquestes necessitats prenen el nom de *càrregues tèrmiques* i són funció de la situació geogràfica de l'edificació, l'orientació, la qualitat de la construcció i el particular sistema de vida dels seus ocupants. S'avaluen de forma molt concreta i sense necessitat de coneixements tèrmics especialitzats.

#### a) Càrregues de calefacció

El càlcul de les càrregues de calefacció es pot fer de manera exhaustiva, seguint la normativa establerta, però també es pot encarar a partir del mètode simplificat anomenat dels **graus-dia** (*degree-days* en anglès). Aquest mètode es basa en el fet que la quantitat de calor necessària per mantenir una temperatura interior confortable depèn principalment de la diferència de temperatures interior i exterior. La càrrega de calefacció mensual,  $L_{CAL}$ , per a un edifici mantingut a 18 °C se suposa proporcional al nombre de graus-dia durant el mes:

$$L_{CAL} = U \cdot A \cdot DD \quad (5.1)$$

on  $DD$  és el nombre de graus-dia del mes i  $UA$  és el producte de l'àrea de l'edifici pel coeficient global de pèrdues de l'edifici.

El nombre de graus-dia en un sol dia és la diferència entre 15 °C i la temperatura mitjana del dia calculada com la mitja de les temperatures màxima i mínima d'aquell dia. Si la temperatura mitja del dia és superior als 15 °C, el nombre de graus-dia a prendre és 0 (ja que es considera que la generació interna d'energia a l'edifici i els guanys solars per les finestres són suficients per a fer pujar la temperatura fins als 18 °C considerats de confort). Un llistat de graus-dia en valor mensual per les diferents ciutats espanyoles es pot trobar a l'annex, juntament amb els valors de la temperatura ambient i d'aigua de xarxa per als diferents mesos de l'any.



El producte  $UA$  acostuma a ser difícil d'obtenir si no es coneixen les característiques físiques i constructives de l'edifici. Però per a construccions per les quals es coneix el consum de combustible convencional de la caldera,  $UA$  es pot calcular a partir de l'equació 5.2

$$UA = \frac{N_C \cdot PCI_C \cdot \eta_{caldera}}{DD} \quad (5.2)$$

On  $N_C$  són les unitats de combustible consumides,  $PCI_C$  és el poder calorífic inferior del combustible (vegeu la taula 5.1) i  $\eta_{caldera}$  és el rendiment mitjà de la caldera (0,5 – 0,6 per a calderes de fuel i 1 per a calefacció elèctrica).

Taula 5.1  $PCI$  d'alguns combustibles de calefacció.

<b>Combustibles sòlids</b>	<b><math>PCI</math> (kcal/kg)</b>
Fusta	2.700
Carbó vegetal	6.500
Carbó de turba	3.300
Carbó hulla	5.000
Carbó antracita	7.000
<b>Combustibles líquids</b>	<b><math>PCI</math> (kcal/litre)</b>
Gasoil -C-	8.550
Fuel oil	9.000
Gas-oil	10.000
<b>Combustibles gasos</b>	<b><math>PCI</math> (kcal/kg)</b>
Gas butà	11.860
Gas propà	12.000
Gas ciutat	4.200
Gas natural	9.900 kca/ m <sup>3</sup>
Energia elèctrica	860 kcal/kW·h

#### b) Càrregues per l'escalfament d'ACS

La càrrega tèrmica que implica l'escalfament de l'aigua calenta sanitària depèn, fonamentalment, del tipus de vida i costums dels usuaris de l'edificació. De mitjana es considera un consum de 35 litres per persona i dia, tot i que, com mostra la taula 5.2, segons la tipologia de l'edifici ens podem trobar amb variacions notables. La càrrega mensual d'escalfament de l'ACS es pot calcular a partir de l'equació 5.3 com:

$$L_{ACS} = 35 \left( \frac{\text{litres}}{\text{persona i dia}} \right) \cdot N_H \cdot N_M \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} \cdot (T_{ACS} - T_{xarxa}) \quad (5.3)$$

on  $\rho_{H_2O}$  és la densitat de l'aigua (1 kg/litre),  $c_{pH_2O}$  és la capacitat calorífica de l'aigua (4,18 kJ/kg·K),  $N_M$  són els dies del mes,  $N_H$  el nombre d'usuaris i  $(T_{ACS} - T_{xarxa})$  és el salt tèrmic entre la temperatura de l'aigua de la xarxa (valors tabulats a l'annex) i la temperatura de l'aigua de subministrament (50 °C - 60 °C).

**Exemple 5.1**

Determineu les càrregues tèrmiques de calefacció i aigua calenta sanitària per a una casa habitada per cinc persones a la província de Lleida ( $\phi = 41,37^\circ$ ) el producte UA de la qual val 475 W/°C.

Les càrregues tèrmiques de calefacció es troben a partir del mètode dels graus-dia i segons l'equació 5.1. com

$$L_{CAL} = UA \cdot DD_{diaris} \quad [W]$$

Valor que ens proporciona els W diaris de calefacció. En J/mes, sabent que 1 W és 1 J/s serà

$$L_{CAL} = UA \cdot DD_{diaris} \cdot 3.600 \left( \frac{s}{hora} \right) \cdot 24 \left( \frac{hores}{dia} \right) \cdot N_M$$

El producte UA, com hem dit, és el coeficient global de pèrdues tèrmiques de l'edifici i que nosaltres considerarem 475 W/°C. I DD el nombre de graus-dia del mes (segons les taules de l'annex). Noteu com els DD per mes no coincideixen amb els de les taules perquè els d'aquest exemple s'han obtingut multiplicant la columna dels DD<sub>diaris</sub> pel nombre de dies que té el mes. Tot i així, la variació és poc important.

Les càrregues tèrmiques per ACS vénen donades per l'equació 5.3:

$$L_{ACS} = 35 \left( \frac{\text{litres}}{\text{persona i dia}} \right) \cdot 5 \cdot N_M \cdot 1 \cdot 4,180 \cdot (T_{ACS} - T_{xarxa})$$

on considerem  $T_{ACS} = 60^\circ\text{C}$  i  $T_{XARXA}$  segons les taules de l'annex per a cada mes. Aquests resultats vénen reflectits a la taula següent:

MES	DIES	$T_a$	$T_{XARXA}$	DD diaris ( $15^\circ\text{C} - T_a$ )	$L_{CAL}$ (MJ/mes) (Eq. 5.1)	$L_{ACS}$ (MJ/mes) (Eq. 5.3)	$L_{TOT}$ (MJ/mes) (Eq. 5.4)
G	31	4,9	5	10,1	12.850	1.250	14.100
F	28	7,2	6	7,8	8.963	1.109	10.072
M	31	11,4	8	3,6	4.580	1.182	5.762
A	30	14,6	10	0,4	492	1.100	1.592
M	31	18,3	11	0,0	0	1.114	1.114
J	30	21,9	12	0,0	0	1.056	1.056
J	31	24,8	13	0,0	0	1.068	1.068
A	31	24,6	12	0,0	0	1.091	1.091
S	30	21,6	11	0,0	0	1.078	1.078
O	31	15,5	10	0,0	0	1.137	1.137
N	30	9,5	8	5,5	6.772	1.144	7.915
D	31	5,7	5	9,3	11.832	1.250	13.082
<b>Totals</b>	<b>365</b>				<b>45.489</b>	<b>13.578</b>	<b>59.067</b>

Taula 5.2 Consums diaris considerats a Europa segons la tipologia de l'edifici.

<b>Edifici</b>	<b>Consum d'ACS</b>
Hospitals i clíniques (*)	60 litres / llit
Residències geriàtriques (*)	40 litres / persona
Escoles	5 litres / alumne
Aquarteraments (*)	30 litres / persona
Fàbriques i tallers	20 litres / persona
Oficines	5 litres / persona
Càmpings	60 litres / emplaçament
Hotels (segons categories) (*)	100 a 160 litres / habitació
Gimnasos	30 a 40 litres / usuari
Bugaderies	5 a 7 litres / kg de roba
Restaurants	8 a 15 litres / menjar
Cafeteries	2 litres / esmorzar
(*) Sense considerar el consum de restauració i bugaderia	

Finalment, les càrregues tèrmiques totals del nostre edifici són la suma de les càrregues tèrmiques de calefacció i de les d'escalfament d'aigua calenta sanitària:

$$L_{TOT} = L_{ACS} + L_{CAL} \quad (5.4)$$

## 5.2 El mètode de les corbes- $f$ ( $f$ -charts)

El camí per determinar l'òptim econòmic dels sistemes d'escalfament solar és el d'utilitzar directament com a eina de treball la simulació per ordinador. Ara bé, no podem suposar que cada arquitecte, enginyer o contractista hagi de fer una simulació per ordinador del seu sistema solar cada vegada que en vulgui disposar d'un. Cal treballar amb un mètode simplificat de disseny, que permeti prescindir del càlcul detallat però que no ens resti fiabilitat. Aquest és el mètode que ara descriurem, anomenat mètode de les corbes- $f$ .

L'aproximació que fa el mètode de les corbes- $f$  consisteix, primerament, a identificar les variables adimensionals importants del sistema tèrmic solar. Tot seguit fa ús de la simulació detallada mitjançant ordinador per trobar correlacions entre aquestes variables i el rendiment mitjà al llarg d'un període de temps perquè siguin aplicables de manera senzilla i directa a la resta de sistemes. Les corbes- $f$  no són res més que la representació gràfica d'aquestes correlacions i la lletra  $f$  fa referència a la fracció de necessitats energètiques que podem cobrir gràcies a l'energia solar.

### 5.2.1 Variables adimensionals del sistema

El balanç energètic global per un període mensual en un sistema solar tèrmic es pot escriure com:

$$Q_{TOT} - L_{TOT} + E = \Delta U \quad (5.5)$$

On  $Q_{TOT}$  és l'energia solar útil total obtinguda durant el mes,  $L_{TOT}$  és la suma de càrregues tèrmiques durant el mes,  $E$  és l'energia auxiliar total requerida durant el mes i  $\Delta U$  és l'intercanvi d'energia en la unitat d'emmagatzematge, que es pot considerar nul davant dels altres valors. Així, l'equació 5.5 es pot escriure com:

$$Q_{TOT} = L_{TOT} - E \quad (5.6)$$

Que podem adimensionalitzar com:

$$f = \frac{L_{TOT} - E}{L_{TOT}} = \frac{Q_{TOT}}{L_{TOT}} \quad (5.7)$$

On  $f$  és la fracció de càrrega tèrmica mensual subministrada per l'energia solar.

L'equació 5.7 no es pot utilitzar directament per calcular  $f$  perquè  $Q_{TOT}$  és una funció complicada de la radiació incident, la temperatura ambient i les pèrdues tèrmiques. Tot i així, considerant els paràmetres dels quals depèn  $Q_{TOT}$ , l'equació 5.7 suggereix que  $f$  es pot relacionar empíricament amb els dos grups adimensionals següents:

$$X = \frac{A_c \cdot F'_R \cdot U_L \cdot (T_{ref} - T_a) \cdot \Delta t}{L_{TOT}} \quad (5.8)$$

$$Y = \frac{A_c \cdot F'_R \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot \bar{H}_T \cdot N_M}{L_{TOT}} \quad (5.9)$$

On  $\Delta t$  és el nombre total de segons d'un mes,  $T_{ref}$  és una temperatura de referència, fixada en 100 °C, i la resta de variables ja són conegudes. Aquests grups adimensionals també tenen el seu significat físic: X expressa la relació entre les pèrdues d'energia del captador i la càrrega tèrmica total mentre que Y expressa la relació entre l'energia absorbida pel captador i la mateixa càrrega. Les equacions 5.8 i 5.9 es poden escriure de nou en una forma lleugerament modificada per conveniència de càlcul com:

$$\frac{X}{A_c} = \frac{F_R U_L \cdot \left( \frac{F'_R}{F_R} \right) \cdot (100 - T_a) \cdot \Delta t}{L_{TOT}} \quad (5.10)$$

$$\frac{Y}{A_c} = \frac{F_R (\tau \alpha) \cdot \left( \frac{F'_R}{F_R} \right) \cdot N_M \cdot \bar{H}_T}{L_{TOT}} \quad (5.11)$$

La fracció  $f$  de la càrrega mensual total subministrada pel sistema solar de calefacció i aigua calenta sanitària es presenta en forma gràfica a la figura 5.1, per al cas de sistemes que utilitzin líquid com a fluid portador de calor, i a la figura 5.2 per al cas de sistemes que utilitzin aire com a fluid portador de calor, i com a funció de les variables adimensionals  $X$  i  $Y$  definides a les equacions 5.8 i 5.9. Aquesta correlació s'ha obtingut a partir de centenars de simulacions en ordinador per un gran nombre de llocs i per un ampli rang de variables de projecte de sistemes realitzables.

Els resultats s'expressen com a un conjunt de corbes- $f$  i la fracció  $f$  d'energia solar mensual aprofitable queda determinada a partir dels valors de  $X$  i  $Y$ , per a cada cas particular, com a intersecció d'aquests valors en el gràfic.

De forma matemàtica, el valor de  $f$ , per *sistemes de líquid*, s'expressa com

$$f = 1,029 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,245 \cdot Y^2 + 0,0018 \cdot X^2 + 0,0215 \cdot Y^3 \quad (5.12)$$

(per a valors de  $Y$  i de  $X$  compresos entre  $0 < Y < 3$  i  $0 < X < 18$ ).

Per a **sistemes d'aire**,  $f$  val

$$f = 1,04 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,159 \cdot Y^2 + 0,00187 \cdot X^2 + 0,0095 \cdot Y^3 \quad (5.13)$$

(per als mateixos valors de  $X$  i  $Y$ :  $0 < Y < 3$  i  $0 < X < 18$ ).

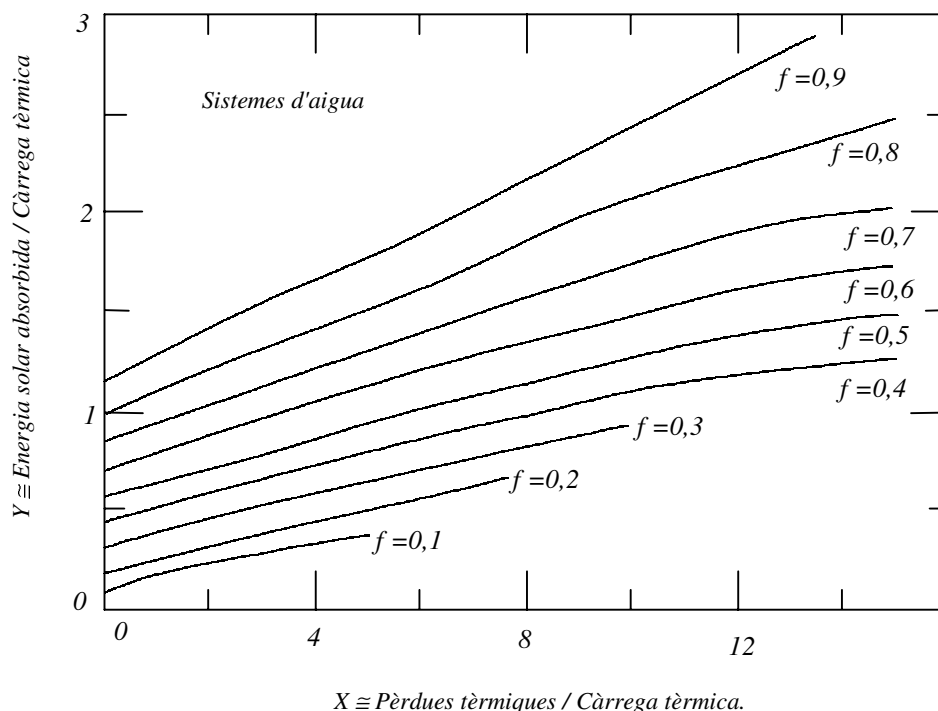


Fig. 5.1 Corbes- $f$  per sistemes d'aigua.

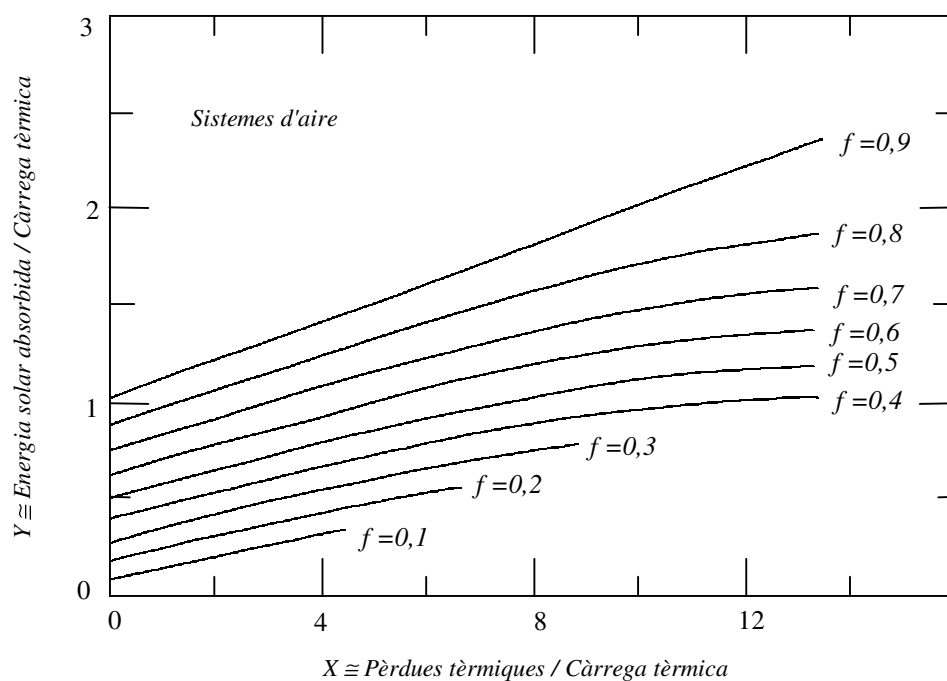


Fig. 5.2 Corbes-f per sistemes d'aire.

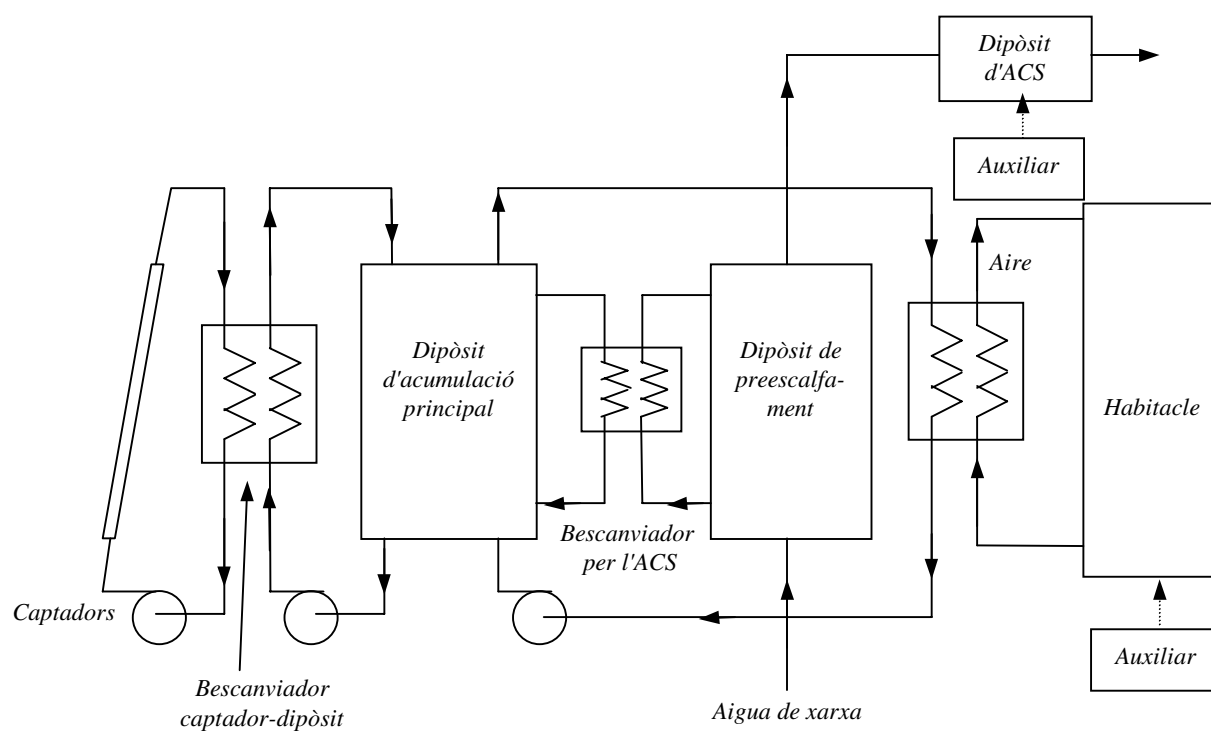


Fig. 5.3 Esquema d'una configuració típica d'un sistema que utilitzi líquid com a sistema de transport energètic.

### 5.2.2 Factors correctors i paràmetres de disseny en sistemes per líquid

El mètode de les corbes- $f$  és aplicable si es mantenen tot un seguit de paràmetres del sistema de càlcul dintre d'uns marges més o menys estrets. Un sistema estàndard que utilitzi transferència de calor mitjançant un medi líquid, com el que es mostra a la figura 5.3, exigeix que els diferents paràmetres que determinen el comportament del sistema, i que hem estudiat al llarg de tot el text, es moguin entre els valors donats per la taula 5.3.

Taula 5.3 Paràmetres de disseny típics pels sistemes que utilitzen líquid com a sistema de transport energètic

<b>Cabal en el primari</b>	0,010 a 0,020 kg/s m <sup>2</sup>
<b>Inclinació del captador (<math>\beta</math>)</b>	$(\phi + 15^\circ) \pm 15^\circ$
<b>Azimut del captador</b>	$0^\circ \pm 15^\circ$
<b>Factor captador-bescanviador</b>	$F_R' / F_R > 0.9$
<b>Capacitat d'emmagatzematge</b>	50 a 100 litres / m <sup>2</sup>

Per a cadascun d'aquests valors, la desviació d'aquests paràmetres de disseny implica l'aplicació d'un factor corrector determinat.

