

Energia solar tèrmica

Martí Rosas Casals

Jaime Cendra Garreta



Energia solar tèrmica

Martí Rosas Casals
Jaime Cendra Garreta



Primera edició: febrer de 2001
Reimpresió: setembre de 2004
Segona edició: febrer de 2005
Tercera edició: maig de 2013

Disseny de la coberta: Ernest Castellort

© Els autors, 2001

© Edicions UPC, 2001

© Iniciativa Digital Politècnica, 2013

Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC

Jordi Girona 31,

Edifici Torre Girona, Planta 1, 08034 Barcelona

Tel.: 934 015 885

www.upc.edu/idp

E-mail: info.idp@upc.edu

Dipòsit legal: B. 12323-2013

ISBN: 978-84-7653-978-1

Qualsevol forma de reproducció, distribució, comunicació pública o transformació d'aquesta obra només es pot fer amb l'autorització dels seus titulars, llevat de l'excepció prevista a la llei.

Índex

1. Les energies renovables

- 1.1. L'estat actual del món
- 1.2. Eficiència i estalvi d'energia
- 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

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)

5. Comportament a llarg termini dels sistemes fototèrmics

- 5.1. Estimació de les necessitats 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

7. Centrals solars

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

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 hereus 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 (és a dir 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 hereus 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 CO₂ més elevada que la produïda cremant gas o petroli. A més, les emissions de residus de la combustió, com els derivats nitrogenats (NO_x) 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 CO₂ de les gasolines suposa la cinquena part del CO₂ 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 m³ de cru al dia, que es podria emmagatzemar en un cub de 2,2 km d'aresta. El seu consum ha provocat, entre d'altres, les majors contaminacions de la història per vessament incontrolat al mar (Exxon Valdez, Prestige,...), guerres (del Golf, Afganistan, Iraq,...), disputes territorials internacionals (Antàrtida, Mar de la Xina...) i crisis mundials (la primera tan enllà ja com al 1973).
- El "nou combustible verd" és el gas natural, 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 Idil·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)

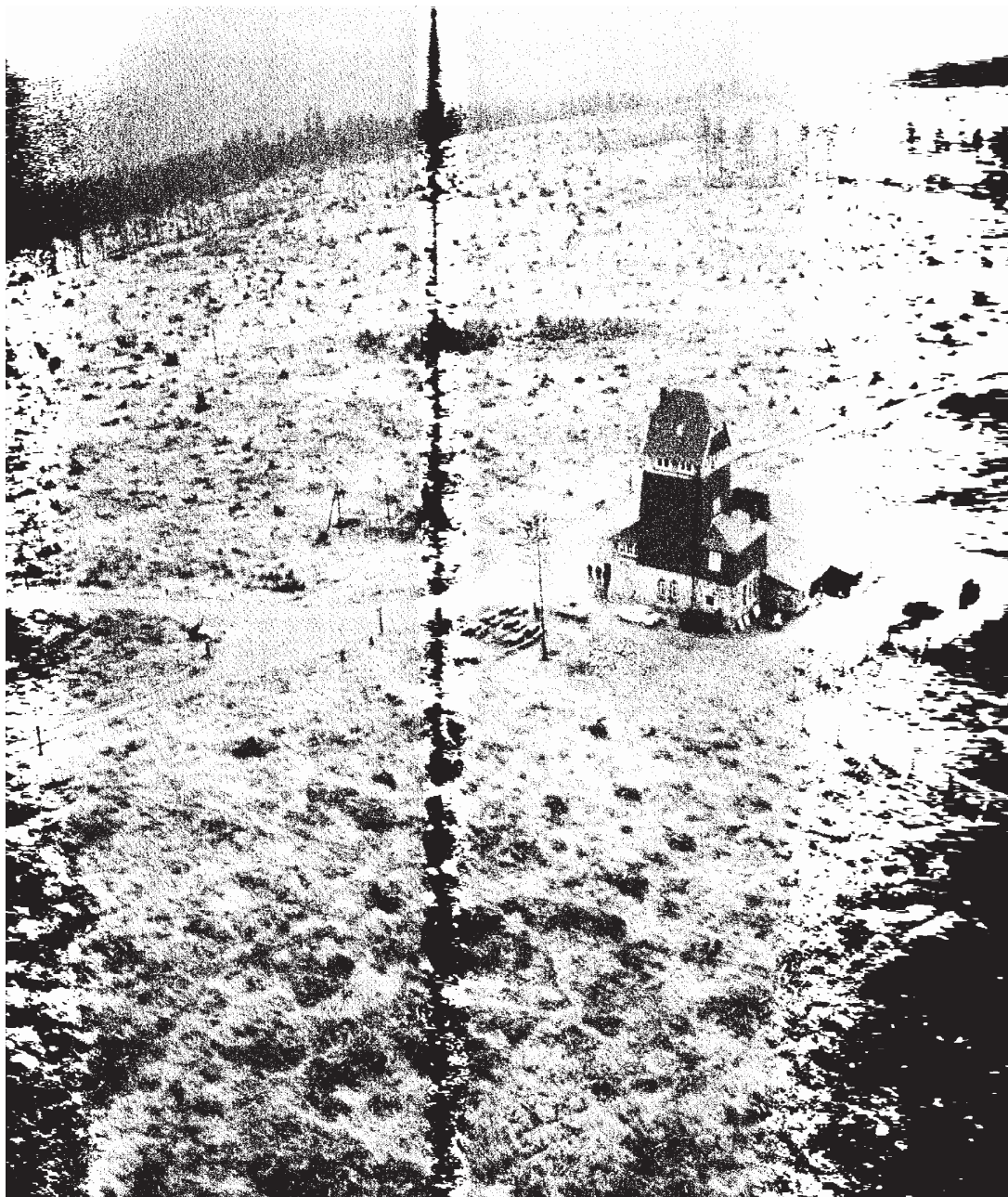


Fig. 1.2 L'hostal Hanskühnenburg es troba al 1983 al cim d'una muntanya pelada. Els gasos emesos en grans quantitats a tot el país per les xemeneies de la indústria, les cases particulars i els tubs d'escapament dels cotxes, han contaminat l'atmosfera i han fet emmalaltir els avets del Harz. La sequera 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 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).