#### a) Cabal circulant

Les corbes- $f$  s'han obtingut amb una circulació de cabal de 0,015 l/s de solució d'aigua i anticongelant per metre quadrat de superfície captadora. Malgrat això, ofereixen un bon comportament amb quasi qualsevol valor entre els rangs 0,01 i 0,02 kg / s·m<sup>2</sup>.

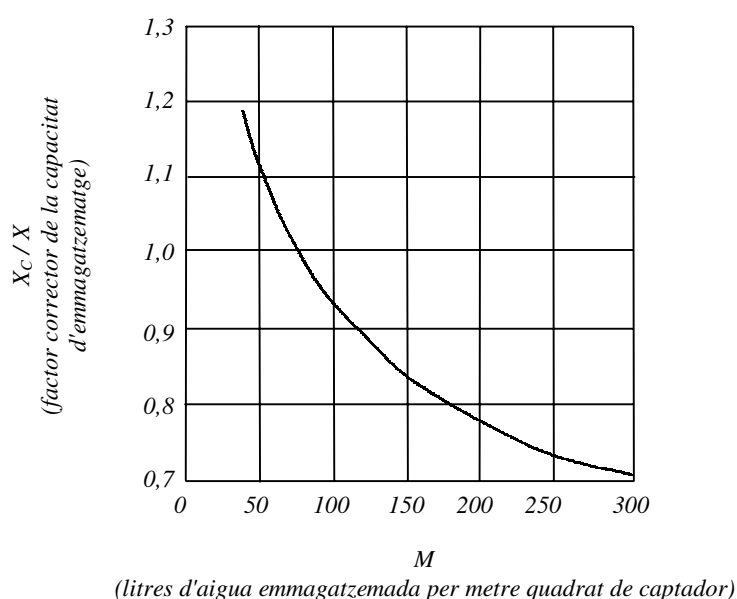


Fig. 5.4 Factor de correcció d'emmagatzematge.

## b) Capacitat d'emmagatzematge

La correcció que cal aplicar en el cas que la capacitat d'emmagatzematge no coincideixi amb els 75 l d'aigua per m<sup>2</sup> de superfície captadora (valor de disseny), ve reflectit per la figura 5.4 i l'equació 5.14:

$$\frac{X_c}{X} = \left( \frac{M}{75} \right)^{-0,25} \quad (5.14)$$

on  $M$  és la capacitat d'emmagatzematge per m<sup>2</sup> de superfície captadora del nostre sistema, diferent als 75 de disseny, i que es pot moure entre 37,5 i 300 l / m<sup>2</sup>.

## 5.2.3 Factors correctors i paràmetres de disseny en sistemes per aire

Similarment al cas anterior, quan parlem de sistemes per aire també hem de tenir en compte els diferents factors correctors que ajusten els nostres sistemes als utilitzats en les correlacions de les corbes-f.

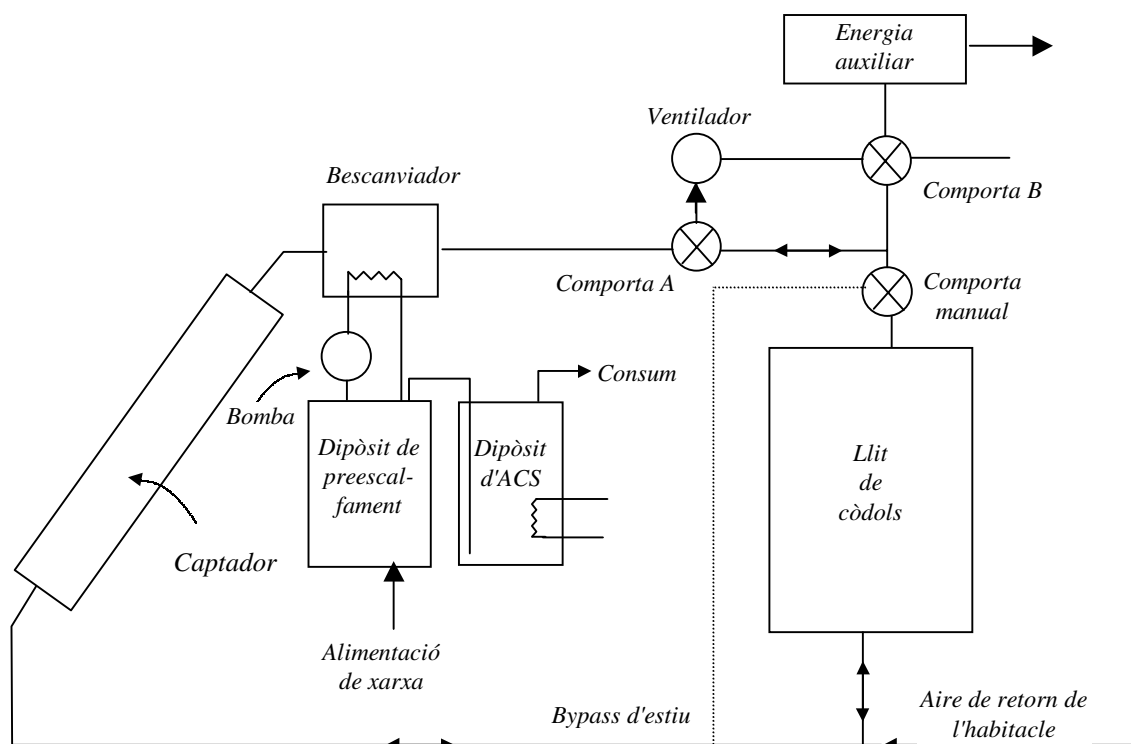


Fig. 5.5 Esquema d'una configuració típica d'un sistema que utilitzi aire com a sistema de transport energètic



Taula 5.4 Paràmetres de disseny típics pels sistemes que utilitzen aire com a sistema de transport energètic.

<b>Cabal en el primari</b>	5 a 20 litres / s m <sup>2</sup>
<b>Inclinació del captador (<math>\beta</math>)</b>	$(\phi + 15^\circ) \pm 15^\circ$
<b>Azimut del captador</b>	$0^\circ \pm 15^\circ$
<b>Capacitat d'emmagatzematge</b>	0,15 a 0,35 m <sup>3</sup> còdols / m <sup>2</sup>
<b>Mida de còdol</b>	0,01 a 0,03 m
<b>Longitud del llit de còdols (direcció del flux)</b>	1,25 a 2,5 m
<b>Caigudes de pressió:</b>	
<b>Llit de còdols</b>	55 Pa mínim
<b>Captadors</b>	50 a 200 Pa
<b>Conductes</b>	10 Pa
<b>Velocitat màxima d'entrada de l'aire al llit de còdols (per a una caiguda de pressió de 55 Pa)</b>	4 m / s

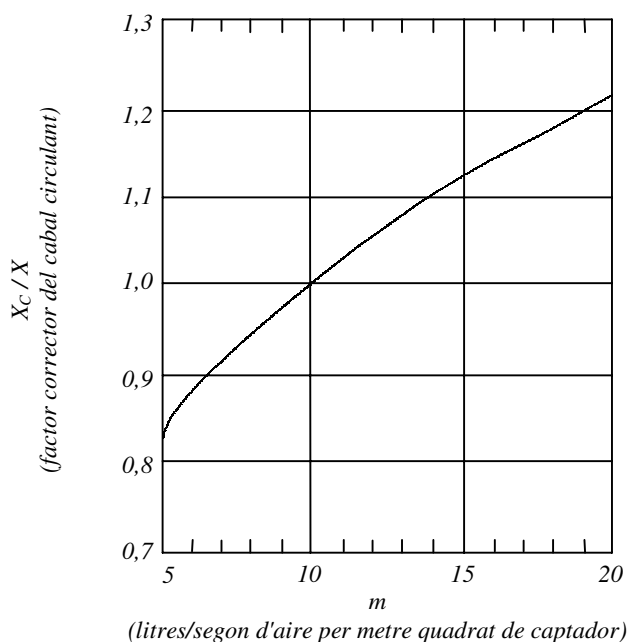


Fig. 5.6 Factor de correcció pel cabal circulant.

## a) Cabal circulant

Per a l'aire sí que cal una correcció quan el nostre sistema utilitza un altre cabal que no sigui 10 litres d'aire per segon i metre quadrat de captador. La correcció que cal aplicar en el cas que el cabal no coincideixi amb els 10 l d'aire per m<sup>2</sup> de superfície captadora (valor de disseny), ve reflectida a la figura 5.6 i l'equació 5.15:

$$\frac{X_c}{X} = \left( \frac{m}{10,1} \right)^{0,28} \quad (5.15)$$

on  $m$  és el cabal circulat per  $\text{m}^2$  de superfície captadora del nostre sistema i que es pot moure entre 5 i 20  $\text{l/s}\cdot\text{m}^2$ .

#### b) Capacitat d'emmagatzematge en llit de còdols

La correcció que cal aplicar en el cas que la capacitat d'emmagatzematge variï dels 0,25 metres cúbics de roca per  $\text{m}^2$  de superfície captadora (valor de disseny), ve reflectit a la figura 5.7 i l'equació 5.16:

$$\frac{X_c}{X} = \left( \frac{V}{0,25} \right)^{-0,3} \quad (5.16)$$

on  $V$  és la capacitat d'emmagatzematge en  $\text{m}^3$  de roca per  $\text{m}^2$  de superfície captadora del nostre sistema, diferent als 0,25 de disseny, i que es pot moure entre 0,125 i 1  $\text{m}^3 / \text{m}^2$ .

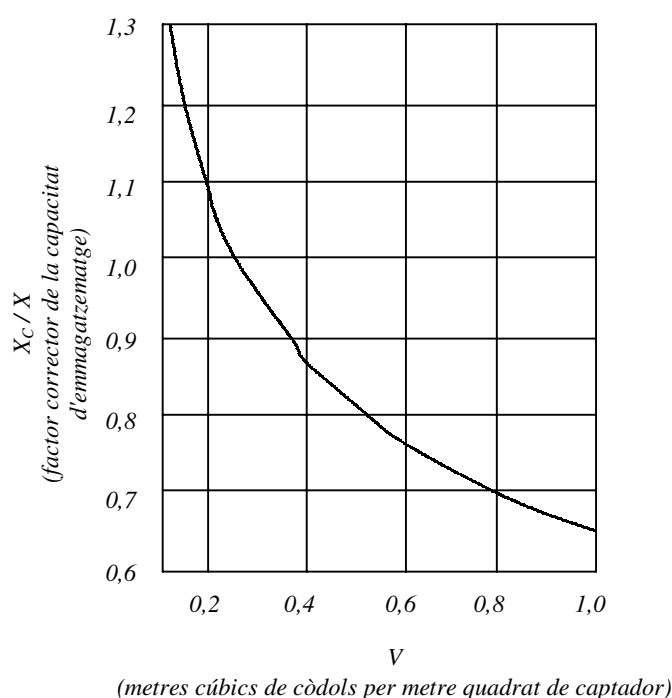


Fig. 5.7 Factor de correcció d'emmagatzematge.

### 5.2.4 Cas particular: escalfament d'ACS només

En el cas particular en què només es vulgui un sistema d'escalfament d'aigua calenta sanitària, el factor corrector que cal aplicar és el següent:

$$\frac{X_C}{X} = \frac{11,6 + 1,18 \cdot T_{ACS} + 3,86 \cdot T_{XARXA} - 2,32 \cdot T_a}{(100 - T_a)} \quad (5.17)$$

Per a tots els casos exposats, els factors correctors calculats amb les expressions anteriors multipliquen l'equació 5.8 (X) per obtenir un valor de X modificat ( $X_C$ ).

#### Exemple 5.2

Determineu, per a l'habitatge de l'exemple 5.1, la fracció d'energia solar que podem obtenir si dissenyem un sistema tèrmic solar per líquid (solució d'anticongelant i aigua) utilitzant captadors plans de la casa Roca i els paràmetres de disseny de les corbes-f.

Dels exemples que hem anat trobant al llarg del text, tindrem els valors següents:

Exemple 3.2  $F_R U_L = 4,9 \text{ (W / } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2\text{)}$

Exemple 4.1  $F_R (\tau \alpha) = 0,784$

$F'_R / F_R = 0,96$

I els resultats dels grups X/A i Y/A per cadascun dels mesos els tenim a la taula següent :

MES	DIES	Segons per mes	$T_a$	$(100 - T_a)$	$L_{TOT} \text{ (MJ/mes)}$ Exemple 5.1	X/A ( $1/\text{m}^2$ ) Eq. 5.10	Ht ( $\text{J/dia} \cdot \text{m}^2$ ) Exemple 2.5	Y/A ( $1/\text{m}^2$ ) Eq. 5.11
G	31	2,68E+06	4,9	95,1	14.100	0,085	1,08E+07	0,018
F	29	2,42E+06	7,2	92,8	10.072	0,105	1,99E+07	0,043
M	31	2,68E+06	11,4	88,6	5.762	0,194	2,03E+07	0,082
A	30	2,59E+06	14,6	85,4	1.592	0,653	2,04E+07	0,289
M	31	2,68E+06	18,3	81,7	1.114	0,925	2,04E+07	0,427
J	30	2,59E+06	21,9	78,1	1.056	0,901	2,12E+07	0,453
J	31	2,68E+06	24,8	75,2	1.068	0,887	2,21E+07	0,483
A	31	2,68E+06	24,6	75,4	1.091	0,871	2,14E+07	0,458
S	30	2,59E+06	21,6	78,4	1.078	0,886	2,00E+07	0,419
O	31	2,68E+06	15,5	84,5	1.137	0,937	1,77E+07	0,363
N	30	2,59E+06	9,5	90,5	7.915	0,139	1,04E+07	0,030
D	31	2,68E+06	5,7	94,3	13.082	0,091	6,58E+06	0,012

Un cop hem obtingut els paràmetres X/A i Y/A, en mitja mensual, calculem per diferents àrees de captador els valors de X i Y. Amb aquests paràmetres calculem la fracció f de càrrega tèrmica mensual que ens vindrà subministrada per l'energia solar a partir de l'equació 5.12:

$$f = 1,029 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,245 \cdot Y^2 + 0,0018 \cdot X^2 + 0,0215 Y^3$$

Aquests valors, multiplicats per la càrrega tèrmica total  $L_{\text{tot}}$  sumats al llarg de l'any per tots els mesos i dividint el resultat finalment per  $L_{\text{tot}}$  una altra vegada, ens proporcionarà la fracció anual d'energia solar per cadascuna de les àrees estudiades. Vegem-ho.

Àrea = 2 m <sup>2</sup>			Fracció d'energia solar (MJ/mes)	Àrea = 4 m <sup>2</sup>			Fracció d'energia solar (MJ/mes)
X	Y	f		X	Y	f	
0,170	0,036	0,025	359	0,340	0,071	0,050	711
0,210	0,086	0,073	739	0,420	0,173	0,143	1.444
0,388	0,164	0,138	793	0,775	0,329	0,263	1.517
1,307	0,579	0,436	694	2,614	1,157	0,738	1.176
1,849	0,855	0,600	668	3,699	1,709	0,935	1.041
1,802	0,907	0,636	672	3,605	1,813	0,978	1.032
1,775	0,965	0,675	721	3,550	1,931	1	1.068
1,742	0,915	0,645	704	3,485	1,830	0,990	1.080
1,772	0,838	0,593	640	3,545	1,676	0,930	1.002
1,875	0,727	0,511	581	3,749	1,453	0,826	938
0,279	0,059	0,042	334	0,557	0,119	0,083	657
0,182	0,023	0,012	160	0,363	0,047	0,024	319
total			7.065	total			11.986
f anual			0,120	f anual			0,203

Àrea = 8 m <sup>2</sup>			Fracció d'energia solar (MJ/mes)	Àrea = 16 m <sup>2</sup>			Fracció d'energia solar (MJ/mes)
X	Y	f		X	Y	f	
0,680	0,143	0,099	1.393	1,360	0,286	0,190	2.673
0,839	0,345	0,273	2.754	1,678	0,690	0,496	5.000
1,551	0,658	0,480	2.768	3,102	1,315	0,794	4.576
5,227	2,314	1	1.592	10,455	4,628	1	1.592
7,398	3,419	1	1.114	14,796	6,837	1	1.114
7,209	3,627	1	1.056	14,419	7,254	1	1.056
7,099	3,861	1	1.068	14,198	7,722	1	1.068
6,970	3,661	1	1.091	13,939	7,322	1	1.091
7,089	3,352	1	1.078	14,179	6,703	1	1.078
7,498	2,907	1	1.137	14,997	5,814	1	1.137
1,114	0,237	0,161	1.270	2,229	0,475	0,300	2.371
0,727	0,094	0,048	630	1,454	0,188	0,094	1.230
total			16.951	total			23.987
f anual			0,287	f anual			0,406

<i>Àrea = 24 m<sup>2</sup></i>			<i>Fracció d'energia solar (MJ/mes)</i>	<i>Àrea = 32 m<sup>2</sup></i>			<i>Fracció d'energia solar (MJ/mes)</i>
<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>f</i>		<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>f</i>	
2,041	0,429	0,273	3.847	2,721	0,572	0,349	4.918
2,517	1,035	0,674	6.790	3,356	1,380	0,812	8.179
4,652	1,973	0,978	5.636	6,203	2,630	1	5.762
15,682	6,942	1	1.592	20,909	9,257	1	1.592
22,193	10,256	1	1.114	29,591	13,675	1	1.114
21,628	10,880	1	1.056	28,837	14,507	1	1.056
21,297	11,584	1	1.068	28,396	15,445	1	1.068
20,909	10,983	1	1.091	27,878	14,644	1	1.091
21,268	10,055	1	1.078	28,357	13,407	1	1.078
22,495	8,721	1	1.137	29,993	11,628	1	1.137
3,343	0,712	0,419	3.317	4,457	0,949	0,520	4.120
2,181	0,282	0,138	1.801	2,908	0,376	0,179	2.345
<b>total</b>			<b>29.527</b>	<b>total</b>			<b>33.460</b>
<b>f anual</b>			<b>0,500</b>	<b>f anual</b>			<b>0,566</b>

<i>Àrea = 50 m<sup>2</sup></i>			<i>Fracció d'energia solar (MJ/mes)</i>	<i>Àrea = 100 m<sup>2</sup></i>			<i>Fracció d'energia solar (MJ/mes)</i>
<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>f</i>		<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>f</i>	
4,251	0,894	0,495	6.985	8,503	1,787	0,757	10.668
5,244	2,156	1	10.111	10,489	4,313	1	10.072
9,692	4,110	1	5.762	19,385	8,220	1	5.762
32,670	14,463	1	1.592	65,341	28,927	1	1.592
46,236	21,367	1	1.114	92,473	42,734	1	1.114
45,058	22,667	1	1.056	90,116	45,335	1	1.056
44,369	24,132	1	1.068	88,738	48,265	1	1.068
43,560	22,881	1	1.091	87,120	45,762	1	1.091
44,308	20,948	1	1.078	88,616	41,896	1	1.078
46,865	18,168	1	1.137	93,729	36,336	1	1.137
6,965	1,483	0,692	5.478	13,930	2,967	0,902	7.137
4,544	0,587	0,266	3.475	9,087	1,174	0,463	6.055
<b>total</b>			<b>39.946</b>	<b>total</b>			<b>47.830</b>
<b>f anual</b>			<b>0,676</b>	<b>f anual</b>			<b>0,810</b>

Els valors de la **fracció solar anual** en forma gràfica i en funció de l'àrea de captador queden reflectits a la figura següent:

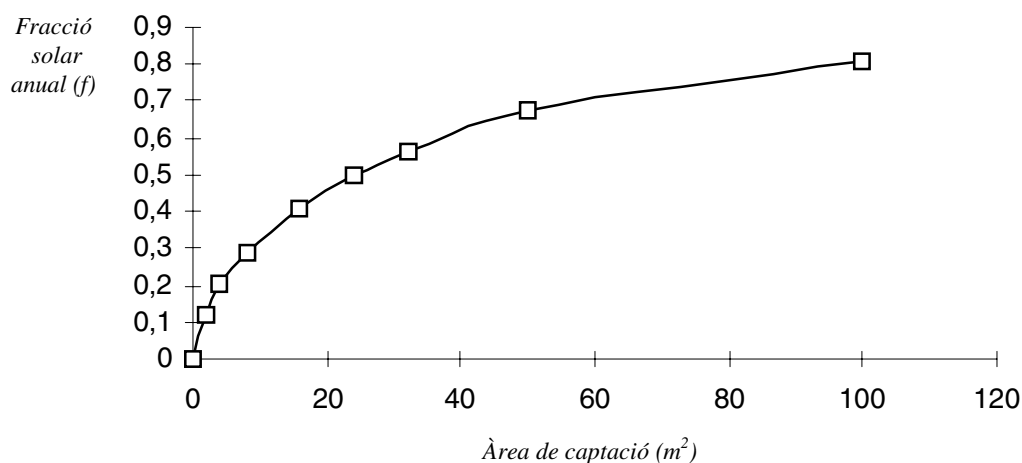


Fig 5.8 Fracció solar anual en funció de l'àrea de captació.

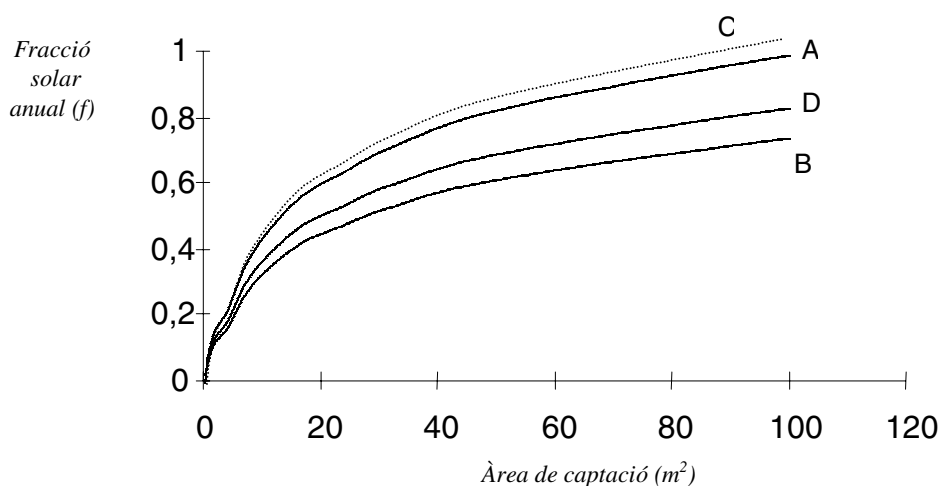


Fig. 5.9 Fracció solar anual en funció de l'àrea de captació per diferents sistemes:

- A – sistema amb captadors de doble coberta i superfície selectiva
- B – sistema amb captadors de coberta única i superfície no selectiva
- C – sistema amb capacitat d'emmagatzematge de  $150 \text{ l/m}^2$
- D – Corba de referència de l'exemple del tema

L'estudi que hem realitzat, és a dir, el de trobar la fracció solar anual en funció de l'àrea de captació, ens permetrà tractar el problema econòmic d'una manera més senzilla (el comportament d'un sistema solar tèrmic és molt més sensible a l'àrea de captació que a cap altra variable que hi entri en joc). De fet, arribar a determinar quina àrea de captació és la més rendible econòmicament i, en conseqüència, quina és la fracció anual d'energia que podrem aprofitar del Sol és el punt final al qual desemboca tota la feina que hem fet al llarg d'aquest camí pel món de l'energia solar tèrmica.

Aquest estudi, a la vegada, permet comparar el comportament de sistemes amb característiques constitutives diferents. La figura 5.9 mostra tres corbes com les del cas anterior però amb alguna petita variació. La corba A és el resultat obtingut per un sistema que utilitza captadors amb doble coberta i superfície selectiva, mentre que la corba B és la d'un sistema amb superfície no selectiva i una única coberta. La corba C seria per a un cas en el qual la capacitat d'emmagatzematge doblés la de càlcul ( $2 \times 75 \text{ l/m}^2 = 150 \text{ l/m}^2$ ). La corba D és la de la figura 5.8.

## Annex al capítol 5

A la taula següent es presenten les dades meteorològiques de 49 localitats espanyoles ordenades alfabèticament pel nom de la ciutat. Les dades inclouen:

$T_a$

$T_a$  temperatura ambient mitjana mensual (en °C)

$DD$  nombre de graus-dia en el mes relatiu a una base de 15 °C (en °C/dia)

$T_{XARXA}$  temperatura de l'aigua de xarxa en mitjana mensual (en °C)

Albacete ( $\phi = 38,92$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	4,2	5,6	9,0	11,6	15,3	20,5	24,1	23,8	19,8	13,7	8,7	5,1
$DD$	334,7	267,5	236,4	157,1	49,6	2,1	0	0	7,6	95,8	209,6	313,3
$T_{XARXA}$	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Alacant ( $\phi = 38,37$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	11,0	11,8	14,0	15,9	19,1	22,7	25,5	26,0	23,7	19,3	15,2	12,1
$DD$	128,6	104,6	87,9	35,7	3,4	0	0	0	0	2,9	33,8	120,5
$T_{XARXA}$	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Almeria ( $\phi = 36,83$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	11,7	12,2	14,1	16,1	18,4	22,0	24,7	25,3	23,4	19,3	15,6	12,8
$DD$	90,8	66,1	44,7	15,8	1,3	0	0	0	0	1,3	19,0	80,0
$T_{XARXA}$	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Àvila ( $\phi = 40,65$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	2,4	3,3	6,3	8,7	12,2	16,4	20,0	19,8	16,3	10,6	6,1	3,3
$DD$	357,4	326,5	316,7	229,7	136,6	35,5	1,2	3,7	37,3	130,5	273,5	388,4
$T_{XARXA}$	4	5	7	9	10	11	12	11	10	9	7	4
Badajoz ( $\phi = 38,88$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	8,7	10,0	12,7	15,3	18,1	22,8	25,9	25,6	22,8	17,8	12,7	9,1
$DD$	213,9	131,2	99,2	18,0	0	0	0	0	0	0	96,0	189,1
$T_{XARXA}$	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Barcelona ( $\phi = 41,40$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	9,5	10,3	12,3	14,6	17,7	21,5	24,3	24,3	21,9	17,6	13,5	10,3
$DD$	215,0	164,0	147,7	87,4	17,7	0,2	0	0	0,8	37,7	115,5	195,0
$T_{XARXA}$	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Bilbao ( $\phi = 43,40$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	8,6	8,7	11,6	12,1	14,6	17,6	19,5	19,7	18,4	15,9	11,8	9,4
$DD$	179,0	151,1	164,4	134,7	50,7	6,7	0,1	0,5	10,2	59,1	137,8	188,4
$T_{XARXA}$	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Burgos ( $\phi = 42,37$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	2,5	3,8	7,1	9,2	12,2	16,2	19,2	18,8	16,2	11,3	6,5	3,4
$DD$	387,0	335,3	328,2	241,1	145,2	50,5	6,8	10,9	52,8	148,7	284,6	392,4
$T_{XARXA}$	4	5	7	9	10	11	12	11	10	9	7	4
Càceres ( $\phi = 39,33$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	7,7	9,0	11,7	14,4	17,4	22,5	26,0	25,6	22,3	16,9	11,7	8,1
$DD$	209,9	180,7	140,6	76,5	32,9	1,0	0	0	1,6	24,9	111,1	246,7
$T_{XARXA}$	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Cadis ( $\phi = 36,47$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	11,4	12,5	14,7	11,6	18,8	22,2	24,4	24,9	23,1	19,5	15,6	12,3
$DD$	80,9	51,7	43,5	15,8	2,3	0	0	0	0	1,5	16,8	80,2
$T_{XARXA}$	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	9
Castelló ( $\phi = 39,98$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	10,6	11,1	13,1	14,9	17,8	21,6	24,3	24,7	22,8	18,5	14,5	11,6
$DD$	124,3	102,3	90,2	40,2	3,4	0	0	0	0	5,0	40,5	118,4
$T_{XARXA}$	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8



C, Real ( $\phi = 38,98$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	5,4	7,3	10,4	12,9	15,9	21,2	25,5	24,8	20,7	14,8	9,3	6,2
$DD$	308,1	241,5	199,3	111,9	41,7	3,1	0	0	3,6	51,4	193,0	322,9
$T_{XARXA}$	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Còrdova ( $\phi = 37,88$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	9,1	10,7	13,5	16,4	19,4	24,4	27,9	27,6	24,3	18,6	13,5	9,6
$DD$	220,0	148,6	117,3	50,6	8,3	0	0	0	0,1	19,5	100,7	203,7
$T_{XARXA}$	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
La Corunya ( $\phi = 43,37$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	9,9	9,8	11,5	12,4	14,0	16,5	18,2	18,9	17,8	15,3	12,4	10,2
$DD$	161,8	152,6	150,1	111,8	62,6	11,2	0,1	0	1,9	28,7	89,8	158,7
$T_{XARXA}$	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Conca ( $\phi = 40,08$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	3,0	4,3	7,3	10,0	13,3	18,1	21,9	21,5	18,0	12,0	7,2	4,1
$DD$	239,1	291,6	264,7	168,0	78,6	11,2	0	0	13,5	89,0	227,2	342,5
$T_{XARXA}$	4	5	7	9	10	11	12	11	10	9	7	4
Girona ( $\phi = 41,38$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	7,3	8,4	11,1	13,4	16,7	20,8	23,5	23,3	20,9	16,1	11,4	8,0
$DD$	231,7	198,5	167,0	91,1	21,3	0,7	0	0	1,7	38,7	132,8	239,7
$T_{XARXA}$	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Granada ( $\phi = 37,18$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	6,5	8,1	11,1	13,5	16,3	21,9	25,5	25,1	21,5	15,8	11,1	7,2
$DD$	257,3	196,0	155,0	69,0	0	0	0	0	0	0	132,0	232,5
$T_{XARXA}$	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Guadalaj, ( $\phi = 40,63$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	8,1	10,4	14,7	17,9	21,5	26,7	31,5	30,5	25,9	18,6	12,1	8,5
$DD$	288,5	241,8	210,0	121,3	46,2	3,0	0	0	5,2	54,0	183,9	294,7
$T_{XARXA}$	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Huelva ( $\phi = 37,25$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	11,2	12,3	14,4	16,6	18,8	22,3	25,1	25,2	23,1	19,4	15,2	11,9
$DD$	91,8	60,3	48,1	16,1	2,3	0	0	0	0	1,3	25,8	99,8
$T_{XARXA}$	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Osca ( $\phi = 42,15$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	4,3	6,1	9,7	12,4	15,9	19,9	22,8	22,5	19,3	14,1	8,9	5,4
$DD$	314,0	244,9	202,3	121,1	42,2	4,4	0	0,1	6,8	57,8	182,4	324,6
$T_{XARXA}$	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Jaén ( $\phi = 37,77$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	8,1	9,5	12,3	14,9	18,4	27,8	27,7	27,3	23,4	17,6	12,7	8,9
$DD$	188,0	146,0	119,0	54,0	17,0	0	0	0	0	16,0	91,0	179,0
$T_{XARXA}$	8	9	11	13	14	15	17	16	14	13	11	7
Lleó ( $\phi = 42,58$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	2,8	4,2	7,6	9,9	12,5	17,2	19,7	19,5	16,6	11,8	7,0	3,6
$DD$	403,0	333,2	29,76	20,40	80,6	0	0	0	0	16,43	29,10	36,89
$T_{XARXA}$	4	5	7	9	10	11	12	11	10	9	7	4
Lleida ( $\phi = 41,62$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	4,9	7,2	11,4	14,6	18,3	21,9	24,8	24,6	21,6	15,5	9,5	5,7
$DD$	300,3	204,4	156,8	74,5	14,3	0,2	0	0	2,0	41,0	174,2	302,4
$T_{XARXA}$	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Logroño ( $\phi = 42,45$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$T_a$	5,1	6,5	9,7	11,9	14,9	19,1	21,8	21,5	19,0	13,8	8,9	6,1
$DD$	288,1	230,3	203,5	143,3	50,7	8,2	0	0,3	14,3	93,1	190,0	284,6
$T_{XARXA}$	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6

Lugo ( $\phi = 43,10$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	6,0	6,7	9,3	11,0	13,0	16,2	18,1	18,7	16,8	13,1	8,9	6,2
	DD	328,0	263,5	263,5	204,0	74,4	0	0	0	0	114,7	128,0	291,5
	T <sub>XARXA</sub>	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Madrid ( $\phi = 40,42$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	5,0	6,6	10,0	12,7	15,8	20,6	24,2	23,7	19,8	14,0	9,0	5,6
	DD	321,7	246,4	208,1	122,9	41,1	2,0	0	0	7,8	86,0	209,1	309,8
	T <sub>XARXA</sub>	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Málaga ( $\phi = 36,85$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	11,8	12,6	14,6	16,2	19,1	22,6	24,9	25,4	23,0	19,3	15,8	12,9
	DD	126,0	88,8	75,2	36,3	2,2	0	0	0	0	5,8	37,5	103,5
	T <sub>XARXA</sub>	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Múrcia ( $\phi = 37,98$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	9,5	10,7	13,3	15,1	18,7	22,7	25,7	26,1	23,4	18,5	14,0	10,7
	DD	175,5	130,2	99,1	46,8	7,0	0	0	0	0	12,9	64,6	166,5
	T <sub>XARXA</sub>	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Orense ( $\phi = 42,33$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	7,0	8,1	11,0	12,6	16,4	19,2	21,7	19,9	17,7	16,2	9,7	7,4
	DD	244,9	168,0	136,4	57,0	0	0	0	0	0	0	141,0	220,1
	T <sub>XARXA</sub>	5	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Oviedo ( $\phi = 43,35$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	7,2	8,1	9,2	10,4	13,5	15,9	15,8	18,4	16,9	13,8	9,9	8,3
	DD	244,0	192,9	205,4	176,2	100,2	26,4	3,1	3,5	19,7	89,9	167,8	232,7
	T <sub>XARXA</sub>	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Palència ( $\phi = 42,00$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	3,3	4,6	8,2	10,5	13,5	18,1	21,0	20,8	17,6	12,2	7,2	3,9
	DD	340,6	276,8	260,9	171,9	90,6	18,2	0,5	1,5	18,3	79,2	211,5	338,6
	T <sub>XARXA</sub>	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Palma M. ( $\phi = 39,57$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	10,1	10,5	12,2	14,5	17,3	21,4	24,0	24,5	22,6	18,4	14,3	11,5
	DD	185,2	153,2	139,8	92,1	14,6	0,2	0	0	0,1	21,9	89,8	147,3
	T <sub>XARXA</sub>	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Las Palmas ( $\phi = 28,15$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	16,8	17,0	17,7	18,5	19,6	21,2	22,9	23,6	23,3	22,3	20,2	17,8
	DD	0,9	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
	T <sub>XARXA</sub>	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Pamplona ( $\phi = 42,85$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	4,6	5,4	9,0	11,1	14,4	17,8	20,2	20,6	18,3	13,4	8,2	5,1
	DD	290,0	252,0	235,0	153,0	71,0	18,0	1,0	1,0	16,0	64,0	194,0	30,8
	T <sub>XARXA</sub>	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Pontevedra ( $\phi = 42,43$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	9,2	10,1	12,3	14,2	15,6	18,6	20,1	20,5	18,2	14,9	11,9	9,5
	DD	146,0	121,4	101,0	55,6	23,5	1,5	0	0	2,4	15,8	75,9	151,6
	T <sub>XARXA</sub>	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Salamanca ( $\phi = 40,93$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	3,7	4,9	8,2	10,5	13,6	18,4	21,5	21,3	18,1	12,5	7,5	4,3
	DD	369,7	301,9	278,6	177,3	94,8	14,2	0,2	0,8	26,3	117,7	263,8	387,0
	T <sub>XARXA</sub>	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Tenerife ( $\phi = 28,47$ )	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	17,4	17,5	18,2	19,2	20,4	22,2	24,3	24,7	24,1	22,7	20,5	18,4
	DD	1,9	2,3	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	T <sub>XARXA</sub>	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8

S, Sebastià (φ= 43,32)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	7,7	8,0	10,7	11,8	13,4	16,7	18,4	18,9	18,1	14,6	10,9	8,0
	DD	207,7	179,2	142,6	99,0	6,2	0	0	0	0	111,0	167,4	
	T <sub>XARXA</sub>	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Santander (φ = 43,47)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	9,3	9,2	11,5	12,3	14,2	16,9	18,8	19,3	18,2	15,3	12,2	9,9
	DD	171,4	148,1	157,7	128,1	52,8	6,9	0	0	5,9	47,7	98,8	167,3
	T <sub>XARXA</sub>	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Saragossa (φ = 41,50)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	6,1	7,7	11,3	13,7	17,0	21,2	23,9	23,7	20,6	15,4	10,2	6,8
	DD	285,3	221,5	186,8	49,4	26,4	0,8	0	0	3,3	51,7	175,6	285,8
	T <sub>XARXA</sub>	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Segòvia (φ = 40,95)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	2,4	4,0	7,6	10,1	13,2	18,2	21,7	21,3	17,5	11,8	6,6	3,1
	DD	334,4	292,8	275,4	185,6	97,1	18,3	0,4	1,1	22,8	97,6	238,9	266,7
	T <sub>XARXA</sub>	4	5	7	9	10	11	12	11	10	9	7	4
Sevilla (φ = 37,41)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	10,3	11,6	14,1	16,4	19,1	23,4	26,3	26,4	23,7	19,2	14,6	11,0
	DD	157,3	102,3	69,9	25,2	3,9	0	0	0	0	5,5	53,9	161,8
	T <sub>XARXA</sub>	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Sòria (φ = 41,77)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	2,3	3,5	6,6	8,9	11,9	16,5	19,6	19,5	16,4	11,0	6,2	3,1
	DD	368,3	323,6	311,1	220,8	124,7	33,8	2,4	3,1	35,3	122,9	266,4	379,8
	T <sub>XARXA</sub>	4	5	7	9	10	11	12	11	10	9	7	4
Tarragona (φ = 41,42)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	8,9	10,0	11,7	13,7	16,7	20,3	23,0	23,2	21,7	17,7	13,3	10,3
	DD	187,2	146,7	133,5	66,8	13,7	0,4	0	0	0,7	18,7	100,0	178,2
	T <sub>XARXA</sub>	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Terol (φ = 40,92)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	5	6	9	12	16	20	23	24	19	14	9	6
	DD	350,0	263,0	267,0	184,0	82,0	12,0	1,0	2,0	18,0	113,0	256,0	324,0
	T <sub>XARXA</sub>	4	5	7	9	10	11	12	11	10	9	7	4
Toledo (φ = 39,85)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	5,9	7,3	10,6	13,4	16,9	22,1	26,1	25,3	21,3	11,2	9,9	6,4
	DD	265,4	208,0	176,7	91,1	29,5	1,5	0	0	2,0	37,2	155,5	284,0
	T <sub>XARXA</sub>	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
València (φ = 39,46)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	10,3	10,9	13,1	14,8	17,8	21,3	23,9	24,5	22,4	18,3	14,4	11,1
	DD	176,2	132,2	115,8	49,9	4,6	0	0	0	0,1	11,0	72,7	175,3
	T <sub>XARXA</sub>	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Valladolid (φ = 41,65)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	3,5	5,1	8,7	10,9	14,0	18,5	21,3	20,8	17,9	12,8	7,7	4,3
	DD	368,6	278,9	250,3	170,3	73,7	10,6	0,2	0,9	22,9	131,7	251,2	361,2
	T <sub>XARXA</sub>	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Vitòria (φ = 42,85)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T <sub>a</sub>	4,5	5,3	8,7	10,4	13,1	16,7	18,9	19,3	17,2	12,7	8,3	5,5
	DD	309,7	269,5	260,6	186,5	95,9	31,8	3,3	3,4	28,8	92,4	217,0	323,8
	T <sub>YARVA</sub>	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5

## 6 Anàlisi econòmica dels sistemes fototèrmics

L'objectiu fonamental de qualsevol projecte que intenti integrar l'energia solar com a sistema alternatiu d'energia és arribar a conèixer la rendibilitat del projecte. És a dir, cal veure si la instal·lació que volem construir resulta econòmicament rendible per amortitzar-la en molt menys temps que el període de vida útil de qualsevol d'aquestes instal·lacions, que s'acostuma a fixar en uns vint anys (a molt estirar).

En aquest capítol veurem quines són les eines econòmiques que ens permeten avaluar la viabilitat econòmica d'un projecte d'energia solar tèrmica i estudiarem dos dels criteris més utilitzats: el criteri de *l'estalvi solar* i el del *temps d'amortització*. Ambdós criteris ens poden ajudar a dimensionar el nostre sistema de manera prou correcta.

### 6.1 Conceptes d'anàlisi econòmica

Els criteris econòmics proposats per avaluar i optimitzar els sistemes d'energia solar són de molts tipus i no hi ha un comú acord generalitzat sobre quin d'ells s'ha d'utilitzar. En general, tots els criteris econòmics que exposarem a continuació no són exclusius de sistemes amb energia solar, sinó que es poden generalitzar per comparar i avaluar qualsevol tipus de projecte que impliqui una despesa econòmica.

*Criteri de l'energia solar de menys cost*

Com el seu nom indica, aquest criteri s'utilitza en els casos en què l'energia solar és l'única font d'energia per utilitzar. El sistema que ens proporcioni el cost d'operació i manteniment mínim al llarg de la vida del sistema utilitzant només energia solar serà l'afavorit.

*Criteri del cost del cicle de vida*

En general, i quan es tracta de sistemes solars amb energia alternativa de suport, s'utilitza el criteri del cost del cicle de vida. Aquest criteri es basa en la suma de totes les despeses associades al sistema energètic al llarg de tota la seva vida o període d'anàlisi seleccionat en valor monetari actual o present, és a dir, tenint en compte el valor del diner en el temps. Així doncs, aquest criteri té en compte valors com l'IPC, l'interès de deute bancari, etc.

*Criteri del temps d'amortització*

El temps d'amortització es pot definir de múltiples maneres però potser la més usual és el temps necessari perquè l'estalvi en combustible acumulat al llarg d'un temps iguali la inversió total inicial. Això és el temps que ha de passar fins que recuperi la inversió en forma de combustible estalviat.

*Criteri de la taxa de rendibilitat interna*

Aquest criteri (conegut com *TIR*), estableix la taxa mínima a partir de la qual el projecte no dóna ni pèrdues ni beneficis. No es tracta en aquest capítol, però és un tractament particular del concepte de valor actual net (*VAN*).

### 6.1.1 Un concepte fonamental: el valor del diner en el temps

El temps és sovint un factor que escapa al nostre control. Tot i així, la majoria dels criteris anteriors es basen en les operacions de valor del diner en el temps. De fet, el concepte de *valor del diner en el temps* és fonamental en la comparació dels rendiments econòmics d'alternatives de disseny. El diner es veu afectat pel pas del temps o bé augmentant (*revalorització*) o bé disminuint de valor (*depreciació*), de manera que un pagament d'una suma  $X$  de diners avui no serà la mateixa que la d'aquí a un any. Aquesta variabilitat en el temps del valor del diner la fixa *l'interès*.