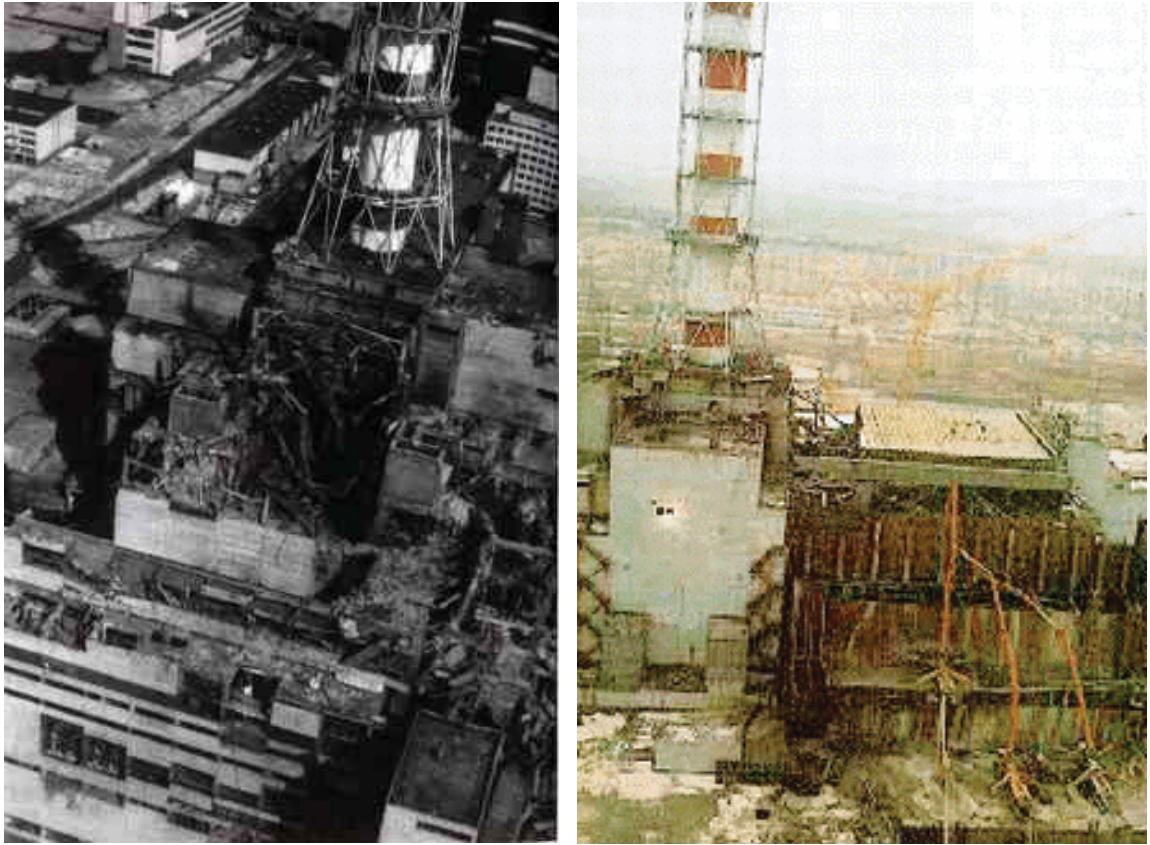


Fig. 1.3 25 d'abril de 1986: desastre nuclear a la central atòmica soviètica de Txernòbil, a 130 km de Kíev, la capital d'Ucraïna. Com a conseqüència d'una manipulació equivocada d'un dels enginyers, una secció del bloc 4t del reactor es comença a escalfar ràpidament, falla el sistema d'aigua de refrigeració 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'estronci 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 fissió, amb més de 400 centrals en funcionament actualment. És costosa, perillosa, 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 fugites radioactives ignorades pels governs involucrats. La fusió és un nou camí. Però no elimina el problema dels residus.

Tot i que les conseqüències d'aquestes tendències exposades es fan paleses ja a principis de la dècada dels anys 1970, amb la Crisi del Petroli, el món Occidental encara no s'ha adonat de fins a quin punt depèn de les energies fòssil i de com el consum incontrolat de petroli, carbó, gas i urani, no tan sols provoca canvis i deterioraments seriosos del medi ambient sinó també desequilibris en les economies dels països cosa que porta a diferències econòmiques i socials i l'esclat de tensions de tot tipus.

Cal, doncs, trobar vies alternatives per al desenvolupament energètic mundial que es basin essencialment en tres eixos:

- L'estalvi d'energia i recursos
- L'augment de l'eficiència energètica
- La diversificació de les fonts energètiques.

1.2 Eficiència i estalvi d'energia

Tenint en compte que allò que volem no és "energia" sinó els serveis que aquesta ens subministra, un primer pas essencial a donar en la lluita contra la crisi mediambiental i energètica que estem patint és, per sobre de tot, el de millorar els actuals processos de producció, transport i consum d'energia afavorint l'ús més eficient del combustible utilitzat i augmentant l'estalvi del mateix.

Actualment, la majoria de centrals tèrmiques treballen amb uns rendiments globals 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 amb tècnica de *llit fluiditzat*, injectant vapor, oxigen o aire dins de la cambra de combustió, a la figura 1.4) i a partir de la *cogeneració*, per exemple, 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 l'ambient (*procés de cap*).

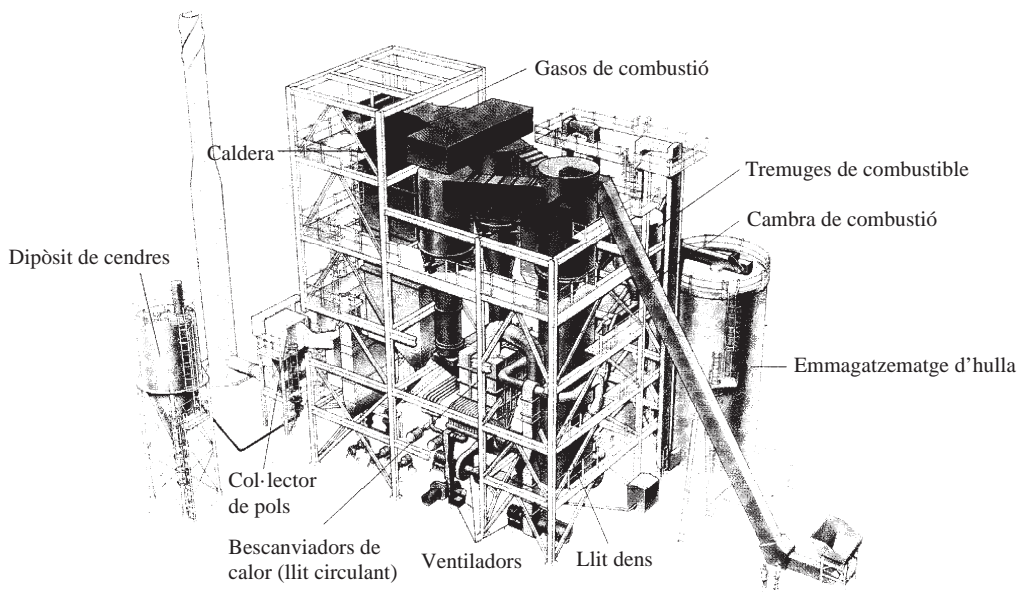


Fig. 1.4 En els sistemes de combustió de llit fluiditzat, partícules de combustible i d'altres materials "suren" i circulen en corrents d'aire. La figura mostra una caldera de llit circulant de Power Products (Foster Wheeler) al Regne Unit. Partícules de pedra calcària, sorra i cendres viatgen de la cambra de combustió al bescanviador de calor, on transfereixen 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 cambra 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).

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), podrem 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 teòrics pròxims al 100% (tot i que actualment no es va més enllà del 65% i a nivell de laboratori).

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).

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, per posar tant sols algun exemple.

És en aquest sentit que cada cop es parla més de l'arquitectura bioclimàtica com a un tipus d'arquitectura que 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.

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 cada cop existeixen més exemples d'aplicació dels conceptes bioclimàtics i de sostenibilitat en el disseny i la construcció dels edificis mitjançant la utilització d'electrodomèstics eficients, el màxim aprofitament de la llum natural, la utilització de llum artificial amb bombetes fluorescents compactes

de baix consum, el subministrament d'aigua calenta i electricitat per energia solar, la utilització de sistemes aïllants amb fibres naturals, etc.

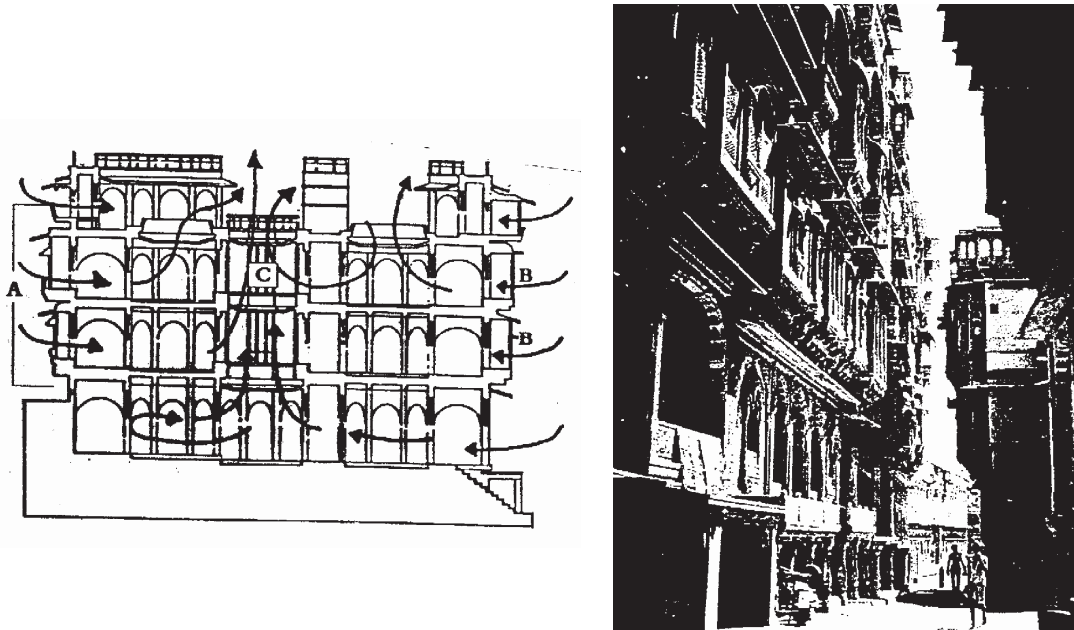


Fig. 1.5 Els conceptes d'arquitectura bioclimàtica es poden aprendre de la tradició històrica: es tracta de redescobrir què feien els nostres avantpassats a l'hora de construir els seus habitatges. Per exemple, els havelis de Jaisalmer, població de l'oest de l'Índia situada enmig del desert de Thar, 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).

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'abastament 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, fins i tot les energies fòssil). 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.