La pràctica de carregar interessos es remunta quasi al començament de la història escrita i avui és un principi establert que acceptem sense apreciar-ne plenament el potencial ni les conseqüències. En el nostre entorn econòmic, el capital és el recurs bàsic, que ens permet satisfer necessitats, adquirir béns de producció i convertir-los en béns de consum o serveis, etc. Des del punt de vista del *prestamista* (qui deixa els diners), el capital és un recurs fluid; el pot gastar en béns que donin un benefici o una satisfacció personal; el pot guardar o regalar; el pot, també, prestar. Si el presta, esperarà normalment algun tipus de compensació. La seva compensació és l'interès. L'interès compensa les despeses administratives de la realització del préstec, el risc que el préstec no sigui reemborsat i la pèrdua dels guanys que s'haguessin obtingut d'haver utilitzat els diners per a altres finalitats.

Des del punt de vista del *prestatar* (qui accepta diners d'altri en concepte de préstec), el préstec representa una oportunitat de realitzar un projecte que d'una altra manera hauria d'haver-se posposat. L'interès és, en aquest cas, la prima pagada per evitar l'espera en la utilització del diner.

### 6.1.2 Interès i inflació

En considerar el valor del diner en el temps, és convenient representar matemàticament la relació entre el valor actual o **present** d'una suma de diners i el seu valor **futur**. Mesurant el temps en anys, si una sola suma de diners té un valor actual o present de  $P$ , el seu valor en  $n$  anys serà igual a:

$$F_n = P + I_n \quad (6.1)$$

on  $F_n$  és el futur de  $P$ , és a dir, el valor acumulat de  $P$  durant  $n$  anys, i  $I_n$  és l'increment del valor de  $P$  durant  $n$  anys.  $I_n$  es coneix com l'interès acumulat en les transaccions de préstec i és una funció de  $P$ ,  $n$  i la *taxa d'interès anual*,  $i$ . La taxa d'interès anual es defineix com el canvi de valor d'una unitat monetària durant el període d'un any.

Amb els anys s'han establert dues maneres de calcular  $I_n$ . La primera considera  $I_n$  com una funció lineal del temps: donat que  $i$  és el coeficient de canvi durant un període d'un any, s'afirma que  $P$  canvia de valor en una quantitat  $P \cdot i$  cada any. Per tant, es dedueix que  $I_n$  és el producte de  $P$ ,  $i$  i  $n$ :

$$I_n = P \cdot i \cdot n \quad (6.2)$$

$$F_n = P \cdot (1 + i \cdot n) \quad (6.3)$$

Aquesta forma de càlcul es coneix com *interès simple*.

La segona manera utilitzada pel càlcul del valor de  $I_n$  és interpretar  $i$  com el *coeficient de canvi en el valor acumulat del diner*. Per tant, s'afirma que es verifiquen les relacions següents:

$$I_n = i \cdot F_{n-1} \quad (6.4)$$

i

$$F_n = F_{n-1} \cdot (1 + i) \quad (6.5)$$

Forma de càlcul que es coneix com *interès compost*.

Actualment, quasi totes les transaccions monetàries es basen en taxes d'interès compost, per això, quan es parla d'interès ja es pressuposa que es parla d'interès compost si no s'indica el contrari.

Quan en comptes d'un any calgui modelar perfils de flux al llarg de més anys, el càlcul es pot fer any rere any o de cop: si considerem la inversió d'una sola suma de diners  $P$  en un compte bancari durant  $n$  períodes d'interès, el valor  $F$  acumulat a la fi dels  $n$  períodes d'interès (suposant que no retirem diners en cap moment) valdrà:

$$F_n = P \cdot (1 + i)^n \quad (6.6)$$

La quantitat  $(1 + i)^n$  es coneix com a *factor de capitalització*.

### Exemple 6.1

Un individu rep en préstec 1.000 euros al 6% d'interès compost anual. El préstec es reemborsarà després de cinc anys. Quant caldrà pagar llavors suposant que la taxa d'interès no sigui revisada?

Utilitzant l'equació 6.6 tindrem

$$F_n = P \cdot (1 + i)^n = 1.000 \cdot (1 + 0,06)^5 = 1338,20$$

La quantitat que caldrà reemborsar serà de 1.338.20 . (Nota: Comproveu que si fem l'operació pas per pas mitjançant l'equació 6.5 obtenim el mateix resultat)

També podem determinar valors de  $P$  quan es tenen valors de  $F$ ,  $n$  i  $i$  de forma senzilla mitjançant l'equació:

$$P = F_n \cdot (1 + i)^{-n} \quad (6.7)$$

On la quantitat  $(1+i)^{-n}$  es coneix com a *factor del valor actual d'una imposició*.

### Exemple 6.2

*Volem acumular 2.000 en un compte d'estalvi per d'aquí a 2 anys. Si el compte paga una taxa d'interès compost anual del 6%, quina quantitat ens caldrà dipositar avui?*

Utilitzant l'equació 6.7 tindrem

$$P = F_n \cdot (1+i)^{-n} = 2.000 \cdot (1+0,06)^{-2} = 1.780$$

*La quantitat que caldrà dipositar serà de 1.780 .*

De la mateixa manera que hi ha un concepte com el de l'interès i que afecta el moviment del diner, també hi ha un concepte (estadísticament el més utilitzat en els mitjans de comunicació, més, fins i tot, que el de l'atur) que afecta el preu dels béns adquirits i que rep el nom *d'inflació*. La inflació es defineix com l'increment generalitzat i persistent dels preus de les mercaderies i dels serveis, que implica, per tant, una reducció del poder adquisitiu del diner. No hi ha una única idea clara sobre els seus mecanismes d'activació. Teòricament la inflació pot venir donada per tres motius que l'expliquen per si sols però que sovint coexisteixen: un, per l'excés de la demanda sobre l'oferta; dos, per l'augment dels costos i, sobretot, dels salaris; i tres, per les característiques estructurals de cada economia, la desproporció de recursos i les formes de desenvolupament. De fet, és un producte del sistema de lliure comerç amb el qual s'ha de conviure.

Així doncs, totes les despeses associades a una activitat econòmica poden quedar afectades pel procés inflacionista (o deflacionista). En aquest cas, una despesa de valor present  $P$  afectada per una inflació  $d$ , prendrà el valor futur  $F$  que ens dóna l'equació següent:

$$F_n = P \cdot (1+d)^{n-1} \quad (6.8)$$

### Exemple 6.3

*Una despesa que actualment és d'1 es veu afectada per un procés inflacionista del 3% anual. Quin serà el valor d'aquesta despesa d'aquí a cinc anys si la inflació es manté constant en aquest temps?*

Utilitzant l'equació 6.8 tindrem

$$F_n = P \cdot (1+d)^{n-1} = 1 \cdot (1+0,03)^{5-1} = 1,125$$

*El que actualment es pot adquirir per 1 , s'adquirirà, d'aquí a cinc anys, per 1,125 euros. La despesa, doncs, es veu inflada en 0,125 .*

Les equacions 6.7 i 6.8 es poden combinar per trobar el valor present d'una despesa  $A$  donada. A la fi del període  $n$ , la despesa, afectada per la inflació, serà de  $A \cdot (1 + d)^{n-1}$ , i el valor present d'aquesta despesa, entenent-la com a capital a retornar en concepte de préstec amb un interès bancari de  $i$ , serà:

$$P = \frac{F_n}{(1+i)^n} = \frac{A \cdot (1+d)^{n-1}}{(1+i)^n} \quad (6.9)$$

Aquesta última equació, així com els exemples i l'anàlisi de tot aquest tema, es basen en la suposició que els pagaments o despeses es fan a la fi de cada període de temps i el valor present resultant ve donat al principi del primer període de temps. Si una despesa  $A$  és coneguda i desemborsada al principi del període, l'equació 6.9 queda com

$$P = \frac{A' \cdot (1+d)^n}{(1+i)^n} = A' \cdot \left( \frac{1+d}{1+i} \right)^n \quad (6.10)$$

No hi ha cap problema fonamental amb qualsevol de les dues definicions mentre s'especifiquin clarament les hipòtesis de sortida.

### 6.1.3 Sèries de fluxos d'efectiu

En tots els casos anteriors teníem un *únic* valor monetari que volíem actualitzar en el present o en el futur. Però què passa quan tenim un seguit de pagaments que hem d'anar fent al final de períodes de temps determinats. És a dir, què passa quan tenim *sèries de fluxos d'efectiu*. En aquests cas ens podem trobar amb tres situacions:

#### a) Sèrie uniforme de fluxos d'efectiu

Quan la magnitud d'un flux d'efectiu (ingrés o despesa), es manté constant al llarg del temps. En aquest cas, l'equivalent en valor actual és:

$$P = \sum_{k=1}^n A(1+i)^{-k} \rightarrow P = A \cdot \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (6.11)$$

On  $A$  és la magnitud d'un flux d'efectiu individual de la sèrie (perquè tots són iguals) i la resta és coneguda.

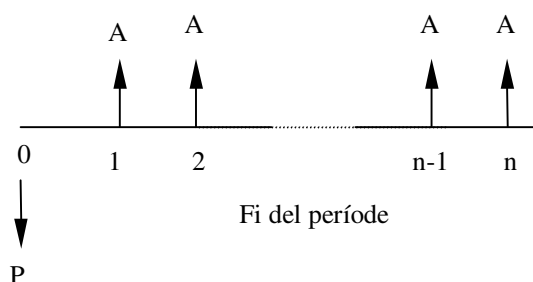


Fig. 6.1 Diagrama de flux d'efectiu per a una sèrie de tipus uniforme.



## b) Sèrie de fluxos d'efectiu tipus gradient

Quan cada flux d'efectiu augmenta en una quantitat  $G$  constant, l'expressió del valor present del següent de sèries de fluxos d'efectiu pren la forma següent:

$$P = \sum_{k=1}^n (k-1) G (1+i)^{-k} \rightarrow P = G \left[ \frac{1 - (1+ni)(1+i)^{-n}}{i^2} \right] \quad (6.12)$$

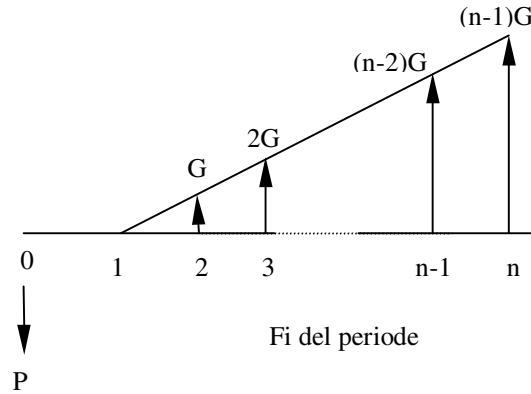


Fig. 6.2 Diagrama de flux d'efectiu per una sèrie tipus gradient.

## c) Sèrie geomètrica de fluxos d'efectiu

La sèrie geomètrica de fluxos d'efectiu s'origina quan augmenta o disminueix la magnitud del flux d'efectiu en un *percentatge* fix d'un període al següent. S'utilitza sempre que cal representar la variació de despeses o ingressos degut a la *inflació* o *recessió* que estudiàvem a l'apartat anterior. Si l'obligació d'aquest pagament  $A$  esdevé cada any i  $d$  designa aquest canvi percentual en la magnitud del flux d'efectiu, el valor present actual de *tota* la sèrie de pagaments fets fins a  $n$  anys s'obté a partir de l'expressió del sumatori pels  $n$  períodes establerts de la manera següent:

$$P = \sum_{k=1}^n A \frac{(1+d)^{k-1}}{(1+i)^k} = A \cdot P(n, d, i) = A \cdot \begin{cases} \frac{1}{(i-d)} \left[ 1 - \left( \frac{1+d}{1+i} \right)^n \right] & \text{si } i \neq d \\ \frac{n}{1+d} & \text{si } i = d \end{cases} \quad (6.13)$$

Fixem-nos com utilitzant l'equació 6.13, però donant ara un valor nul a  $d$ , obtenim l'equació 6.11, corresponent a una sèrie uniforme de fluxos d'efectiu:

$$P = A \cdot P(n, 0, i) = A \cdot \frac{1}{(i-0)} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1+0}{1+i} \right)^n \right] = A \cdot \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right]$$

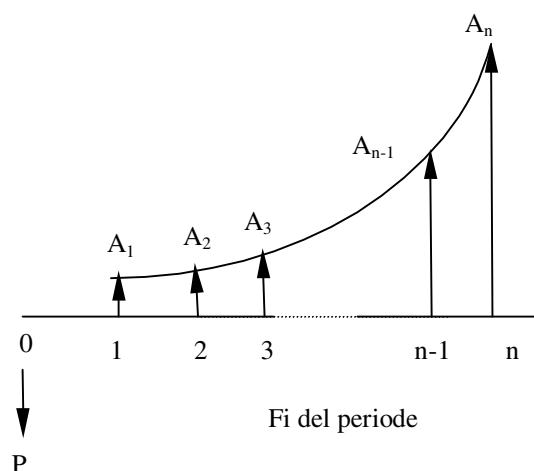


Fig. 6.3 Diagrama de flux d'efectiu per una sèrie geomètrica.

**Exemple 6.4**

Quina seria la despesa acumulada, amb data d'avui, del pagament de 20 anualitats de combustible de 100.000 pessetes si la inflació del combustible és del 10% i la taxa d'interès del mercat és del 8%?

L'equació 6.12 ens dona el factor de valor actual com

$$P(n, i, d) = \frac{1}{(d - i)} \left[ 1 - \left( \frac{1 + d}{1 + i} \right)^N \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow P(20, 0,1, 0,08) = \frac{1}{0,08 - 0,1} \left[ 1 - \left( \frac{1 + 0,1}{1 + 0,08} \right)^{20} \right] = 22,169$$

Cosa que implica que amb data d'avui hauríem de fer una provisió de

$$100.000 \cdot 22,169 = 2.216.900 \text{ pessetes}$$

(si totes les taxes es mantinguessin igual i no hi ha hagués cap revisió).

El valor present d'una sèrie de fluxos d'efectiu definit a l'equació anterior es pot utilitzar també per trobar el valor del pagament d'un préstec a interès fix que inclogui un seguit de pagaments constants al llarg de la vida del préstec. Considerant que tots els pagaments siguin constants, tenim un seguit de pagaments amb una depreciació del diner nul·la (inflació zero). El valor de l'interès en l'equació anterior es converteix en l'interès de l'hipoteca i el pagament anual queda com:

$$\text{Pagament anual} = \frac{\text{Valor de la hipoteca}}{P(n, 0, i)} \quad (6.14)$$

On  $i$  és ara l'interès de la hipoteca,  $n$  és la durada de la hipoteca i al numerador tenim el *principal* de la hipoteca (valor pel qual es demana).

**Exemple 6.5**

Hem trobat un banc que ens contracta una hipoteca amb un interès del 3,5% el primer any. Quin seria el pagament mensual que s'hauria d'efectuar fins a la primera revisió anual si demanem una hipoteca de 10.000.000 pessetes a 25 anys?

L'equació 6.14 es pot utilitzar per trobar el pagament anual uniforme d'un préstec dividint el principal del préstec (valor pel qual es demana la hipoteca) per la funció  $P(n,0,i)$  on  $i$  és ara l'interès de l'hipoteca i  $n$  és el nombre d'anys. D'una banda tindrem

$$P(n,0,i) = \frac{1}{(i)} \left[ 1 - \left( \frac{1}{1+i} \right)^n \right] = P(25,0,0,035) = \frac{1}{0,035} \left[ 1 - \left( \frac{1}{1+0,035} \right)^{25} \right] = 16,481$$

I de l'altre, el pagament anual serà de

$$\text{Pagament anual} = \frac{\text{Valor de la hipoteca}}{P(n,0,i)} = \frac{10.000.000}{16,481} = 606.740 \text{ ptes.}$$

cosa que implicarà un pagament mensual de

$$\text{Pagament mensual} = \frac{606.740}{12} = 50.562 \text{ ptes.}$$

Fixem-nos com la despesa que finalment tindríem (sense cap mena de revisió entremig) seria de

$$\text{Pagament total} = 606.740 \frac{\text{ptes.}}{\text{any}} \cdot 25 \text{ anys} = 15.168.500 \text{ ptes.}$$

Valor que ens portaria a pagar uns interessos de:

$$\text{Interessos} = 15.168.500 - 10.000.000 = 5.168.500 \text{ ptes. (!)}$$

**6.2 Anàlisi econòmica dels sistemes fototèrmics**

Els sistemes fototèrmics es caracteritzen generalment per unes *elevades despeses inicials* però molt *baixes despeses de funcionament*. En conseqüència, l'anàlisi econòmica que cal fer es basa en la comparació de la despesa inicial coneguda amb les despeses estimades de funcionament en el futur al llarg de la vida de la instal·lació. Aquest procés de comparació passa per tenir en compte factors com l'interès del diner en préstec, les taxes i els impostos que cal pagar, la revalorització de l'equip, el manteniment, l'assegurança, el combustible consumit, etc. Tot això amb l'objectiu d'arribar a determinar la dimensió que per al nostre sistema solar ens proporcioni la millor combinació entre energia solar i energia auxiliar però al mínim cost possible.



De manera directa, si volem avaluar l'estalvi energètic d'una instal·lació solar en relació amb una de convencional, la decisió econòmica es pot prendre comparant el cost del cicle de vida en cada cas mitjançant el concepte de l'estalvi solar definit com

$$\text{Estalvi solar} = \text{Cost energètic anual d'una instal·lació convencional} - \text{Cost energètic anual d'una instal·lació solar} \quad (6.17)$$

En aquesta equació no és necessària l'avaluació de les despeses comunes en ambdós sistemes, solar i convencional (caldera i una bona part de canonades i bombes, p. ex.). Només cal estimar el sobrecost de la instal·lació solar. L'equació 6.17 es pot escriure com

$$\begin{aligned} \text{Estalvi solar} = & \text{Estalvi en el combustible} - \text{Increment en el pagament del préstec} - \text{Increment en el pagament del manteniment i l'assegurança} - \text{Increment en el pagament de l'energia paràsita} - \text{Increment en els impostos de la propietat} + \text{Desgravacions fiscals} \end{aligned} \quad (6.18)$$

El criteri de l'estalvi solar és senzillament el criteri del cost del cicle de vida aplicat per duplicat a una instal·lació solar i a una de convencional, que ens proporcionés la mateixa quantitat d'energia que la primera: la diferència entre ambdós costos serà l'estalvi que ens proporciona l'energia solar i que de forma qualitativa ens mostra l'equació 6.18. Quantifiquem-ne ara cada un dels termes.

#### a) Estalvi en el combustible

El combustible anual estalviat amb preu actualitzat es pot quantificar a partir de l'equació següent:

$$f_{\text{anual}} \cdot L_{\text{TOT}} \cdot \frac{\text{preu del combustible}}{PCI \cdot \eta_{\text{caldera}}} \cdot P(n, d, i) \quad (6.19)$$

El producte  $f_{\text{anual}} \cdot L_{\text{TOT}}$  és la quantitat d'energia que ens proporciona el Sol anualment i que, per tant, representarà el combustible estalviat (en valor energètic). Cal passar de valor energètic a valor monetari i, finalment, multiplicar pel valor d'actualització, ja que la comparació econòmica d'aquest flux d'efectiu anual es fa a data present. Els valors de  $i$ ,  $d$  i  $n$  (seguint l'equació 6.13) seran, respectivament, els següents:

- $d$  - inflació en el preu del combustible: 7% a la fi de 1999
- $i$  - inflació general (IPC): 3% a la fi de 1999
- $n$  - durada del càlcul econòmic: 20 anys (equivalent al temps de vida de l'equip)

L'estudi de l'estalvi en combustible es podria ampliar si tinguéssim en compte altres despeses estalviades de tipus mediambiental, que incrementarien clarament el preu del combustible com ara el cost social i econòmic dels vessaments de cru de petroli (Alaska, Bretanya Francesa, Galàpagos...) o les fuites radioactives i problemes d'emmagatzematge dels residus nuclears, per posar dos petits exemples.

Taula 6.1 Taula de preus de l'energia.

Tipus d'energia	Preu	Unitat
Gasoil de calefacció	65	ptes./litre
Electricitat	15	ptes./kWh (molt variable, consultar en els preus de l'energia)
Gas Natural	4.400 (terme fix)	ptes./any
	7 (terme variable)	ptes./termia (= ptes. / 1.000 kcal)
GLP	214 (terme fix)	ptes./mes
	88.85 (terme variable)	ptes./kg

#### b) Increment en el pagament del préstec

En instal·lacions petites, la realització d'una inversió en energia solar potser no és una gran despesa. Però quan comencem a tenir instal·lacions importants, cal tenir en compte el crèdit que es pugui demanar, de quin tipus d'ajudes podem disposar i si hi ha alguna opció millor per als nostres diners que no pas la d'una inversió en energia solar.

Si l'opció escollida és demanar un crèdit, la inversió que cal fer es calcularà segons l'equació 6.15, com hem vist anteriorment:

$$C_S = C_{SA} \cdot A + C_{SF} \quad (6.15)$$

Aquest cost es converteix en el *principal* d'un préstec que implica un pagament anual (si la taxa d'interès no es revisa) donat per l'equació 6.14

$$\text{Pagament anual} = \frac{\text{Valor de la hipoteca}}{P(n,0,i)} = \frac{C_S}{P(n,0,i)} = \frac{C_{SA} \cdot A + C_{SF}}{P(n,0,i)} \quad (6.20)$$

On els valors de  $n$  i  $i$  són ara:

$n$  – durada del càlcul econòmic: 20 anys (equivalent al temps de vida de l'equip)  
 $i$  – interès del préstec: 9% (variable segons la quantitat demanada o l'entitat bancària)

El valor actual del sumatori de  $n$  d'aquests pagaments anuals amb un increment en el preu del diner corresponent a l'IPC serà, finalment:

$$\text{Pagaments anuals actualitzats} = \frac{C_{SA} \cdot A + C_{SF}}{P(n,0,i)} \cdot P(n,0,ipc) \quad (6.21)$$

## c) Increment en el pagament del manteniment i l'assegurança

La nova instal·lació solar implica unes despeses de manteniment i, en el cas que se'n vulgui contractar alguna, unes despeses d'assegurança contra riscos externs (pedregades, inundacions...). Si és així, el cost i el manteniment s'acostumen a donar com a fracció de la inversió segons l'equació 6.22:

$$C_s \cdot a \cdot P(n, 0, i) \quad (6.22)$$

On els valors de  $a$ ,  $n$ , i  $i$  són els següents:

$a$ – cost de manteniment i assegurança:	2% (com a fracció de la inversió)
$n$ – durada del càlcul econòmic:	20 anys
$i$ – inflació general (IPC):	3% a la fi de 1999

Val a dir que l'efecte de la despesa en manteniment i assegurança sobre la funció de l'estalvi solar és força notori: petites variacions en el percentatge d'aquesta despesa poden suposar reduir la rendibilitat del projecte de forma dràstica.