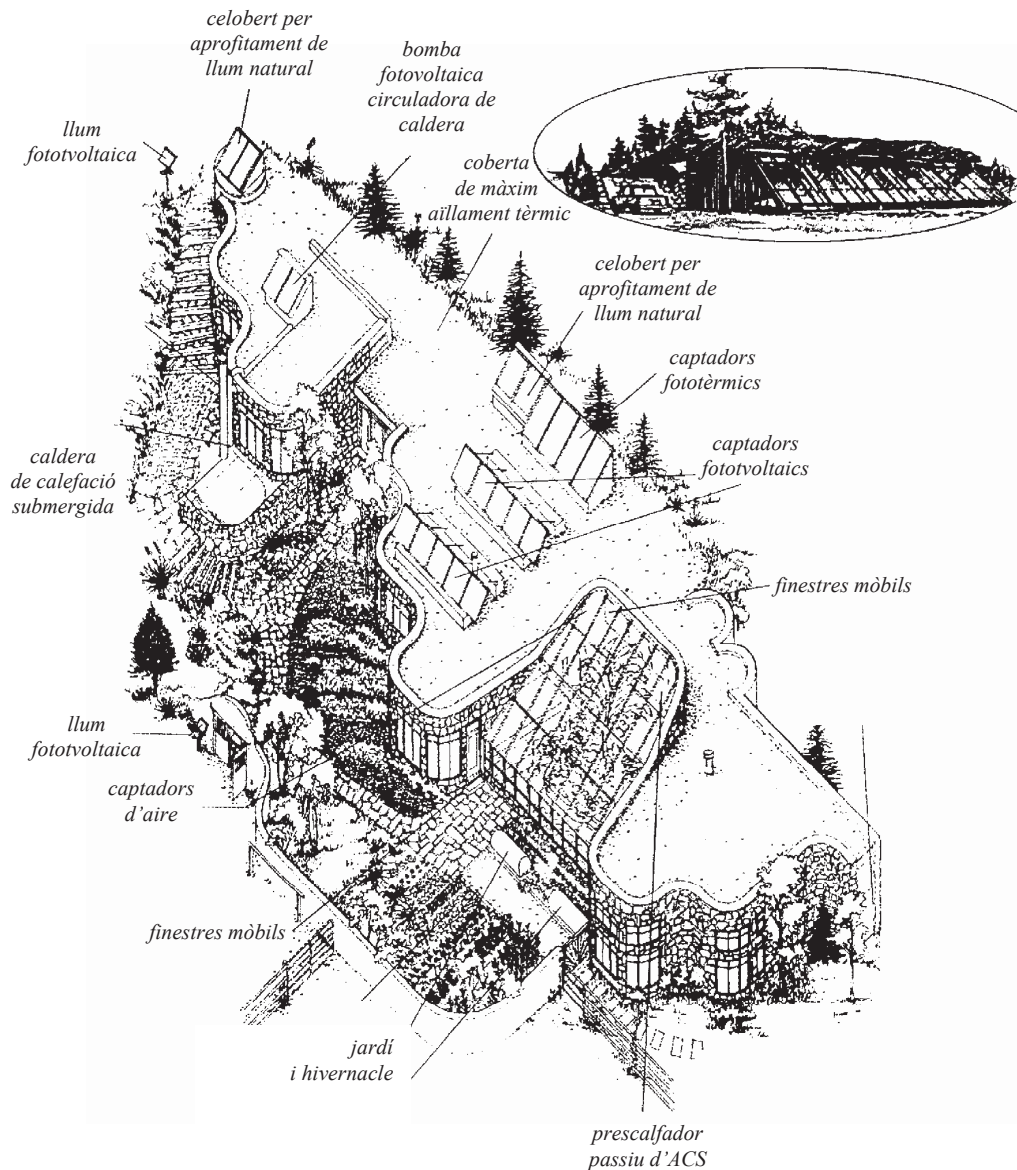


Fig. 1.6 L'aplicació de conceptes bioclimàtics a l'arquitectura comença als anys setanta. La figura superior mostra un dels primers dissenys. La figura inferior és la seu de l'Institut Rocky Mountain, a Aspen, Colorado, dissenyat per Steven Conger i l'Aspen Design Group. Aquesta edificació s'ha convertit 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).

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.

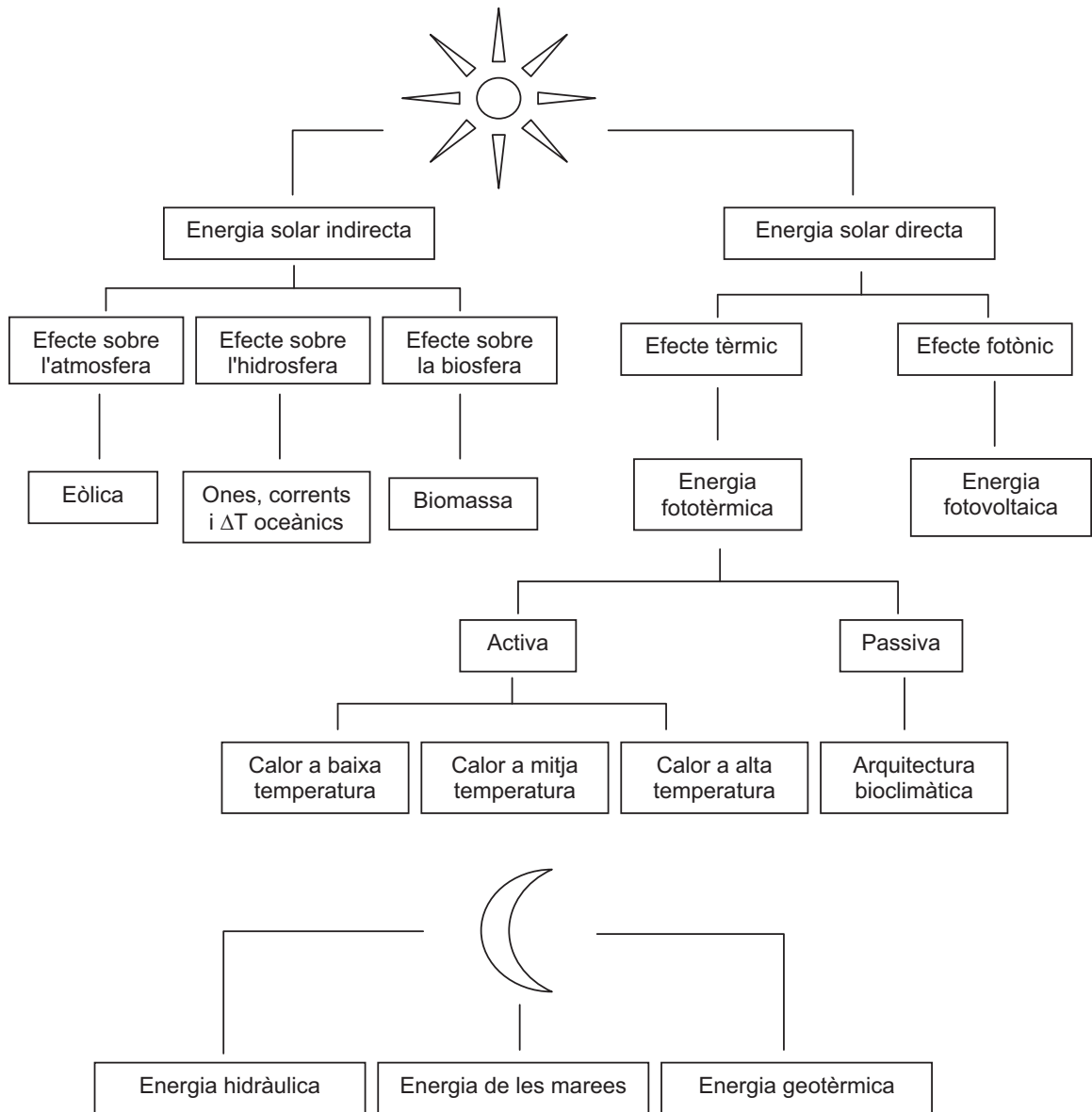


Fig. 1.7 Les energies renovables d'origen solar i no (tan) solar (ja que, de fet, tot prové del Sol).

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. 1.8 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 Pass, 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 el generador eòlic (figura 1.9). Un generador eòlic és essencialment un rotor amb àleps o pales, 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 65 metres (diàmetre del rotor de la turbina de 130 metres) en generadors de potència nominal¹ de 4,5 i 5

¹ La potència eòlica nominal unitària creix de forma constant. Aquestes són dades de 2003.

MW (Enercon, REpower). En aquests casos, les pales són fetes de resines epoxi reforçades amb fibra de vidre i la barqueta, que té dimensions suficients com per què hi aterri un helicòpter i un pes total que pot arribar a les 500 tones, és de fibra de vidre. Les torres poden arribar als 100 metres d'alçada i es construeixen de xapa d'acer i formigó per suportar el pes del conjunt.

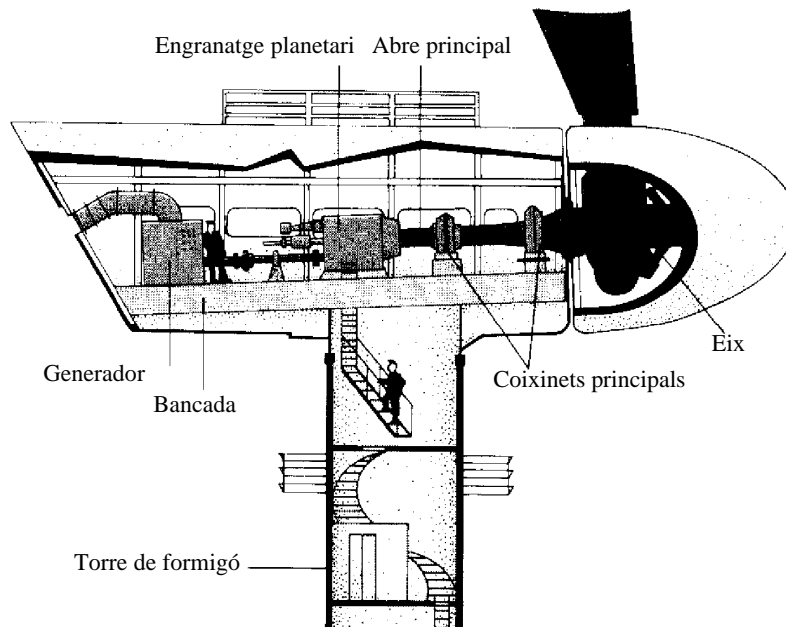


Fig. 1.9 Secció transversal a una turbina eòlica de 2 MW (1988) muntada sobre una torre de 57 m. Les figures humanes situades a la torre i la barqueta permeten fer-se idea de la mida del molí de vent (Font: I/S Vestkraft, Esbjerg, Dinamarca).

Les pales 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 generador eòlic produeix electricitat a partir de 4,5 m/s (16 km/h) i aconsegueix la màxima producció entre els 15 i 25 m/s (uns 90 km/h). Per tal que capti la màxima energia, les pales 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.

Malgrat una oposició cada cop més gran de certs sectors socials pels efectes sobre el medi i la tendència especulativa generada per la gestió dels nous parcs eòlics, els 1.493 MW eòlics instal·lats a l'estat espanyol durant 2002 (figura 1.10) el situaven com a segona potència mundial en l'ús d'aquesta tecnologia amb un total de 4.830 MW en xifres absolutes, darrera d'Alemanya (12.000 MW) i per davant d'Estats Units (4.685 MW) i de Dinamarca (1.850 MW).

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 CO₂) 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.

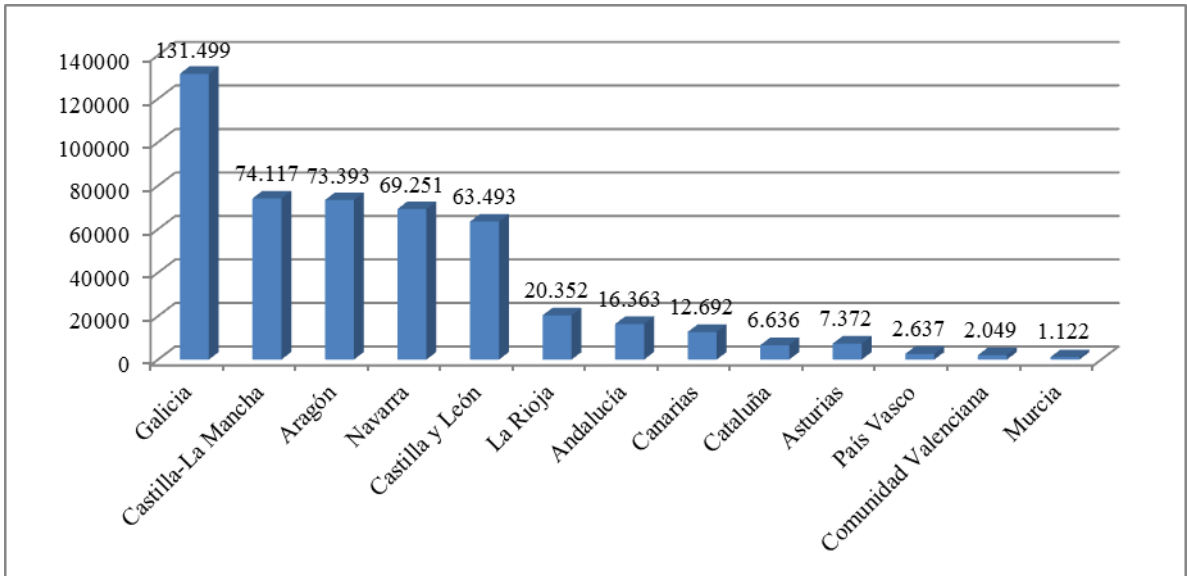


Fig. 1.10 Potència eòlica instal·lada per comunitat autònoma, a 31.12.02, en MW. (Font: APPA).

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

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: mareas, ones, corrents i gradients tèrmics.

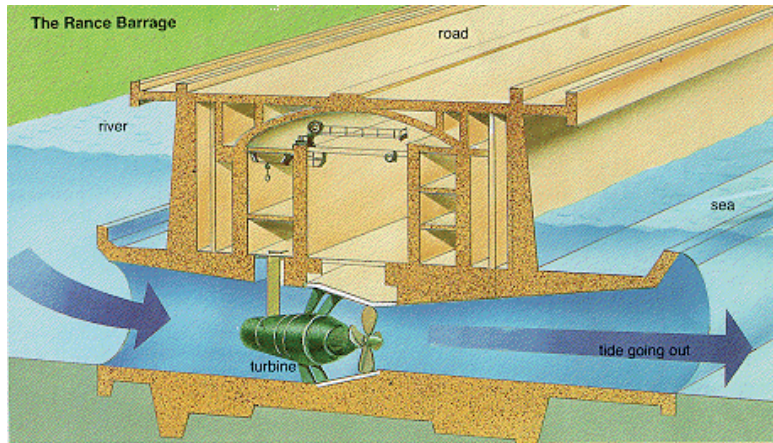


Fig. 1.11 Esquema del principi de funcionament de la presa de mareas a l'estuari bretó de La Rance. (Font: Agence Explorer, París, França).

L'aprofitament de les mareas en zones amb estuaris que en permetin l'existència no és pas nou i trobem molins de marea en molts punts de la costa Europea. El principi d'aprofitament és força senzill: barrar el pas de l'aigua en ambdós sentits de moviment, el de pujada i el de baixada, mitjançant una presa per aprofitar la diferència de cotes per moure una turbina hidràulica (figura 1.11). Donat que l'amplitud de la marea ha de ser de com a mínim uns 5 metres, l'única central elèctrica a gran escala basada en mareas que funciona a Europa (des de 1966) aprofita mareas de 13 metres a l'estuari bretó de La Rance, prop del Mont-Saint-Michel. Les seves vint-i-quatre turbines de 10 MW es combinen amb un sistema de bombeig que permet optimitzar la producció elèctrica al bombejar aigua de la part baixa a la part alta per obtenir un major salt d'aigua.

L'aprofitament de les ones es pot fer de formes diferents. Històricament, el primer mètode d'aprofitament de l'energia de les ones ha estat el de direccionar l'onada per aprofitar un volum d'aire que empès per la mateixa es faci passar a través d'una turbina eòlica que giri en el mateix sentit, independentment del sentit de circulació de l'aire (això és, de si l'onada avança o recula). És un mètode molt limitat pels efectes geogràfics doncs la utilització de les columnes oscil·lants precisa de zones rocoses prou segures i a la vegada prou exposades, com per què l'aprofitament de l'energia de les onades xocant amb la terra es pugui aprofitar. Al gener de 2001 es va acabar de construir a l'illa escocesa de Islay, la primera central d'energia de les onades del món (figura 1.12). La màquina té una potència nominal de 500 kW, capaç de proveir d'electricitat a 400 llars. La planta estarà operativa, segons fonts de les companyies propietàries al menys, durant els pròxims 15 anys.