## d) Increment en el pagament de l'energia paràsit

Com dèiem anteriorment, un equip d'energia solar disposa d'un seguit d'elements consumidors d'energia que impliquen un sobrecost energètic per a la instal·lació i que cal determinar a mesura que creixi i que es faci més important. El creixement de la despesa en energia paràsit en funció de l'àrea de captació és clarament logarítmic i tendeix a un valor constant a mesura que creix la instal·lació. Tot i així, podem linealitzar aquesta funció per a instal·lacions relativament petites (fins a 75 - 100 m<sup>2</sup>) i la seva quantificació es pot obtenir tal com s'ha obtingut la de l'equació 6.15 i en funció de l'àrea de captació (això implica més cabal circulat i més potència per gestionar). El consum passa essencialment pel de les bombes circuladores i la centraleta de control i és en forma d'energia elèctrica. Amb valors actuals, podem donar per bona l'equació

$$Preu \text{ de l'electricitat} \cdot (20 \cdot A) \cdot P(n, d, i) \quad (6.23)$$

On el *preu de l'electricitat* es troba segons tarifes (taula 6.1),  $A$  és l'àrea de captació i els valors de  $i$ ,  $d$  i  $n$  (per utilitzar segons l'equació 6.13) seran, respectivament, els següents:

$d$ – inflació en el preu de l'electricitat:	7 % a la fi de 1999
$i$ – inflació general (IPC):	3% a la fi de 1999
$n$ – durada del càlcul econòmic:	20 anys (equivalent al temps de vida de l'equip)

## e) Increment en els impostos de la propietat i desgravacions fiscals

Aquesta és potser la part més difícil de l'estudi econòmic no tant per la seva quantificació sinó per les particularitats que inclou, perquè cada ciutat, cada comarca i cada comunitat té els seus criteris específics a l'hora de permetre un tractament fiscal diferenciat per als usuaris que es decideixin per les energies renovables. Una nova instal·lació es pot considerar un valor afegit a la nostra edificació que ens grava l'impost de la propietat en una certa quantitat. En segons quins casos, la utilització d'instal·lacions solars ens permet una desgravació en impostos (renda, propietat, IAE).

És qüestió de recollir informació en cada cas i avaluar-la seguint els criteris formulats anteriorment (vegeu l'apartat 6.3. Ajuts, subvencions i polítiques de futur). En general, els ajuts vénen o bé com a ajuda en funció dels metres quadrats instal·lats, o bé com a tant per cent de la inversió total. També hi ha ajuts en forma de tipus d'interès especial. En qualsevol cas és un valor que cal restar a la inversió inicial de manera que la funció de l'estalvi solar en surti majorada.

### Exemple 6.6

*Determineu l'àrea òptima de captació pel sistema solar de l'edificació de l'exemple 5.2 mitjançant el criteri de l'estalvi solar si les dades econòmiques de sortida són*

*Temps de vida mitjà de la instal·lació: 20 anys*

*Increment en el preu del diner (IPC): 3%*

*Interès bancari de préstec (i): 9%*

*Inflació en el preu del combustible (ic): 7%*

*Combustible: gasoil de calefacció a 65 ptes./litre i*  
*PCI = 8.550 kcal / litre = 35.800 kJ / litre = 35.8 MJ / litre*

*Rendiment caldera ( $\eta_{caldera}$ ): 0,6*

*Notes:*

*Per al càlcul del combustible estalviat anualment, cal que les unitats siguin les mateixes: si treballem amb MJ/any, cal que el PCI estigui en MJ també (35,8 MJ / litre).*

*La funció  $P(n,d,i)$  (equació 6.13) a 20 anys, pren un valor constant per a cada cas:*

$$P(n,ic,ipc) = \frac{1}{(ipc - ic)} \left[ 1 - \left( \frac{1+ic}{1+ipc} \right)^n \right] = P(20, 0,07, 0,03) = 28,56$$

$$P(n,0,ipc) = \frac{1}{(ipc)} \left[ 1 - \left( \frac{1}{1+ipc} \right)^n \right] = P(20, 0, 0,03) = 14,88$$

$$P(n,0,i) = \frac{1}{(p)} \left[ 1 - \left( \frac{1}{1+p} \right)^n \right] = P(20, 0, 0,09) = 9,13$$

*Els resultats vénen reflectits a la taula següent:*



Àrea (m <sup>2</sup> ) (Exemple 5.2)	$f_{\text{anual}}$	$L$ (MJ/any) (Exemple 5.1)	Inversió (Cs) (Eq. 6.15)	a) Estalvi de comb. (Eq. 6.19)	b) Pagament del préstec (Eq. 6.21)	c) Mant. i assegurança (Eq. 6.22)	d) Energ. paràsita (Eq. 6.24)	Estalvi solar (Eq. 6.18)
2	0,12	59.067	360.000	735.097	586.725	107.136	17.136	24.100
4	0,20	59.067	470.000	1.243.539	766.002	139.872	34.272	303.393
8	0,28	59.067	690.000	1.758.107	1.124.556	205.344	68.544	359.663
16	0,40	59.067	1.130.000	2.487.078	1.841.665	336.288	137.088	172.038
24	0,50	59.067	1.570.000	3.062.904	2.558.773	467.232	205.632	-168.733
32	0,56	59.067	2.010.000	3.467.208	3.275.882	598.176	274.176	-681.026
50	0,67	59.067	3.000.000	4.141.047	4.889.376	892.800	428.400	-2.069.529
100	0,81	59.067	5.750.000	4.961.905	9.371.303	1.711.200	856.800	-6.977.398

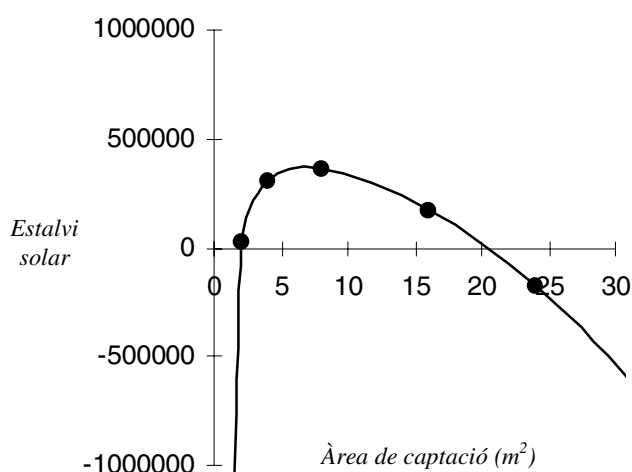


Fig. 6.4 Relació entre estalvi i àrea de captació pel criteri de l'estalvi solar.

De la figura 6.4 podem observar com, d'aquesta instal·lació, en aquestes condicions econòmiques específiques i per una inversió inicial de quasi 700.000 ptes., arribem a recuperar la inversió i obtenim un estalvi màxim acumulat, a valor actual, de gairebé 360 000 ptes. per una àrea de captació òptima de 8 metres quadrats (4 captadors) i una fracció solar del 30%. Fixem-nos com per una àrea de 0 m<sup>2</sup>, l'estalvi solar és negatiu i correspondria únicament a la despesa de combustible fòssil acumulada al llarg del cicle de vida de la instal·lació:

$$L_{\text{TOT}} \cdot \frac{\text{preu del combustible}}{PCI \cdot \eta_{\text{caldera}}} \cdot P(n, d, i) = 59.067 \cdot \frac{65 \text{ ptes./litre}}{35,8 \text{ MJ/litre} \cdot 0,6} \cdot 28,56 = 5.105.000 \text{ ptes.}$$

### 6.2.2 Criteri del temps de recuperació de la inversió

Els factors econòmics utilitzats a l'apartat anterior es poden utilitzar per calcular el temps d'amortització mínim de la nostra instal·lació. A l'apartat 6.2 es defineix el *temps d'amortització* com el temps necessari perquè l'estalvi en combustible acumulat al llarg d'un període de temps iguali la inversió total inicial. És a dir, el temps que ha de passar fins que es recuperi la inversió en forma de combustible estalviat. L'estalvi en combustible de l'any  $n$  vindrà donat per:

$$f_{\text{anual}} \cdot L_{\text{TOT}} \cdot \frac{\text{preu del combustible}}{\text{PCI} \cdot \eta_{\text{caldera}}} \cdot \frac{(1+d)^{n-1}}{(1+i)^n} \quad (6.24)$$

On  $f_{\text{anual}} \cdot L_{\text{TOT}}$  és l'energia estalviada,  $i$  és l'IPC i  $d$  és la inflació del combustible. El sumatori de l'estalvi de combustible pels diferents anys al llarg del temps d'amortització ha d'igualar la inversió inicial donada per l'equació 6.15:

$$\sum_{j=1}^n f_{\text{anual}} \cdot L_{\text{TOT}} \cdot \frac{\text{preu del combustible}}{\text{PCI} \cdot \eta_{\text{caldera}}} \cdot \frac{(1+d)^{j-1}}{(1+i)^j} = C_s \quad (6.25)$$

Fent el sumatori:

$$\frac{f_{\text{anual}} \cdot L_{\text{TOT}} \cdot \text{preu del combustible}}{\text{PCI} \cdot \eta_{\text{caldera}}} \cdot \left[ \frac{1}{(i-d)} \left( 1 - \left[ \frac{1+d}{1+i} \right]^n \right) \right] = C_s \quad (6.26)$$

Resolent per  $N$  (els anys d'amortització), tindrem:

$$N = \frac{\ln \left( 1 - \frac{C_s \cdot (i-d)}{f_{\text{anual}} \cdot L_{\text{TOT}} \cdot \text{preu del combustible} / \text{PCI} \cdot \eta_{\text{caldera}}} \right)}{\ln \left( \frac{1+d}{1+i} \right)} \quad (6.27)$$

L'exemple 6.7 ens proporciona els resultats de l'aplicació de l'equació 6.27 a les condicions del cas que ens ocupa. Com s'observa a la figura 6.5, el temps d'amortització per àrees de captació des de 5 m<sup>2</sup> fins a 9 m<sup>2</sup> és molt semblant: uns 10 anys. L'àrea de captació de 8 m<sup>2</sup> demostra tenir un temps d'amortització lleugerament superior a la de 4 m<sup>2</sup>. Aquest fet és degut a què pel càlcul del temps d'amortització deixem de considerar moltes de les variables que utilitzàvem en l'anàlisi del cost del cicle de vida.

**Exemple 6.7**

Determina l'àrea òptima de captació per l'edificació de l'exemple 5.2 mitjançant el criteri del temps d'amortització. En aquest cas les dades que ens calen són:

$C_s$ : (segons l'equació 6.15)  
 $IPC$ : 0.03 (inflació general - 3 %)  
 $d$ : 0.07 (inflació en el preu del combustible - 7%)

El criteri de l'estalvi solar busca l'àrea de captació que minimitza els anys d'amortització de la instal·lació. En aquest cas, l'equació 6.27 pren la forma:

$$N = - \frac{\ln \left( 1 - \frac{C_s \cdot (i - d)}{f_{\text{anual}} \cdot L_{\text{TOT}} \cdot \text{preu del combustible} / \text{PCI} \cdot \eta_{\text{caldera}}} \right)}{\ln \left( \frac{1 + d}{1 + i} \right)} =$$

$$= - \frac{\ln \left( 1 - \frac{C_s \cdot (0,03 - 0,07)}{f_{\text{anual}} \cdot 59.067 \cdot 65 / 35,8 \cdot 0,6} \right)}{\ln \left( \frac{1 + 0,07}{1 + 0,03} \right)}$$

I ens proporciona els resultats següents:

Àrea (m <sup>2</sup> )	$f_{\text{anual}}$	$L$ (MJ/any)	$N$ (anys)
2	0,12	59.067	12,27
4	0,20	59.067	9,93
8	0,28	59.067	10,25
16	0,40	59.067	11,55
24	0,50	59.067	12,73
32	0,56	59.067	14,02
50	0,67	59.067	16,60
100	0,81	59.067	23,09

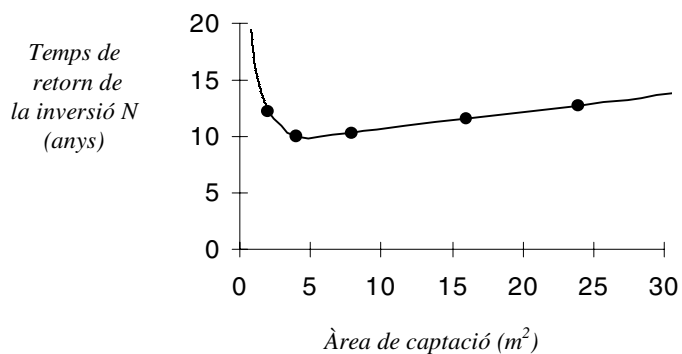


Fig. 6.5 Relació entre anys d'amortització i àrea de captació pel criteri del temps de recuperació de la inversió.

### 6.2.3 Resum

De l'estudi dels resultats dels apartats 6.2.1 i 6.2.2, veiem com l'àrea que optimitza l'estudi econòmic és la de 8 metres quadrats, valor que correspon a una fracció anual del 0,3 (és a dir, el Sol ens proporcionaria un 30% del total de l'energia que necessitem).

Tot i així, com que els captadors tenen una àrea unitària d'uns 2 metres quadrats, cal escollir l'àrea total com a múltiple aproximat de 2. En aquest cas ja és correcte: 4 captadors (a més, cal que correspongui a un nombre parell de captadors, perquè així se'n facilita la disposició i l'equilibri hidràulic del circuit).

Un últim punt important que cal tenir en compte és el de la connexió dels captadors (que veiem a l'apartat 5 del capítol 4). Un cop es coneix l'àrea òptima cal saber quin tipus de connexió farem en funció de la velocitat de resposta del sistema que desitgem. Això implica refer una certa part del càlcul i acabar d'ajustar els paràmetres que fan referència a la recta de rendiment de la instal·lació quan tenim en compte la connexió dels diferents captadors instal·lats.

A mesura que l'estudi econòmic es fa més i més complet (considerant, p. ex., valors de recuperació), les incerteses augmenten de forma proporcional en introduir valors que segurament deixaran de ser constants al llarg del temps. Així doncs, l'estudi econòmic és molt sensible a totes i cada una de les assumpcions fetes al llarg del procés de càlcul i, a vegades, és difícil d'aproximar-ho a la realitat de forma entera perquè hi ha molts factors que es poden escapar de les mans i les incerteses augmenten.

Hem fet l'estudi en funció de l'àrea de captació, però també es podria fer en funció del volum d'acumulació o de qualsevol altra variable existent en el procés. Un pas endavant en l'estudi econòmic és el de l'*estudi de sensibilitat* de les diferents variables presents en el sistema.

Una última qüestió, però essencial, que cal tenir en compte és que tot i que un estudi de viabilitat econòmica no ens proporcioni els resultats esperats, l'estudi de *viabilitat ambiental* sempre ens serà favorable. Amb això volem dir que la decisió d'optar per energies netes no és una decisió econòmica, tot i que essencialment ho pugui semblar: ha de ser una decisió vital. Una decisió en què ens hi va, en cert grau, la supervivència en aquest planeta.

## 6.3 Ajuts, subvencions i polítiques de futur

Malauradament, actualment els projectes d'energies renovables no acostumen a ser econòmicament viables si al darrere no hi ha algun tipus de subvenció i/o ajut que en permeti un finançament favorable. Això s'explica per molts motius, però un d'ells és l'actual relació entre oferta i demanda de components i material específic per a aquestes instal·lacions, que no són d'ús generalitzat, i la relativa poca competitivitat enfront del món de les energies convencionals. S'espera que amb la nova política de liberalització de mercats es pugui donar via lliure a una veritable internalització de costos externs perquè en els nous preus energètics hi estigui del tot reflectit la component mediambiental.

### 6.3.1 Ajuts i subvencions

Els ajuts poden adoptar, entre altres, les formes següents:

- Subvencions financeres
- Exoneració d'impostos i tributs
- Préstecs amb un tipus d'interès baix
- Desgravacions (bonificacions en quotes empresarials de la Seguretat Social)
- Primes en adquisició de certs materials i equips
- Exempcions aranzelàries
- Cessió d'immobles o terrenys a títol gratuït o en condicions especialment favorables
- Garanties concedides en operacions de crèdit
- Formació i capacitació professional
- Ajudes indirectes mitjançant la facilitació d'infraestructures

Les subvencions que actualment tenim a l'abast en aquest àmbit provenen de la Unió Europea, de l'Estat, de la comunitat autònoma i fins i tot poden ser de tipus local, municipal.

#### a) Unió Europea

La Unió Europea, com a suport a les seves polítiques de desenvolupament econòmic, destina quantitats importants del seu pressupost en benefici de projectes empresarials específics. Els ajuts s'articulen en *fons, iniciatives, projectes pilot, programes i instruments financers*. Per accedir-hi cal presentar un programa d'actuació i seguiment, generalment amb la cooperació d'una contrapart d'un altre país comunitari.

Els *fons* poden ser *estructurals* o *de cohesió*. Els primers són ajuts creats per la Unió amb l'objectiu de corregir desigualtats estructurals i afavorir el desenvolupament harmònic regional. Poden ser de quatre tipus: FEDER (Fons Europeu de Desenvolupament Regional), FEOGA (Fons Europeu d'Orientació i Garantia Agrícola), FSE (Fons Social Europeu) i IFOP (Instruments Financers d'Orientació a la Pesca). Els segons es destinen als països menys afavorits i tenen com a finalitat facilitar-los que arribin a la unió econòmica i monetària per acomplir els objectius de Maastricht.

Les *iniciatives* i els *projectes pilot* estan destinats a explorar noves vies en matèria de desenvolupament econòmic i social.

Els *programes* actuen en l'àmbit científic i tecnològic. Actualment el V Programa marc d'R+D es distribueix en quatre línies d'actuació: programes d'investigació, desenvolupament tecnològic i demostració, cooperació amb tercers països i organitzacions internacionals, difusió i valoració dels resultats de la investigació i foment de la formació i mobilitat dels investigadors. També existeix el Programa d'ajudes a països en vies de desenvolupament (PHARE, TACIS, JOPP). Les modalitats de participació en aquest programa són:

Accions de cost compartit:

Projectes de recerca i desenvolupament (subv. fins al 50%)

Projectes de demostració (subv. fins al 35%)

Projectes combinats (subv. fins al 35-50%)

Beques

Suport a xarxes temàtiques (subv. fins al 100%)

Accions concertades (subv. fins al 100%)

Mesures d'acompanyament (subv. fins al 100%)

Els projectes subvencionables han de tenir un fort component innovador, un pla de difusió inclòs i han de comptar amb la participació d'un mínim de dos o tres països comunitaris. Els criteris d'avaluació passen pels de la qualitat i la innovació científica i tecnològica, els de valor afegit comunitari i de contribució a les polítiques de la UE i els de contribució als objectius socials comunitaris.

Per últim, els *instruments financers* tenen per objectiu donar suport a les empreses mitjançant préstecs privilegiats i avals per l'obtenció de crèdits a través d'acords globals amb les institucions financeres internacionals. Per a més informació us podeu adreçar a l'adreça <http://www.cordis.lu/fp5/home.html>.

#### b) Ajuts estatals

Els ajuts estatals surten del Govern central i es carreguen al Pressupost general de l'Estat. Per regla general, aquests ajuts són cofinançats a través dels diferents fons comunitaris. Són ajuts molt copiosos i cal estar al cas de l'oferta i obtenció. Les subvencions poden anar des de incentius econòmics a la inversió passant per programes de suport de caràcter sectorial i de subvencions a la contractació laboral fins a bonificacions fiscals.

Dins del PAEE (Plan de Ahorro i Eficiencia Energética), l'Ordre del 28 de juny de 1991 (BOE 180, 29 de juliol de 1991) estableix les bases per a la concessió d'ajuts previstos per la Llei 82/1980 encaminades a potenciar l'adopció de fonts d'energia renovables reduint el consum exterior de combustibles. En aquest aspecte s'arriba a subvencionar fins a un 30% de la inversió i es donen de 15.000 a 35.000 pessetes per metre quadrat de superfície de captació instal·lada. En qualsevol cas, mai superior als 400 milions de pessetes.

#### c) Ajuts autonòmics

Cada comunitat autònoma té una part del seu pressupost destinada a completar els ajuts estatals o bé a suplir-ne l'absència dels mateixos en determinats sectors. Generalment són ajuts desenvolupats i tramitats pels serveis territorials de la comunitat autònoma que potencien aquelles inversions que ofereixin al·licients per a l'economia o el teixit industrial i social de la comunitat.

Actualment les subvencions previstes per a cada tipus d'energia renovable s'engloben en el Pla d'estalvi i eficiència energètica (PAEE) i les seves bases (BOE 107, del 5 de maig de 1998) es poden demanar a la Direcció General de l'Energia (DGE) i a l'Institut Català d'Energia (ICAEN):

Energia solar tèrmica: entre 15.000 i 35.000 ptes./m<sup>2</sup>  
Energia solar fotovoltaica: màxim de 600 a 1.200 ptes./Wp  
Energia eòlica: entre el 30 i el 40% de la inversió  
Energia minihidràulica: entre el 5 i el 15% de la inversió  
Biomassa: un màxim del 40% de la inversió

El Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya 2867 del 14 d'abril de 1999 fixa una subvenció per estudis i projectes en l'àmbit de les energies renovables de fins a un màxim del 50% del pressupost de la mateixa.

#### d) Ajuts locals

Són els que provenen de la corporació municipal on s'ubiqui el projecte. Poden ser rellevants en relació amb aspectes com la creació d'infraestructures, exempció d'impostos (licència d'obres, IAE, impost de béns immobles), petites subvencions (sobre el m<sup>2</sup> o en % sobre la inversió) o tramitació de permisos i llicències.

A la ciutat de Terrassa hi ha algunes ajudes en relació amb les taxes i els impostos per a la construcció de les instal·lacions. En particular, hi ha l'exempció sobre l'impost de llicència d'obres i activitats (Ordenança fiscal 2.5) i l'exempció sobre la taxa per serveis urbanístics (Ordenança fiscal 3.2).

Per a les activitats que utilitzin energies renovables en els seus processos, hi ha bonificacions de fins a un 75% en la taxa corresponent. En el cas que la instal·lació es vulgui fer sobre una edificació ja existent, i no calgui llicència d'obres, no queden inclosos en els ajuts.

Així mateix, com en algunes altres ciutats, s'ha creat una agència local que rep el nom d'Agència Local d'Informació i Serveis Energètics de Terrassa (Carrer del Nord, 74; telèfon 93 784 47 42), que intenta aglutinar la gestió administrativa d'aquesta cada vegada més creixent branca de l'economia local.

Altres municipis que han aprovat mesures de promoció de les energies renovables són Sant Quirze del Vallès, Reus, Vilanova i la Geltrú, Barcelona i Sant Feliu de Guíxols. Els ajuntaments que, entre d'altres, actualment tenen línies de treball obertes per incorporar programes d'energies renovables són Olot, Sant Cugat, Rubí, Granollers, l'Hospitalet i Manresa (amb dades a 15 de juny de 1999).

### 6.3.2 Polítiques de futur

El *Llibre blanc per l'estratègia comunitària i pla d'acció (Energia per al futur: fonts renovables d'energia)*, estableix un objectiu indicatiu del 12% com a valor de la contribució de les energies renovables al gruix del consum energètic de la Unió Europea per abans del 2010 (ara per ara es compta només amb un 9%). L'estratègia i el pla d'acció subratllat en el *Llibre blanc* identifica les línies d'acció que cal prendre per tal d'assolir aquest objectiu:

- 1r) Regular per crear els marcs de condició favorables a l'establiment i desenvolupament de les energies renovables, i
- 2n) Augmentar les subvencions per a la investigació i el desenvolupament en aquest àmbit, tant en l'àmbit nacional com continental.

Una de les primeres accions ha estat la campanya “De l'enlairament”, que en l'àmbit europeu té previst assolir els següents objectius abans de l'any 2003:

1.000.000 sistemes PV  
 15.000.000 m<sup>2</sup> de captadors tèrmics  
 10.000 MW de generadors eòlics  
 10.000 MWt en instal·lacions de cicle combinat i biomassa  
 1.000.000 habitatges escalfats per biomassa  
 1.000 MW d'instal·lacions de biogàs  
 5.000.000 de tones de biocombustibles líquids

Aquests objectius correspondrien a un 15% i 25% (aquest últim per al cas de l'energia eòlica, la de més potencial actualment) dels objectius globals fixats per a l'any 2010.

A Catalunya, els objectius per energia solar tèrmica marcats pel *Llibre Verd de les Energies Renovables a l'Euroregió* per l'any 2005 són: 55.000 m<sup>2</sup> de captadors instal·lats (considerant una situació al 1996 de 19.000 m<sup>2</sup> instal·lats i funcionant) i una producció d'energia primària propera als 67.000 MWh/any.

Malgrat aquestes previsions, cal tenir en compte que l'energia solar tèrmica a Catalunya té unes barreres socials i economicofinanceres que s'han de superar de manera ràpida i efectiva. La taula 6.2 ens en fa un resum.

Taula 6.2 Barreres socials i economicofinanceres (font: ICAEN).

<b>Barreres</b>	<b>Accions que cal prendre per superar-les</b>
Manca de confiança en la tecnologia (imatge negativa deguda a males experiències del passat)	APERCA (Associació de Professionals de les Energies Renovables a Catalunya) assumeix el <b>compromís de qualitat</b> (“Criteris mínims d'instal·lacions solars tèrmiques”) Noves formes de <b>gestió d'instal·lacions</b> (garantia de resultats solars i venda d'energia) Nous sistemes de <b>seguiment i telecontrol</b>
Economicofinanceres (inversió inicial elevada)	Noves formes de finançament d'instal·lacions (finançament per tercers) Subvencions en l'àmbit comunitari (5è Programa marc), autonòmic ( <b>PAEE</b> ) i municipal
Manca d'informació al públic en general	Accions de disseminació en general (servei d'informació i assessorament, publicacions, xerrades) Accions de formació específiques (en escoles, per professionals, instal·ladors, tècnics municipals i arquitectes)
Manca de normativa específica	Inclusió en el Reglament d'Instal·lacions Tèrmiques en Edificis ( <b>RITE</b> ) Definició de la <b>formació oficial per instal·ladors</b> (RD 2223/98, BOE 269 del 10/11/98) Preparació d'una <b>normativa específica</b> per a instal·lacions solars tèrmiques a Catalunya (segons els criteris d'APERCA) <b>Ordenances municipals</b> per obligar a la incorporació d'energia solar tèrmica a edificis de nova construcció o rehabilitacions integrals
Dificultat d'integració en edificis	<b>Formació</b> específica a arquitectes i constructors Desenvolupament de nous <b>tipus de captadors</b> més fàcilment integrables <b>Normatives</b> municipals i plans urbanístics

De les accions que cal prendre per superar les barreres mencionades, en destaquem la *garantia de resultats solars (GRS)* i el model de *finançament per tercers*.



La *garantia de resultats solars* neix a França a finals dels anys vuitanta i s'implanta per primera vegada a l'Hospital de Castres al 1988. És el nom que rep el contracte entre propietari i grup tècnic (fabricants, instal·ladors i responsables de manteniment) que garanteix el subministrament d'una *quantitat mínima d'energia* a l'any per a un consum tèrmic determinat durant un període determinat (de tres a cinc anys). Si l'energia subministrada per l'equip és inferior a l'energia garantida, el col·lectiu tècnic que ha firmat el contracte ha de compensar al client. Per verificar el compliment de la GRS és necessari disposar d'un sistema que permeti comptabilitzar l'energia aportada realment pel sistema solar. La formula escollida consisteix en un sistema de telecontrol interrogable per via telefònica que subministra els paràmetres necessaris per a conèixer el funcionament de la instal·lació (temperatures, cabals, marxa i parada de bombes) i comptabilitza la producció energètica real.

La forma de *finançament per tercers* permet disposar d'una instal·lació solar sense fer cap inversió inicial, ja que el finançador assumeix tots els riscos tecnològics. L'usuari només ha de reemborsar l'equivalent monetari del consum energètic real que fa de la instal·lació, de manera que el que paga realment és l'estalvi de combustible. Si per qualsevol motiu la instal·lació deixa de funcionar, el finançador n'és l'únic perjudicat. L'usuari es beneficia des del primer moment dels avantatges de servei, mediambientals i de millora d'imatge, que proporciona la instal·lació solar i una vegada recuperada la inversió, disposem d'una instal·lació que proporciona energia gratuïta, neta i inexhaurible.

## 7 Centrals solars

### 7.1 Introducció

La conversió a gran escala de l'energia solar en energia mecànica i elèctrica ha estat l'objecte de nombrosos experiments al llarg de tot el segle XX. Ja al 1872, un enginyer francès anomenat Mouchot, a l'Exposició Internacional de París, va exhibir una impremta accionada amb vapor generat mitjançant l'energia del Sol, i al 1913, a Meadi, Egipte, es va desenvolupar una planta d'irrigació accionada amb mitjans solars. Però no fou fins als anys setanta que es començà a investigar en aquest camp de forma seriosa i constant.

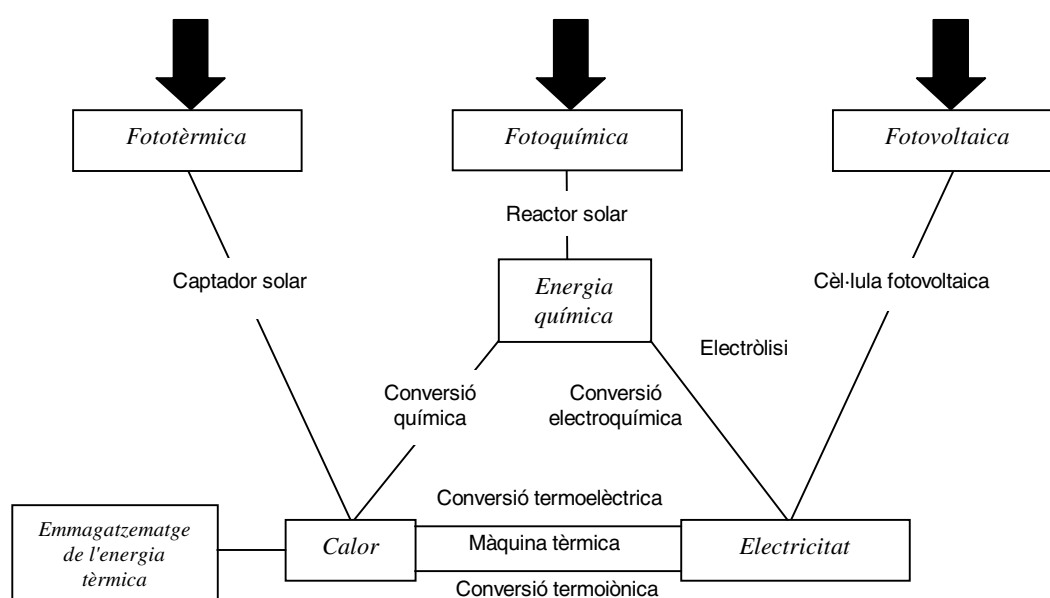


Fig. 7.1 Processos de conversió de l'energia solar.

Al 1988 es disposava de 500 MW<sub>e</sub> instal·lats arreu del món en aquest tipus de centrals, quantitat negligible al costat de l'energia tèrmica convencional, però totalment satisfactòria si tenim en compte el temps de desenvolupament transcorregut. Actualment, les possibilitats de l'energia solar com a font primària d'energia rau en el ple desenvolupament tecnològic dels diferents components que intervenen en la seva transformació i, sobretot, en l'optimització dels costos econòmics implicats i el preu de producció de l'electricitat resultant.

A la figura 7.1 es poden veure les tres vies que avui dia es plantegen de cara a l'aprofitament de l'energia solar, i que donen lloc als tres tipus de centrals solars: les fototèrmiques, les fotovoltaïques i les fotoquímiques.

## 7.2 Centrals solars fototèrmiques

A primera vista, les centrals solars tèrmiques (CST) semblen centrals tèrmiques convencionals. Però si ens hi fixem més detingudament, veurem com la naturalesa, la qualitat i la disponibilitat de l'energia primària utilitzada difereix significativament de la de les centrals tèrmiques convencionals.

L'energia primària en una central tèrmica o nuclear és de tipus combustible: carbó, gas, fueloil, fins i tot biomassa o urani enriquit, que després de la seva extracció del subsòl terrestre es transformen en article de comerç, que han de ser transportats al lloc de consum i, si és el cas, poden ser emmagatzemats. Per contra, en una CST l'energia primària no s'extrau del subsòl terrestre ni és objecte de comerç, sinó que és un recurs constantment renovat. En canvi, la seva disponibilitat està condicionada per diversos factors com són la localització, l'estacionalitat, la meteorologia i, sobretot, perquè és una energia no concentrada, com les fòssils. Això té diverses repercussions en l'àmbit tecnològic i d'operació de les CST. Entre d'altres, que l'energia ha de ser captada in situ i per poder assolir nivells importants de potència la superfície de captació ha de ser gran. Així, una CST requerirà molt més terreny que una tèrmica convencional (20-35 m<sup>2</sup>/kW<sub>e</sub> en relació als 1-2 m<sup>2</sup>/kW<sub>e</sub>). En canvi, respecte a aquestes ens estalviarem terrenys ocupats per altres activitats com són la mineria, el processat, el transport i l'emmagatzematge de residus.

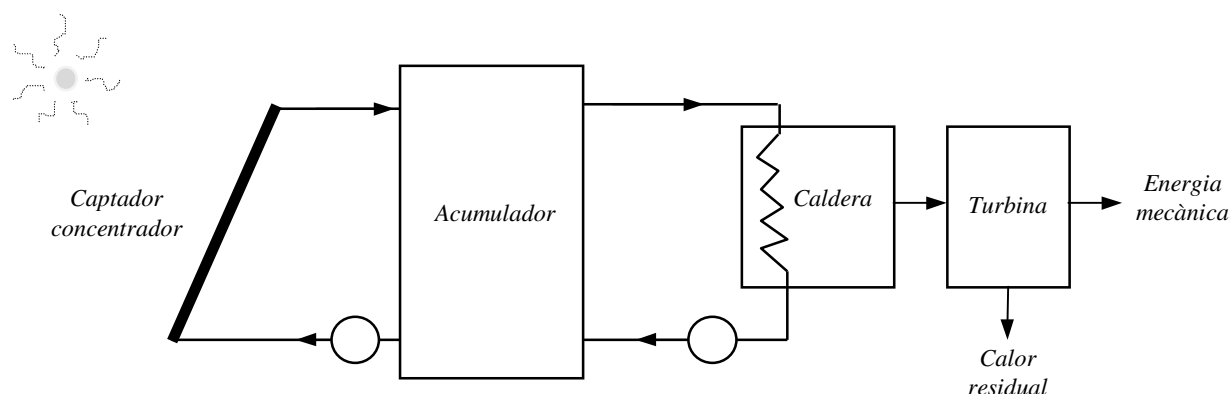


Fig. 7.2 Esquema de la conversió d'energia tèrmica en mecànica.

La finalitat bàsica d'una CST és normalment generar energia elèctrica per distribuir-la en xarxes autònomes o de subministrament general. Però tampoc s'ha de descartar la possibilitat d'un aprofitament directe en forma de calor i, millor encara, com a central de cogeneració (calor + electricitat), fins i tot en combinació amb combustibles fòssils (p. ex., CST tipus Sol-gas). Però, encara que més minoritària, hi ha una altra aplicació de les CST, la dels anomenats forns solars (p. ex., Odeillo-Font Romeu), que tenen com a camps d'aplicació la metal·lúrgia a altes temperatures i les proves de components i sistemes solars per a CST.

El procés bàsic de conversió de l'energia solar en energia mecànica es mostra de forma esquemàtica a la figura 7.2. En primer lloc, es capta l'energia mitjançant captadors concentradors i es transfereix a un fluid portador de calor que circula per l'interior del circuit solar. Posteriorment, i en funció de les necessitats, aquesta energia pot ser emmagatzemada o bé ser directament utilitzada, fent-la passar per un bescanviador/caldera que escalfa l'aigua del circuit secundari fins a l'obtenció de vapor per l'accionament d'una turbina, que associada amb un generador ens permet la producció de l'electricitat.

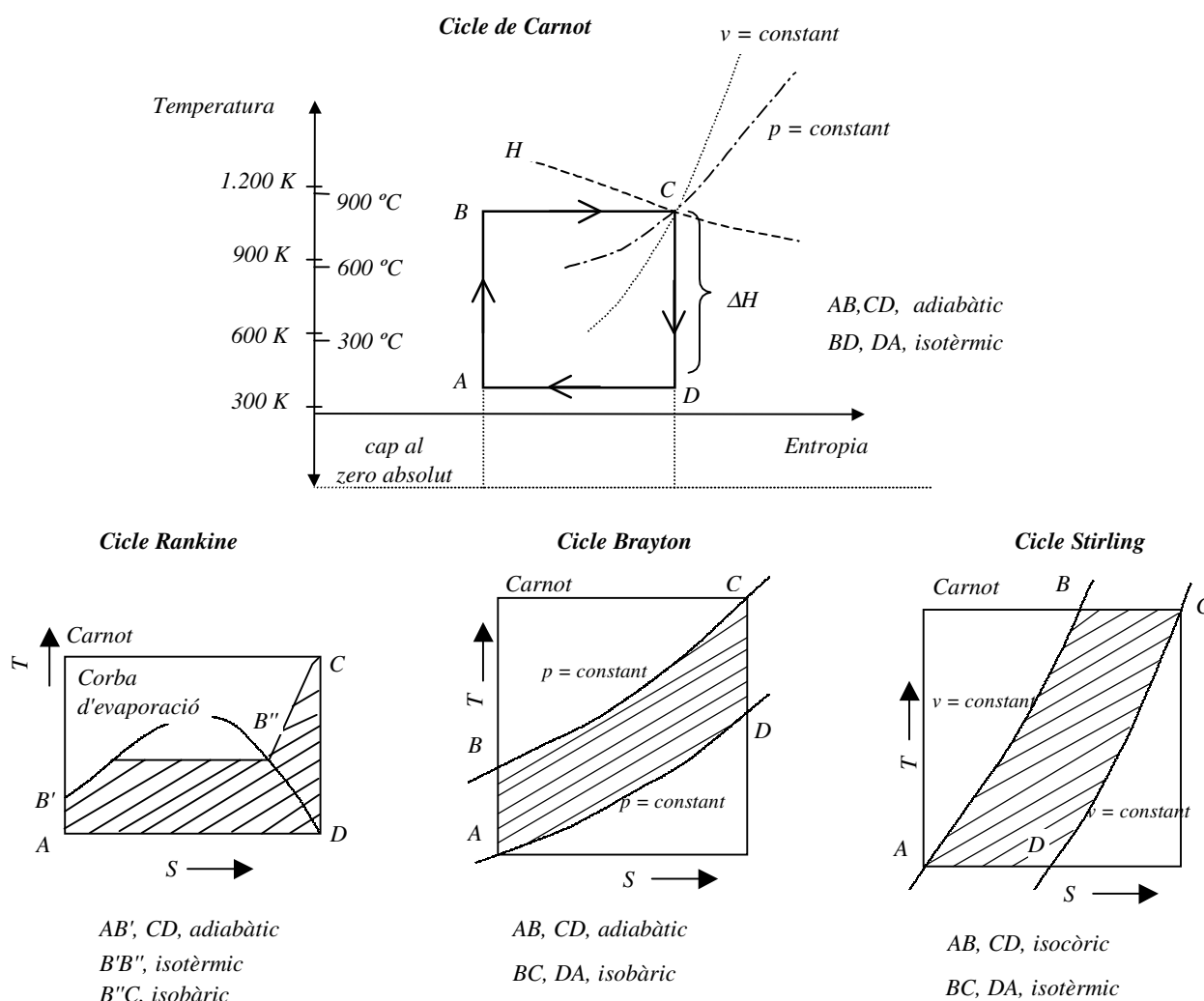


Fig. 7.3 Diagrames dels cicles termodinàmics ideals de significat pràctic per a centrals tèrmiques solars. El cicle de Carnot és un cicle hipotètic reversible sense pèrdues, que segueix quatre processos consecutius: compressió isentròpica, addició de calor isoterma, expansió isentròpica i cessió de calor isoterma. L'àrea que envolta els cicles indica l'eficiència de la conversió en funció de les temperatures límit de cicle (en K). Per dues temperatures donades, el cicle Stirling és el més eficient, ja que l'addició i la cessió d'energia esdevé isotèrmica i a volum constant, i ens aproxima a les condicions d'adiabaticitat.

L'eficiència màxima teòrica d'una màquina tèrmica, és a dir, el límit en la conversió de l'energia tèrmica en mecànica, s'avalua mitjançant l'anomenat **rendiment de Carnot** (equació 7.1), vàlid per a processos ideals, i que és únicament funció de les temperatures màxima i mínima de les fonts de calor.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{Focus fred}}{T_{Focus calent}} \quad (7.1)$$

De l'anàlisi de l'expressió anterior, veiem que el rendiment de la màquina tèrmica augmenta a mesura que la seva temperatura màxima d'operació augmenta, és a dir la de la caldera (acceptant que la del focus fred és la temperatura ambient, que no varia gaire). Per contra, recordem que el rendiment d'un captador solar disminueix a mesura que la seva temperatura d'operació augmenta. En aquest sentit, les temperatures màximes d'operació dels captadors plans serien extremadament baixes en relació a les desitjades per a una màquina tèrmica, i l'eficiència del sistema seria molt dolenta si utilitzéssim aquest tipus de captadors. Ens surgeix, doncs, el repte d'aconseguir temperatures de captació elevades sota rendiments raonables. I això, només és possible assolir-ho mitjançant la **concentració**, la qual té un doble objectiu: a) reduir l'àrea de captació per poder disminuir les pèrdues tèrmiques, i b) augmentar la capacitat d'insolació sobre aquesta àrea mitjançant sistemes òptics de concentració. Això ens permet assolir temperatures d'entre 2.500 i 3.000 °C, amb l'únic condicionant de la resistència tèrmica dels materials emprats.

En un captador concentrador s'hi distingeixen dues parts: el **concentrador** i el **receptor**. El concentrador és el sistema òptic que radia la radiació sobre el receptor, on és absorbida per l'absorbidor, que normalment té una o dues cobertes i està convenientment aïllat, per evitar al màxim les pèrdues tèrmiques cap a l'ambient. Com veiem al capítol 3, la concentració es defineix mitjançant la **raó de concentració**:

$$C = \frac{A_{obertura}}{A_{absorbidor}} \quad (7.2)$$

que presenta, en funció del tipus de concentració, un límit teòric màxim donat per aspectes de tipus geomètric i termodinàmic. Per al cas de la concentració lineal (en dues dimensions) aquest límit és de 212, mentre que per a la concentració en un punt (en tres dimensions) pot arribar a 45.000, límits que evidentment estem molt lluny de poder assolir, però que ens donen idea del potencial disponible.