Fig. 1.12 Imatge de la central construïda a l'illa de Islay coneguda per projecte LIMPET (Land Installed Marine Powered Energy Transformer) i desenvolupat conjuntament per l'empresa Wavegen i la Queen's University de Belfast. (Font: Wavegen, Regne Unit).

Encara molt reclòs en l'àmbit de laboratori i de forma experimental es troben sistemes convertidors d'energia de les ones i/o onades a mar oberta (com el rai Cockerell, el rectificador Russel, etc.), generalment basats en l'aprofitament del moviment de cossos oscil·lants mitjançant bombes hidràuliques, encara que el desenvolupament tècnic i comercial és encara en bolquers.

Així mateix trobem l'aprofitament dels corrents marins mitjançant les turbines submergides en corrents ràpids. El problema principal és el de la situació i col·locació de les turbines, sobre el llit marí, però a profunditats de més de 30 metres fet que encareix molt aquests sistemes.

Per últim, es pot utilitzar 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) com mostra la figura 1.13. Amb cicle d'amoniac, centrals experimentals en zones tropicals han proporcionat potències de fins a 64 MW.

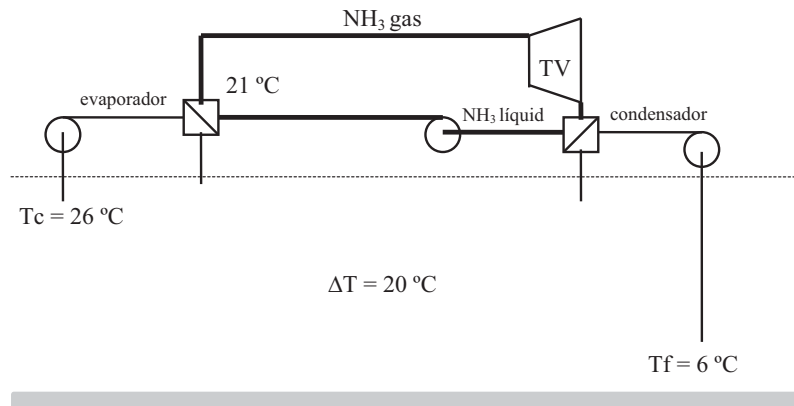


Fig. 1.13 Esquema d'una central termotàssica.

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:

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

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 anaeròbia, la gasificació, la fermentació alcohòlica i, finalment, obtenir-ne gasos (metà) o fluids combustibles (alcohols o fueloils). A més, la biomassa és l'única font d'energia que dona un balanç favorable de CO₂ perquè la matèria orgànica és capaç de retenir durant el seu creixement més CO₂ del que s'allibera en la seva combustió.

Actualment, i a causa de la gran massa forestal existent, 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 i Canadà, 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 aconseguix 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 bio-olis carburants (per a motors dièsel en substitució del gasoil), biomassa lignocel·lulòsica, en forma de pollancre i eucaliptus, biomassa alcoholígena, en forma de bleda, 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 “mini” i la “micro” hidràulica, és a dir, les instal·lacions que no superen 1 MW de potència o els 100 kW respectivament, encara que aquesta separació és sempre arbitrària. Aquestes centrals es poden instal·lar en canals de regadiu o abastament, 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 rebuig 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 l'estat espanyol 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.

1.3.5 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 extraiem 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 1.14), encara que és possible injectar aigua en una roca seca calenta per escalfar-la o vaporitzar-la.

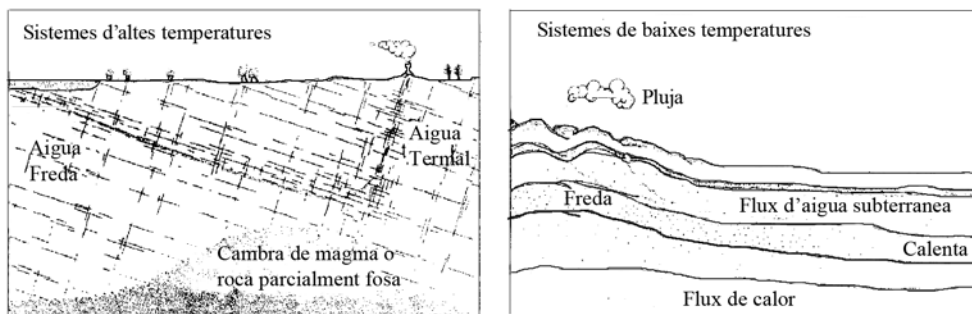


Fig. 1.14 Els esquemes mostren les categories importants de fonts geotèrmiques. Il·lustren un sistema d'alta temperatura, en el qual la menor densitat de l'aigua calenta la fa retornar convectivament a la superfície, i un sistema de baixa temperatura impulsat per pressió hidrostàtica (Font: Jens Tómasson, 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.

1.3.6 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. 1.15 Part del 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 previsible és l'enorme superfície de terrenys que es requereix per a la generació elèctrica a gran escala (uns quants km² per a uns 500 MW).

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.

1.3.7 Energia solar tèrmica activa

En últim lloc, però no per això menys important, podem aprofitar l'energia solar per escalfar i proporcionar calor en l'àmbit domèstic o industrial, a mitja o alta temperatura, mitjançant captadors solars i sistemes d'acumulació. Al ser precisament, però, l'energia renovable de la que parlarem al

llarg d'aquest llibret, tan sols citar en aquest apartat que, a juny de 2002, l'estat espanyol disposava de 467.000 m² instal·lats, essent Andalusia la comunitat capdavantera amb 115.000 m².

Cal tenir en compte que un captador solar de 2 m² de superfície pot produir fins a 150 litres d'aigua calenta cada dia, fet que estalvia l'emissió d'aproximadament 1 tona de CO₂ a l'any, és a dir, la crema de 90 kg de carbó o 130 litres de gasoil.



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 m², 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).

1.4 Un últim apunt

Tot i el seguit de conferències i trobades de Copenhagen, Rio, Kyoto, etc., els grans països productors i consumidors d'energia (essencialment l'hemisferi nord) encara no acaben d'entendre els conceptes sobre els quals es discuteix, com ara biodiversitat o sostenibilitat². 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

² Una activitat és sostenible quan:

1. Utilitza materials en forma de cicle tancat.
2. Utilitza fonts d'energia netes i renovables.
3. Prové del potencial humà; p.ex., la comunicació, la creativitat, la coordinació, l'estimació i el desenvolupament espiritual i intel·lectual.