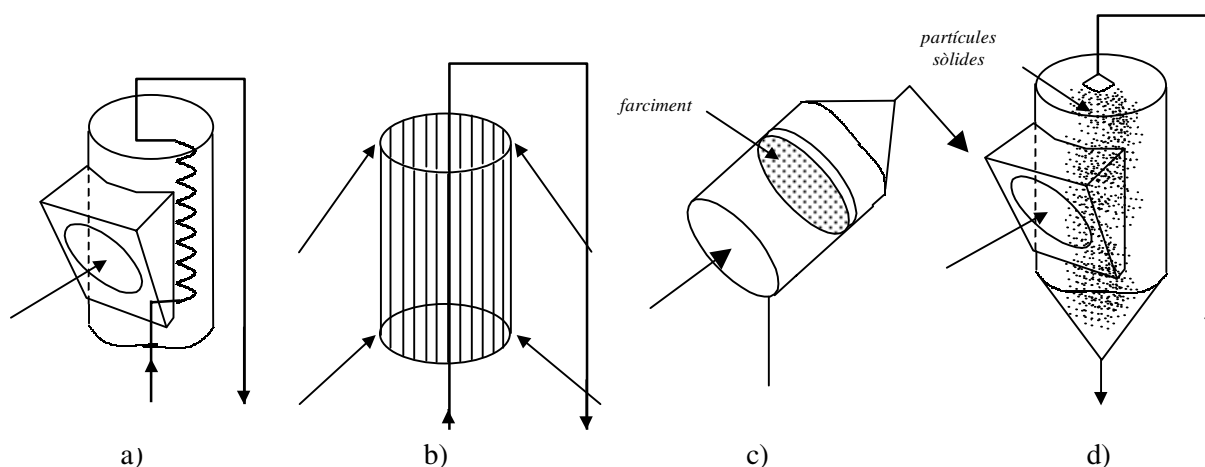
Quant al tipus de concentradors utilitzats a les CST, hi ha tres formes de concentració bàsiques, tot i que podem trobar-ne moltes variants (figura 7.4). Com a exemple de concentració **lineal**, essencialment disposem dels **captadors tronc-parabòlics** o **cilindre-parabòlics**, que només necessiten seguiment en un eix. Com a exemple de concentradors **puntuals**, disposem dels **captadors de disc parabòlic** o **paraboloides** i els **campes d'heliòstats**, en els quals ja es necessita fer un seguiment en els dos eixos.

Tipus de captador		Raó de concentració "C"	Rang de temperatures i potència K i MW	Aplicacions				
Nom	Esquema							
Estacionaris	Llac solar no convectiu		Captadors plans	$C \leq 1$	$300 < T < 360$ $P < 5 \text{ MWt}$	Generació d'energia Calor de procés		
	Captador pla			$C \leq 1$	$300 < T < 500$ $P < 1 \text{ MWt}$	Aire/aigua calent/a Descontaminació fotolítica		
	Xemeneia solar			$C \leq 1$	$300 < T < 400$ $P < 2 \text{ MWe}$	Generació d'energia elèctrica		
	Reflector d'absorció invertit parabòlic compost			$1 \leq C < 3$	$320 < T < 430$	Aire/aigua calent/a i calor de procés		
	Tub de buit		Absorbidors tubulars	$C \leq 1$	$320 < T < 460$ $P < 1 \text{ MWt}$	Aire/aigua calent/a i refrigeració solar activa		
Seguidors	Un únic eix	Reflector parabòlic compost (CPC)			$1 \leq C < 5$	$340 < T < 510$	Calor de procés	
		Reflector cilindre-parabòlic (TPC)			$5 \leq C < 15$	$340 < T < 560$		
	Dos eixos	Refractor Fresnel			$15 \leq C < 40$	$340 < T < 560$		Calor de procés
		Refractor cilíndric			$10 \leq C < 40$	$340 < T < 540$		
				$10 \leq C < 50$	$340 < T < 540$ $P < 100 \text{ MWe}$			
Seguidors	Dos eixos	Reflector de plat parabòlic		Absorbidors puntuals	$100 \leq C < 1.000$	$340 < T < 1.500$ $P < 150 \text{ kWt/unitat}$	Generació d'electricitat	
		Reflector esfèric			$100 \leq C < 300$	$340 < T < 1.500$ $P < 150 \text{ kWt/unitat}$		
		Camp d'heliòstats			$100 \leq C < 1.500$	$400 < T < 3.000$ $P < 200 \text{ MWe}$		

Fig. 7.4 Principals mètodes de captació, absorció i conversió de la radiació solar en energia tèrmica: amb  $C < 3$ , s'aprofita tant la radiació directa com la difusa. Amb  $C > 500$  ja es poden aconseguir temperatures per sobre dels 1.000 °C.

Els conceptes de CST actualment existents són dos. La connexió de captadors, ja siguin cilindres parabòlics o discs parabòlics constitueixen el que s'anomena **camp de captadors** (*farm* en anglès). Les centrals solars que utilitzen aquests camps s'anomenen centrals solars de **captador o receptor distribuït**.

En canvi, les centrals solars que focalitzen la radiació en un punt únic de petites dimensions, situat al cap damunt d'una torre receptora, s'anomenen de **camp d'heliòstats** o de **receptor o torre central**. Una multitud de miralls (heliòstats) reflecteixen la radiació cap aquest punt de recepció únic, on hi ha el receptor que ha d'estar dissenyat per interceptar l'energia entrant, absorbir-la i convertir-la en energia tèrmica a la temperatura requerida per al procés. I tot això aguantant les altes temperatures a les quals està sotmès, sense un desgast excessiu. De fet, els receptors són els elements que més s'estan s'estudien ara per ara en aquest camp de les CST.



<i>Tipus de receptor</i>	<i>Definició</i>	<i>Fluid portador de calor</i>	<i>Fluxe energètic obtingut (kW/m<sup>2</sup>)</i>	<i>Fluxe energètic màxim (esperat) (kW/m<sup>2</sup>)</i>
a) Cavitat	Conducció a través de la paret del tub	Gas Líquid	50 a 100 300	200 900
b) Extern	Conducció a través de la paret del tub	Líquid	800	2.500
c) Volumètric	Convecció des de la paret	Gas Aire ambient	desconegut desconegut	1.000 (2.500)
d) Partícules i líquids	Absorció directa	Partícules sòlides Líquids Mescla reactiva	desconegut desconegut desconegut	(2.500) (2.500) (2.500)

Fig. 7.5 Diagrames esquemàtics de diferents tipus de receptors (entre parèntesis, els valors als quals s'espera arribar).

Els tipus bàsics de receptors utilitzats actualment són quatre (figura 7.5): els de **cavitat**, on la radiació solar que ve en una direcció determinada penetra a través d'una obertura i transfereix la seva energia a un serpentí, metàl·lic o ceràmic, situat a l'interior de la cavitat; els de **tubs exteriors** que poden absorbir la radiació provinent de totes direccions. En els dos casos la transferència de calor al fluid de treball es produeix per conducció a través de les parets dels tubs, en el primer cas amb intensitats de flux inferiors que en el segon, i aquesta és la raó de fer la captació a l'interior d'una cavitat, i evitar-ne les pèrdues. En tercer lloc trobem els **volumètrics**, on una massa porosa (filferros, escumes, planxes plegades en diferents formes...) és l'encarregada d'absorbir la radiació solar i transferir-la ràpidament per convecció al corrent d'aire que hi passa a través. L'avantatge d'aquest sistema és l'absència d'*estrés* tèrmic sobre les soldadures, que és el que determina el cicle de vida dels tubs en els receptors anteriors. I finalment, l'últim concepte de receptor desenvolupat són els d'**absorció directa**, on un fluid, un corrent de partícules o, fins i tot, una mescla reactiva caient per gravetat absorbeixen directament la radiació solar. Els fluxos de radiació que s'espera poder assolir en aquests dos darrers casos és més favorable que en els de tubs; no obstant això, en aquests l'experiència tecnològica ja està molt més consolidada.

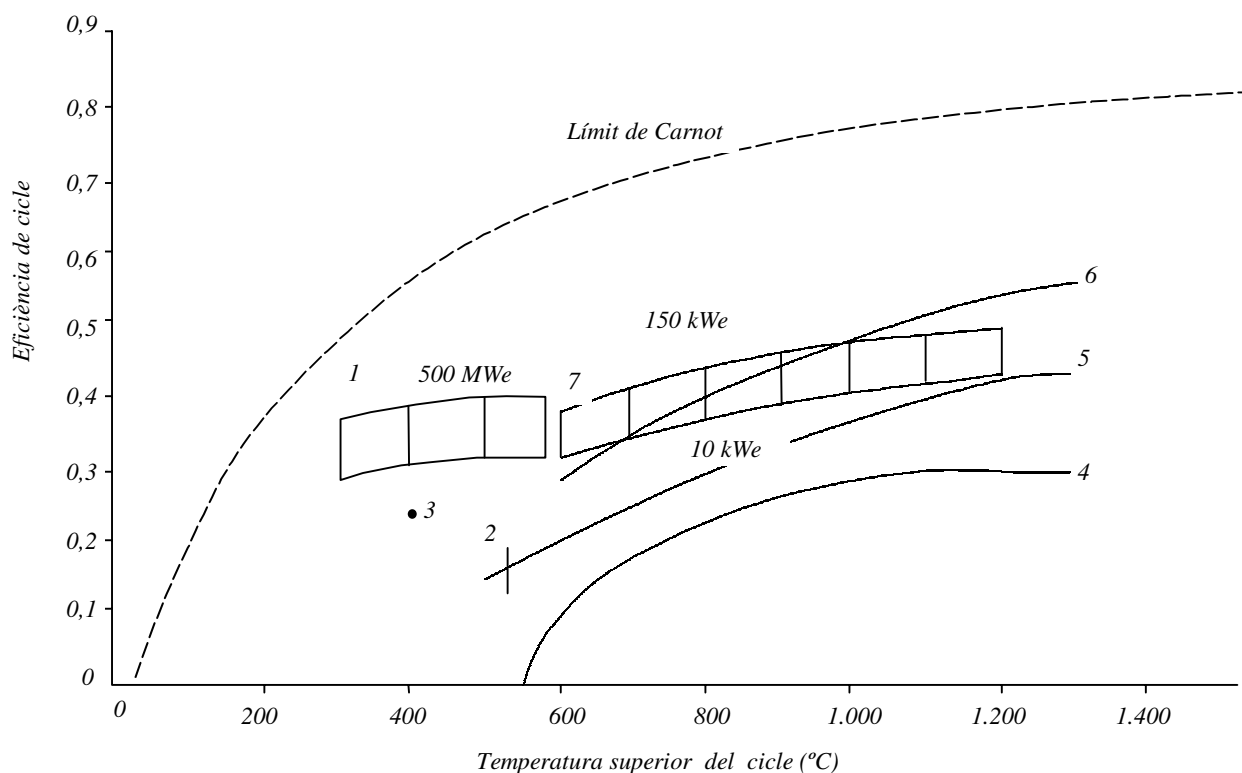


Fig. 7.6 Rendiments de cicles termodinàmics reals ( $T_F = 300\text{ K}$ ): 1) cicle de Rankine amb vapor d'aigua en la gamma dels 300 MW, 2) el mateix de gamma petita, fins a 3 MW; 3) cicle de Rankine amb refrigerants en la gamma dels 100 kW; 4) cicle de Brayton obert sense recuperació de calor; 5) cicle de Brayton tancat amb recuperació de calor; 6) cicle de Rankine combinat amb un cicle de Brayton obert; 7) cicle d'Stirling en la gamma dels 0,4 MW.

Els cicles termodinàmics més utilitzats en els processos de conversió són el **cicle de Rankine** (típic de les centrals tèrmiques convencionals), amb aigua com a fluid treball en un cicle termodinàmic tancat, i el **cicle de Brayton** (típic de les turbines de gas) amb gas, normalment aire, com a fluid de treball en un cicle termodinàmic obert. Aquests cicles termodinàmics són prou coneguts i la seva tecnologia prou desenvolupada com per poder ser aplicats al camp de l'energia solar. No obstant això, cal veure com s'adaptin els diferents elements a les condicions no estacionàries típiques de les CST.



També hi ha, altres tipus de cicles termodinàmics desenvolupats, però per a potències menors ( $< 30$  MW): són el de **Rankine de cicle tancat**, que utilitza fluids frigorífics (HCFC i HFC) com a fluid de treball (**ORC**, *Organic Rankine Cycle*), i el d'**Stirling**, també de cicle tancat, que utilitza un gas com a fluid de treball (heli, hidrogen). A la figura 7.3 es poden veure representats aquests cicles i les seves principals diferències. Les turbines ORC encara no estan prou desenvolupades i resten pendents de l'evolució dels HFC. D'altra banda, els motors basats en cicles d'Stirling o de Brayton, molt indicats per treballar amb fonts de calor exteriors, són candidats ideals per als captadors de disc parabòlic. Però la tecnologia de tots aquests convertidors en l'escala de les petites potències està molt menys desenvolupada que la de les turbines de vapor de les centrals tèrmiques convencionals.

A la figura 7.6 es poden veure les eficiències reals de tots aquests cicles comparades amb el rendiment màxim, donat pel rendiment de Carnot. S'hi pot observar, en relació amb el que acabem de dir, com l'eficiència de les grans turbines ( $>200$  MW<sub>e</sub>) funcionant segons el cicle de Rankine assoleixen valors d'eficiència  $f$  (en relació amb el rendiment de Carnot) de 0,5 a 0,7, en canvi, per a turbines de petita potència ( $<1$  MW<sub>e</sub>) no se sobrepassen valors de 0,3.

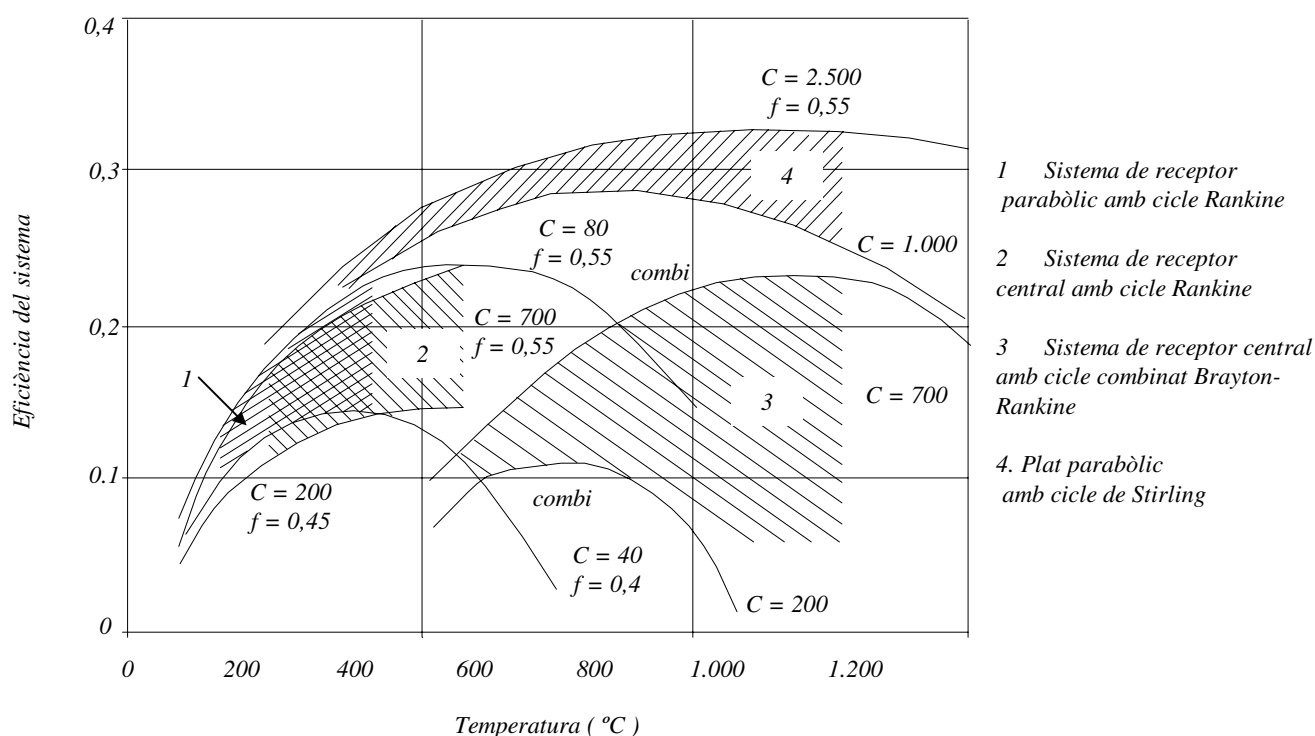


Fig. 7.7 Regions de conversió eficient en funció de la temperatura, per a diferents tipus de centrals solars tèrmiques. Els límits vénen donats per l'eficàcia en la conversió de la radiació en calor, per la concentració assequible o a causa de la temperatura: 1) limitada per la temperatura dels olis tèrmics, 2) limitada pel cost del material a 560 °C, 3) limitada pel cicle de fatiga tèrmica del material, 4) el mateix que 3).

També es pot observar que per assolir, mitjançant el cicle de Brayton (5, a la figura 7.6), les mateixes eficiències assolides per les grans turbines funcionant amb el cicle de Rankine (1), cal treballar amb un rang de temperatures d'entre 300 i 500 °C més. D'altra banda, l'estabilitat tèrmica dels HCFC limita els ORC (3) a treballar per sota dels 300°C. Estipulant la mateixa temperatura de procés per a tots els cicles, el marge més elevat entre els límits superior i inferior de temperatura correspon al cicle d'Stirling (7).

Desafortunadament, només es disposen motors Stirling de potències inferiors als 300 kW<sub>t</sub> o 140 kW<sub>e</sub>, però no hi ha prototipus per a potències superiors. No obstant això, com ja hem dit abans, les aplicacions d'aquestes petites potències amb captadors de disc parabòlic són molt interessants.

Les eficiències de la conversió radiació-calor en els captadors i les del cicle termodinàmic limiten l'eficiència assolible en les CST. Aquestes apareixen dibuixades a la figura 7.7 en forma de regió sota les hipòtesis establertes, i per als tres conceptes tipus de CST (cilindre o disc parabòlic i de torre) combinats amb els tres tipus de cicles termodinàmics emprats normalment (Rankine, combinat i Stirling). El límit superior d'aquestes regions s'ha d'entendre com l'eficiència màxima assumible en condicions estacionàries, que depèn de la temperatura superior de procés, la qual, alhora, ens ve condicionada per la resistència tèrmica assumible, ja sigui pel fluid de treball o pels materials.

Com a exemple de CST, a la figura 7.8 hi ha l'esquema de la central pilot *Solar One* de 10 MW<sub>e</sub> del tipus de torre central muntada a Barstow, Califòrnia, el 1982. Aquest tipus de central ha estat objecte d'R+D a molts països, a causa de la possibilitat de concentrar grans quantitats d'energia sense la necessitat d'una xarxa de transport de l'energia recollida i de les expectatives de la seva rendibilitat. A la taula 7.1 tenim un resum de les CST construïdes en l'àmbit mundial a finals de l'any 1989.

Taula 7.1 Estat de construcció de centrals solars tèrmiques (finals de 1989).

<i>Tipus de planta</i>	<i>Desenvolupada des de</i>		<i>Sistemes instal·lats</i>	<i>Operacionals</i>	<i>En projecte (1993)</i>
<i>Cilindro- parabòlic</i>	1973	<i>Número</i>	15	8	1
		<i>MWe</i>	285	275	80
		<i>m<sup>2</sup></i>	1.799.000	1.789.000	464.000
<i>Receptor central</i>	1973	<i>Número</i>	6	-	1
		<i>MWe</i>	30	-	5
		<i>m<sup>2</sup></i>	117.000	-	40.000
<i>Disc parabòlic (farm)</i>	1977	<i>Número</i>	4	3	1
		<i>MWe</i>	5,38	5,288	4,88
		<i>m<sup>2</sup></i>	35.672	34.547	-
<i>Disc parabòlic (motor Stirling)</i>	1977	<i>Número</i>	15	3	1
		<i>MWe</i>	6,9	0,125	50
		<i>m<sup>2</sup></i>	50.200	540	-

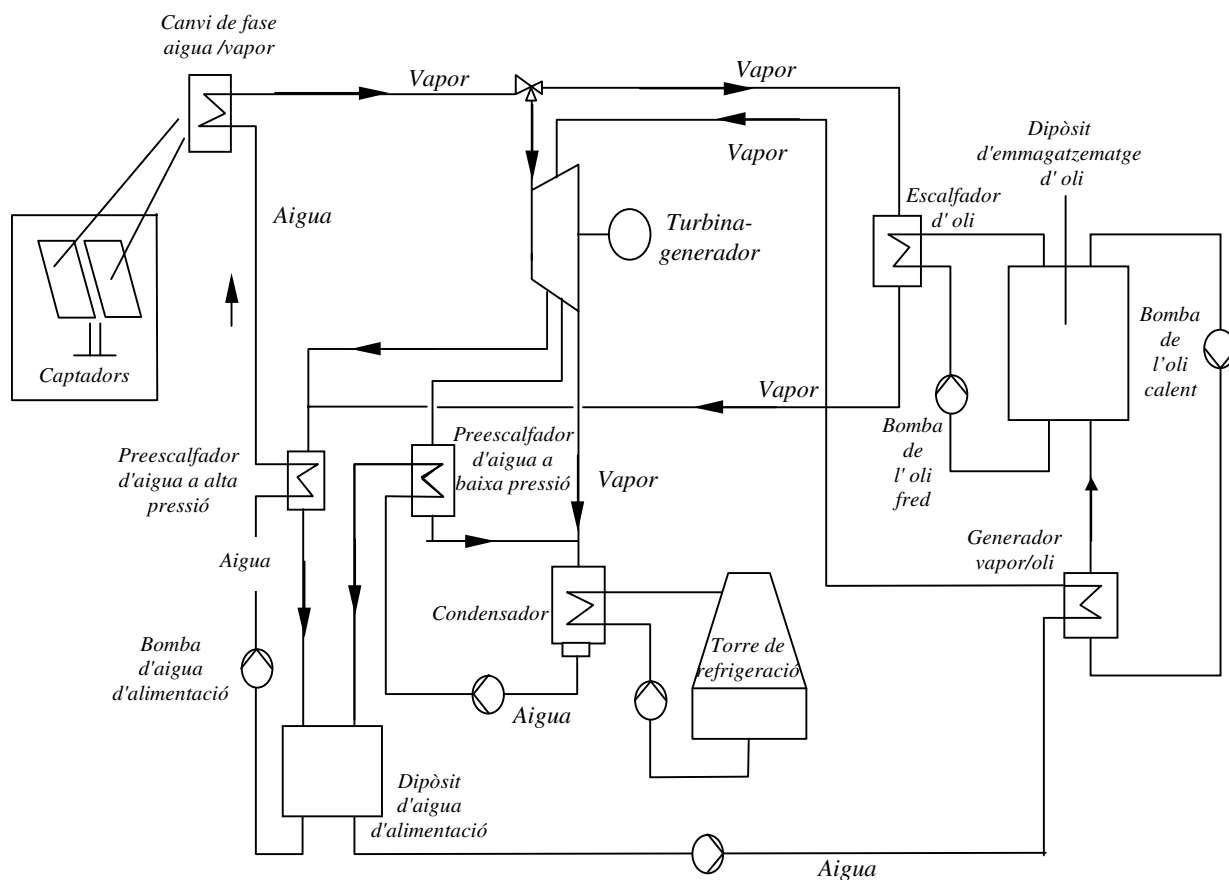


Fig. 7.8 Esquema del principi de funcionament de la CST pilot Solar One, a Barstow, Califòrnia

### 7.3 Centrals solars fotovoltaïques

El concepte en què s'han desenvolupat les CSF és anàleg al de les CST de receptor distribuït, es a dir, l'energia solar és captada per petites unitats que formen un camp de captadors. La seva configuració és modular i aquests mòduls es disposen sobre estructures de suport i es connecten elèctricament formant bateries. Si no s'utilitza concentració es disposen fixos amb una inclinació equivalent a la de la latitud del lloc. Si la concentració surt econòmicament rendible llavors s'haurà de fer seguiment en un o dos eixos; aquest és el cas quan s'utilitzen lents de Fresnel de petita distància focal.

La unitat de captació és la cèl·lula fotovoltaica, que ja hem vist en altres parts d'aquest llibre. L'avantatge, en aquest cas, rau en la possibilitat de la interconnexió de cèl·lules des de potències d'alguns mW fins a diversos MW. Una altra gran diferència respecte a les CST és que, en aquest cas, la conversió de la radiació en electricitat és directa (sense passar per la limitació que imposa el rendiment de Carnot a tot cicle termodinàmic) i es produeix en el mateix lloc de captació.

Altres avantatges de la conversió fotovoltaica són els següents:

- El llindar d'estimulació és molt baix, així ja s'aprofita un mínim de radiació.
- No és necessària la concentració i, per tant, les parts mòbils; no produeix soroll, ni emissions i el seu manteniment és mínim.
- S'aprofita la radiació difusa amb gairebé la mateixa eficàcia que la directa.

Els únics inconvenients, ara per ara, són l'eficiència de conversió i el cost. Amb totes aquestes consideracions podem veure les diferències bàsiques entre els dos tipus de centrals.

### **Centrals solars fototèrmiques**

- Només aprofiten la radiació directa, la qual cosa en limita l'ús a latituds d'entre  $\pm 30$  i  $40^\circ$ .
- Es poden assolir potències d'entre 100 kW<sub>t</sub> (paraboloides) i alguns centenars de MW<sub>e</sub> (centrals de torre).
- Possibilitat d'emmagatzematge en forma d'energia tèrmica, que possibilita l'estabilitat de la producció i, fins i tot, la producció durant les 24 h.
- Possibilitat de centrals solars híbrides amb suport de combustibles fòssils o nuclears.
- El seu cost va baixant: al 1987 estava entre 2.000 i 3.000 dòlars/kW<sub>e</sub> i el preu de producció entre 0,08 i 0,11 dòlars/kWh<sub>e</sub>, i s'assolien eficiències mitjanes anuals del 15% i instantànies d'entre el 20 i el 25%, amb un factor d'operació d'entre 3.000 i 3.500 h/any.

### **Centrals solars fotovoltaïques**

- L'aprofitament de la radiació global no en limita l'ús a cap zona geogràfica. No obstant això, si volem fer concentració de cara a augmentar-ne l'eficiència, perdem aquest avantatge.
- Potències des d'alguns kW<sub>e</sub> fins a 1.000 MW<sub>e</sub> o més.
- No hi ha possibilitat d'emmagatzematge.
- Al 1987 el seu cost d'implantació estava entre els 7.500 i 10.000 dòlars/kW<sub>e</sub>, i el cost de producció, entre els 0,3 i 0,5 dòlars /kWh<sub>e</sub>.
- La seva eficiència anual oscil·la entre el 6 i el 8%, i s'espera arribar a valors d'entre el 20 i el 25% amb estructures de cèl·lula solar més complexes.
- El seu factor d'operació és d'unes 2.500 hores/any.

Com a conclusió podríem dir que les **CST** són l'avui i el demà, però les **CSF** semblen el futur. No obstant això, les primeres tenen alguns avantatges que no podran assolir mai les segones: cogeneració, emmagatzematge i conversió fotoquímica.

## **7.4 Centrals solars químiques**

Malgrat que encara no s'ha arribat al punt en què els reactors químics es puguin acoblar amb les centrals solars tèrmiques, les expectatives són molt favorables. La investigació en aquest camp s'ha anat adreçant cap al sector de l'alta concentració d'energia per afavorir la química solar endotèrmica: els processos químics que necessiten energia per a la seva realització i que l'emmagatzemen en els productes de la reacció. En aquest sentit, les centrals solars químiques (CSQ) poden proporcionar energia a temperatures que van des dels 1.000 °C fins als 3.000 °C, suficient per a quasi qualsevol procés químic conegut. El problema principal és, com sempre en el cas de l'energia solar, la intermitència d'aquesta energia i la necessitat d'un emmagatzemament adequat i suficient.

En essència, l'energia solar pot intervenir en totes les reaccions químiques que impliquin algun tipus d'**assecatge**, **deshidratació** o **calcinació** (p. ex., obtenció d'òxids de titani, alumini o sodi a partir dels hidròxids o carbonats naturals), **reducció** (p. ex., obtenció d'elements purs a partir dels òxids naturals) o **destil·lació** i **cracking** (p. ex., obtenció de derivats del cru de petroli i fragmentació de les cadenes orgàniques més llargues). D'altra banda, també podem trobar aplicacions en la indústria de la producció dels elements de construcció com totxanes, guix, ciments, metalls i vidres o elements ceràmics.

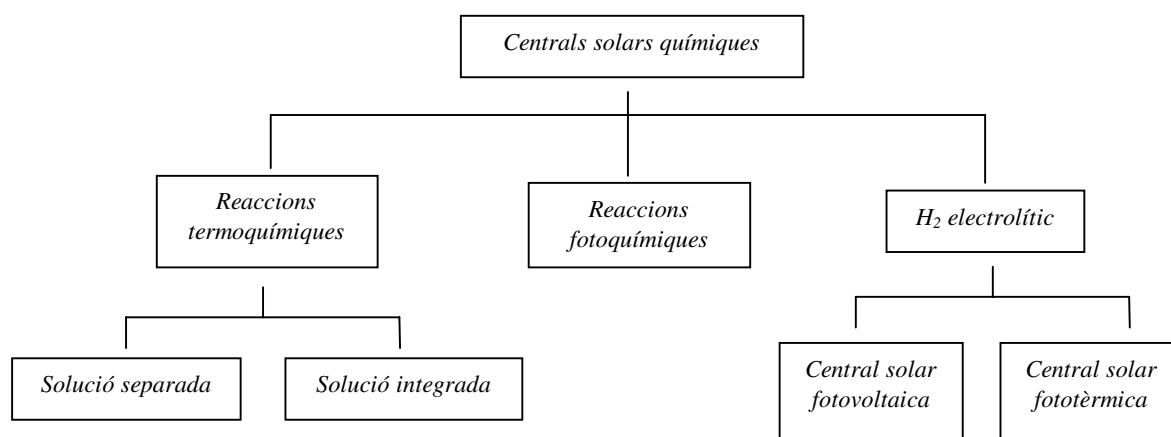


Fig. 7.9 Processos de conversió de l'energia solar.

El ventall de possibilitats que ofereix l'aprofitament de l'energia solar en l'àmbit químic ve reflectit a la figura 7.9. Com es pot veure, podem trobar CSQ bàsicament treballant amb tres tipus de reaccions.

#### a) Reaccions termoquímiques

De solució separada, en què l'energia solar és la font de calor que substitueix els combustibles fòssils, o de solució integrada, en què la conversió solar i la reacció química esdevenen en el reactor que és a la vegada receptor.

Els reactors químics es classifiquen segons el tipus de procés que desenvolupen. Bàsicament hi ha dos tipus de processos: en *batch* o en continu. El procés en *batch* opera en cicles i de forma discontinua: primer s'ha de carregar el reactor amb els reactius corresponents i un cop ha finalitzat la reacció es retiren els productes. Dels dos, aquest és el més apropiat per a l'adopció en la tecnologia solar. Aquesta connexió entre l'energia solar i el procés químic implica que el reactor s'hagi d'integrar en el receptor solar, de manera que els nous reactors són ara **reactors-receptors**. Actualment s'investiguen tres tipus d'aquests reactors-receptors:

- **reactors-receptors tubulars**, en els quals trobem els elements del reactor directament atacats per la radiació solar dins de la cavitat del receptor.

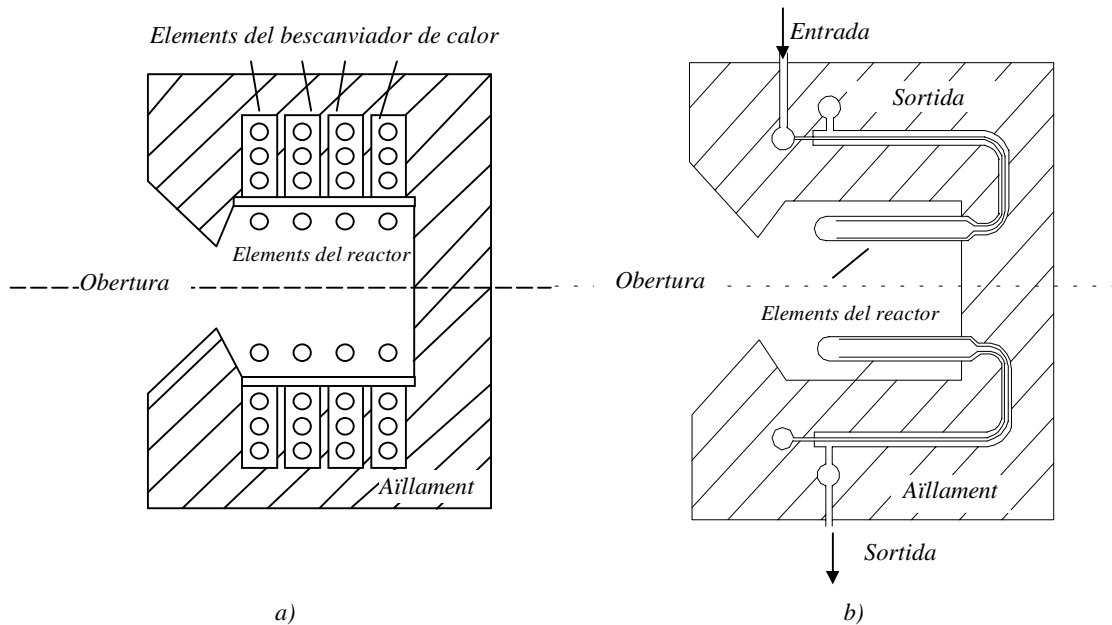
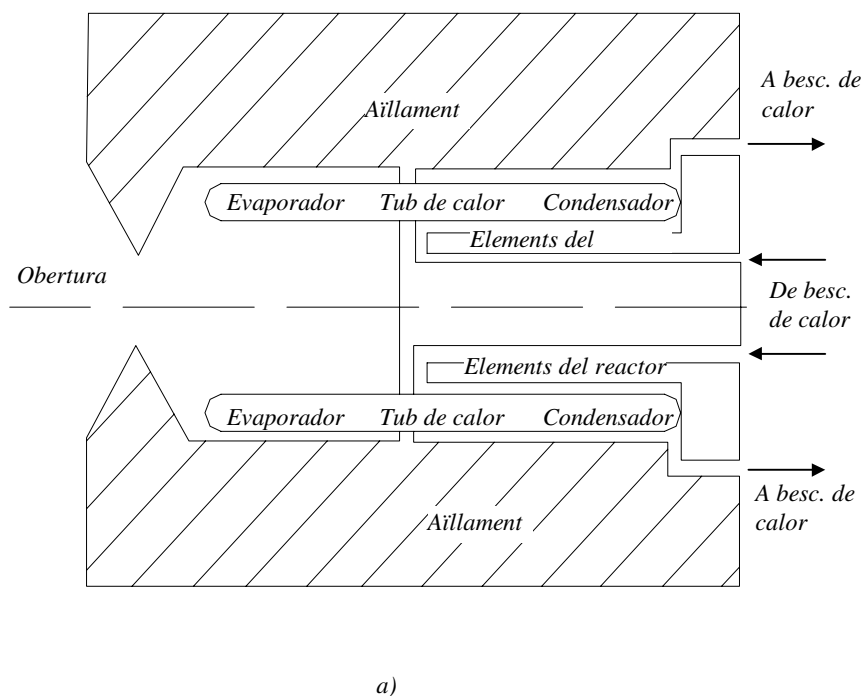
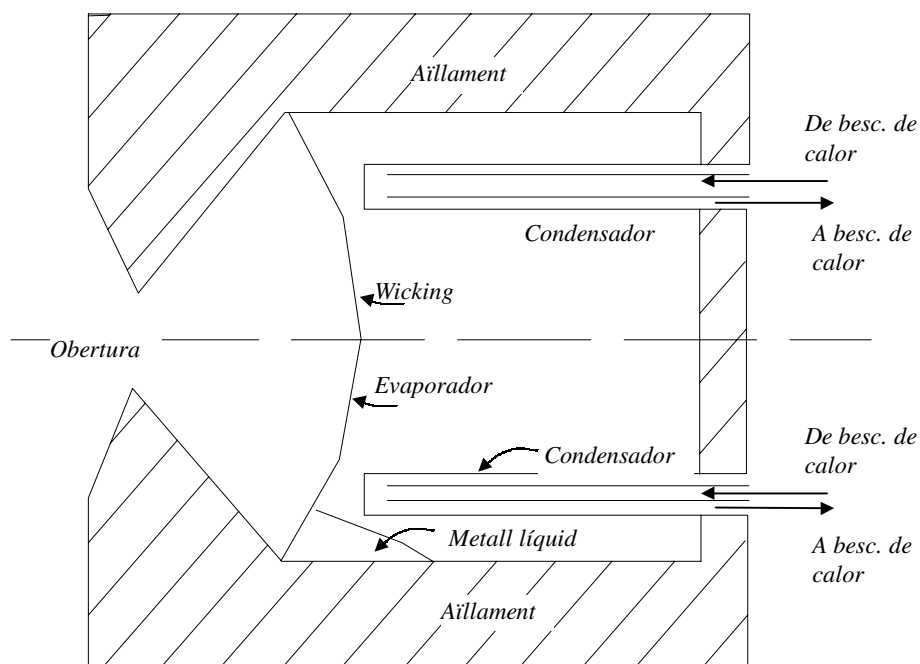


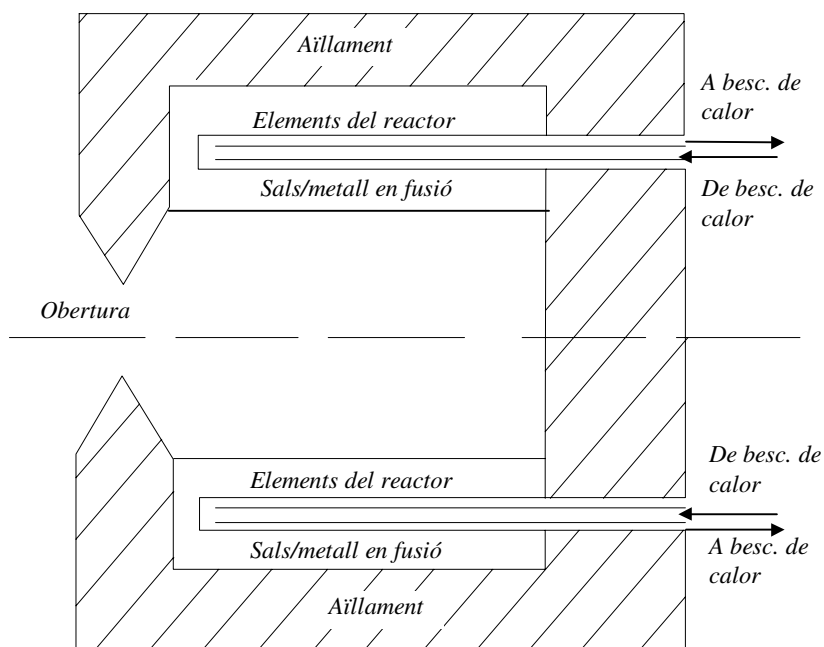
Fig. 7.10 Diagrama esquemàtic dels reactors-receptors tubulars: en disposició espiral (a) i axial (b).

- **reactors-receptors indirectes**, que utilitzen un fluid portador de calor intern per transferir l'energia des de la zona de captació a la de reacció. Entre moltes possibilitats, les investigacions s'han centrat en l'ús de les sals foses i els metalls líquids, com a fluid de treball.





b)



c)

Fig. 7.11 Diagrama esquemàtic dels reactors-receptors indirectes: de tub de calor (a), de reflux (b) i de material fos (c); (besc. vol dir bescanviador).

- **reactors-receptors d'absorció directa**, que absorbeixen la radiació solar directament a sobre de la superfície dels reactants sòlids. L'absorció de la radiació i la reacció química no resten espacialment separades i, en aquest cas, cal una finestra amb un medi transparent per tal de permetre l'entrada de la radiació i que eviti la pèrdua de matèria cap a l'ambient.

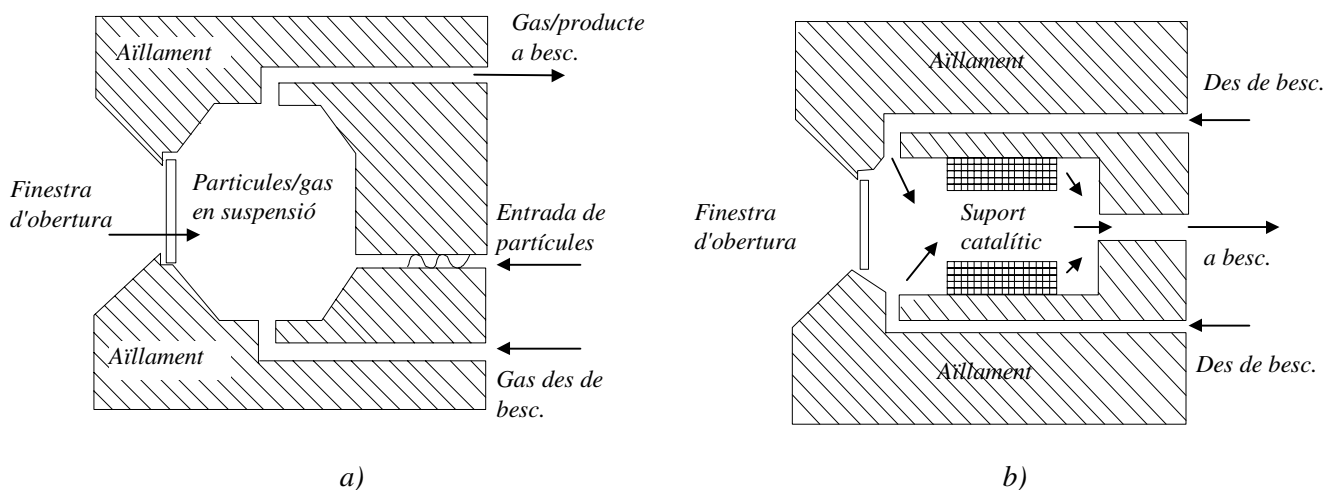


Fig. 7.12 Diagrama esquemàtic dels reactors-receptors d'absorció directa: a) de partícules i b) matricial.

## b) Reaccions fotoquímiques

En aquest tipus de reactors s'aprofita l'energia dels fotons perquè passi directament a energia química, sense el pas a energia tèrmica. Són en els que darrerament s'ha centrat la recerca, perquè s'han pogut identificar els mecanismes mitjançant els quals els fotons catalitzen les reaccions químiques. Això implica que aquestes tinguin lloc amb més eficiència i a més baixa temperatura.

## c) Hidrogen electrolític

Finalment, tenim les centrals que ens permeten obtenir el que es coneix com **hidrogen electrolític**. En aquest cas, les centrals poden ser termoelèctriques o bé fotovoltaïques, però la finalitat no és l'obtenció de l'electricitat en si, sinó com a energia de transició per a la descomposició electrolítica de l'aigua, per obtenir un combustible no contaminant com és l'hidrogen.

Alguns dels avantatges que presenta l'hidrogen com el combustible del futur són els següents:

- A diferència de la calor o l'electricitat, és fàcilment acumulable.
- Per a distàncies mitjanes i llargues és més barat de transportar fins i tot que l'electricitat, i per fer-ho es poden aprofitar els gasoductes actuals.
- És, al mateix temps, matèria primera per a la indústria química.
- Es pot convertir en calor, electricitat i combustible per a tot tipus de mitjà de transport.
- I potser la més important de totes: el seu caràcter és totalment cíclic (aigua-H<sub>2</sub>-aigua).