Una activitat és no sostenible quan:

1. Requereix *inputs* continus de recursos no renovables.
2. Consumeix recursos renovables de forma més ràpida que el seu ritme de renovació.
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.

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.

Durant èpoques sense el fenomen del Niño, l'aigua més calenta dels oceans terrestres es 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, a la vegada millora, de les condicions per a l'activitat pesquera, ramadera i agrària (essencialment degut a un augment de les 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. El resultat és que 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 va tenir un impacte mediambiental força més devastador del què s'esperava. 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 què 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 tres 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).

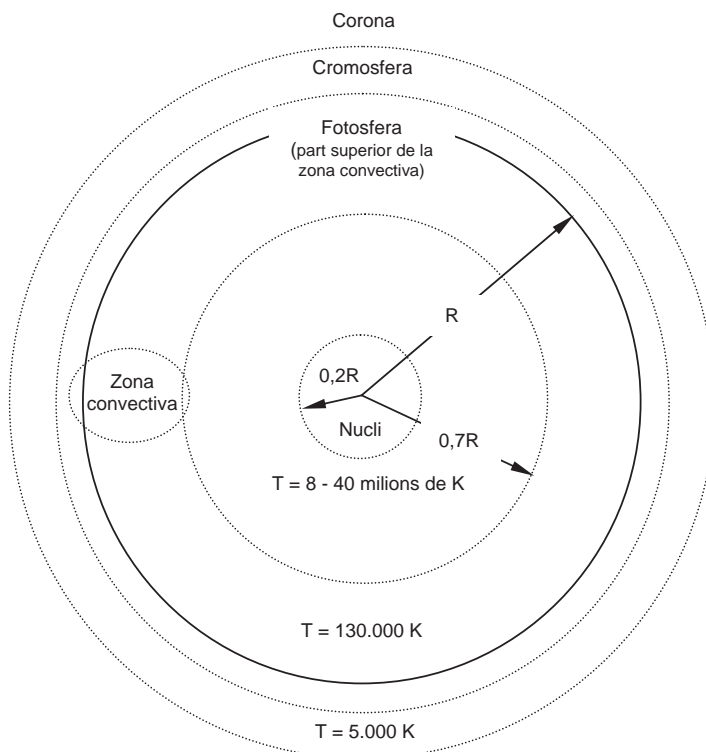


Fig. 2.1 Estructura esquemàtica del Sol (de radi R).

El Sol és una estrella de l'anomenada seqüència principal, de tipus espectroscòpic G2, formada per nuclis, 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.

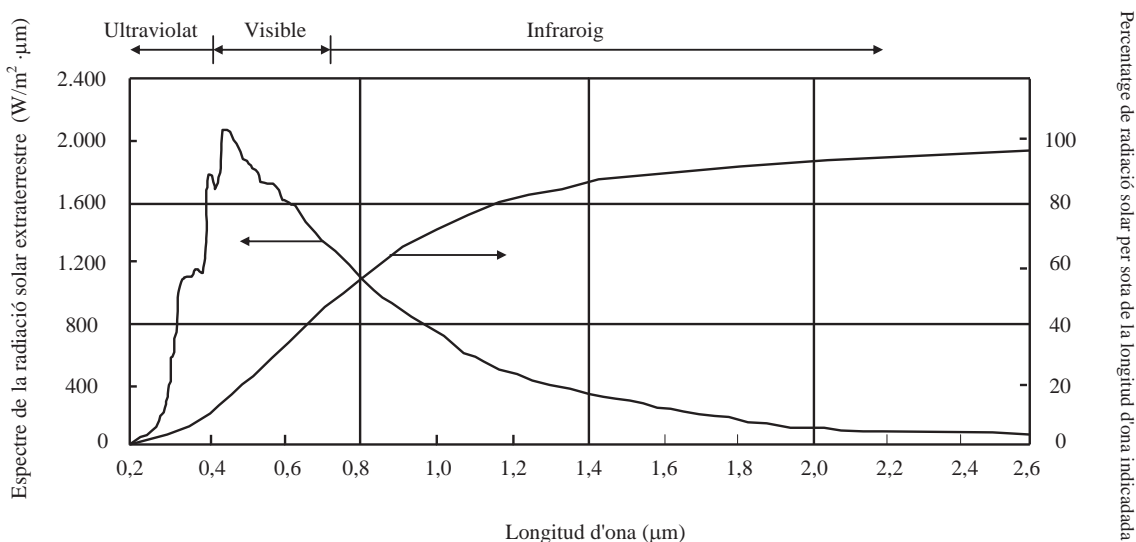


Fig. 2.2 Espectre de la radiació solar extraterrestre.

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 baldufa 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.

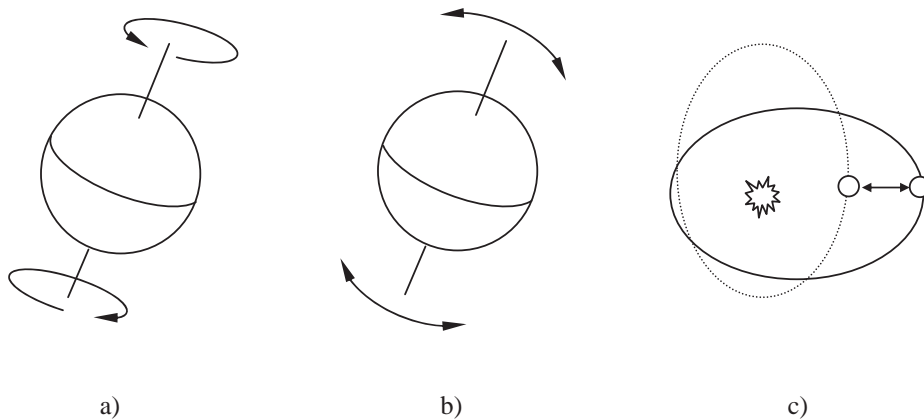


Fig. 2.3 Moviments de a) precessió, b) variació de la declinació i c) variació de l'excentricitat de l'òrbita terrestre.

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 ($n = 1 \div 365$)¹.

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

¹ Les equacions d'aquest capítol treballen en graus, NO en radians.

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 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 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.

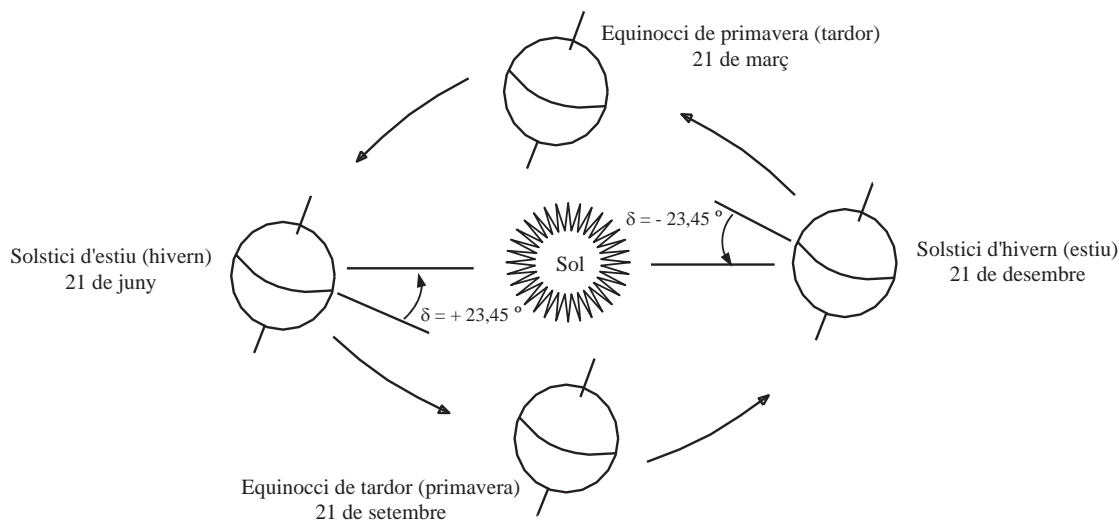


Fig. 2.4 Declinació (entre parèntesi, l'estació corresponent a l'hemisferi sud).

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* (δ) 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* (α_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* (γ_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' α_s s'anomena *zenit solar* i es representa per ζ_s .

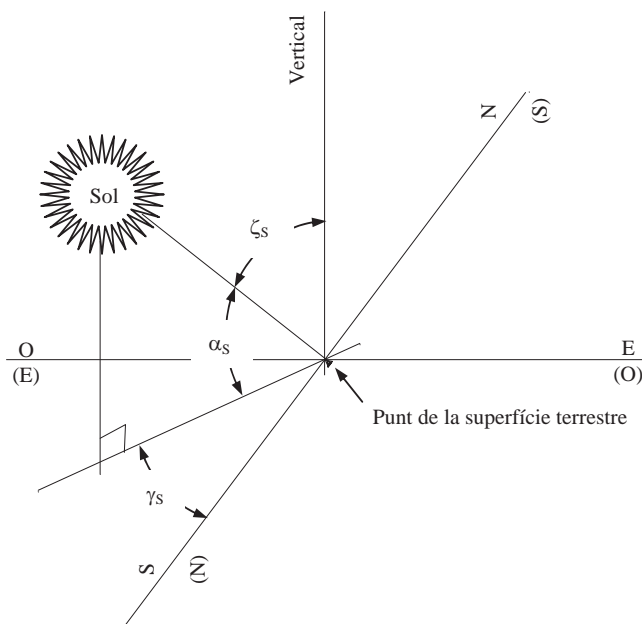


Fig. 2.5 Altitud, zenit i azimut solar per l'hemisferi nord (sud).

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* ϕ (a l'equador, $\phi = 0$, mentre que al nord ϕ és positiu i al sud ϕ 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* ω .

L'*angle horari* es defineix com a 0 en el moment del migdia solar local ($\gamma_s = 0$) i augmenta de 15° en 15° 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° en 15° 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° que tenim per "voltar", el Sol n'hagi recorregut 15° ($360^\circ / 24 \text{ hores} = 15^\circ$ 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).

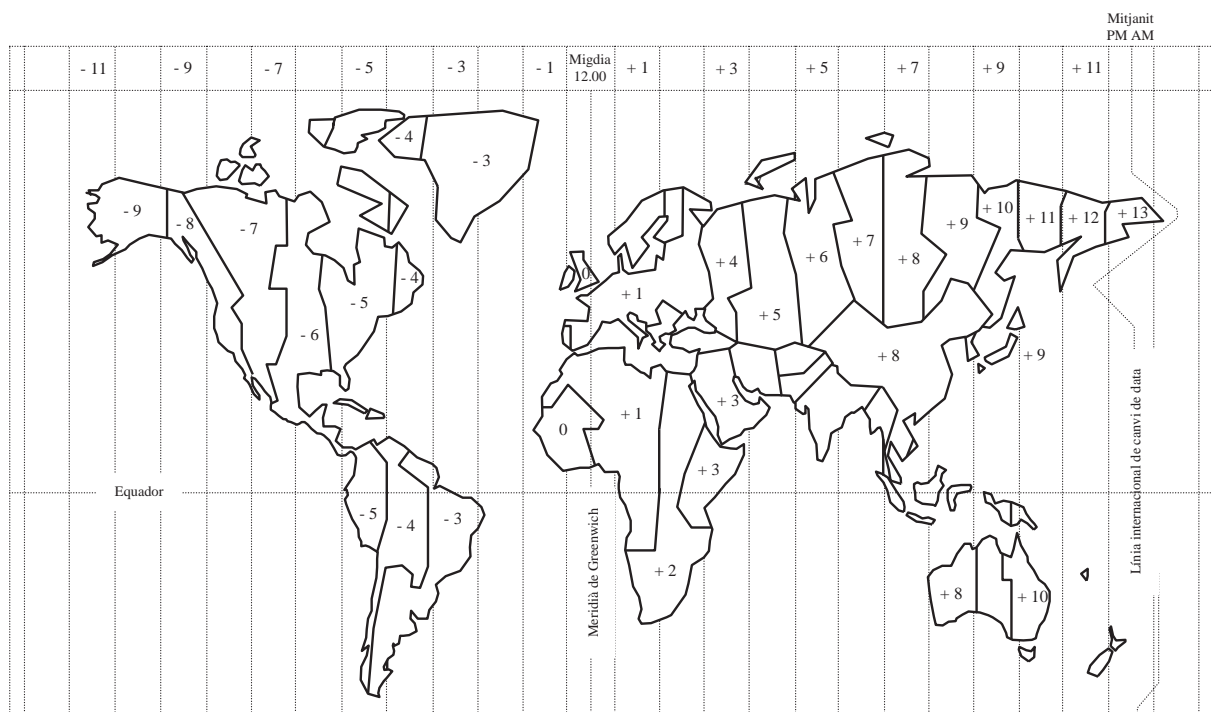


Fig. 2.6 Divisió horària del mapa terrestre. Els temps de relloge es mostren per sota o per sobre del temps de Greenwich, ignorant qualsevol tipus de variació estacional (p.ex., quan és migdia al Regne Unit, són les 7 del matí a Washington DC i les 9 de la tarda a Tòquio).

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
δ	-17,5	-17,5	-17,5	-17,5
ϕ	30	30	-23	-23
ω	45	-30	45	-30
α_s	25,7	34,4	47,6	61,4
γ_s	48,4	-35,4	88,7	-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 ω_{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 ω_{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).

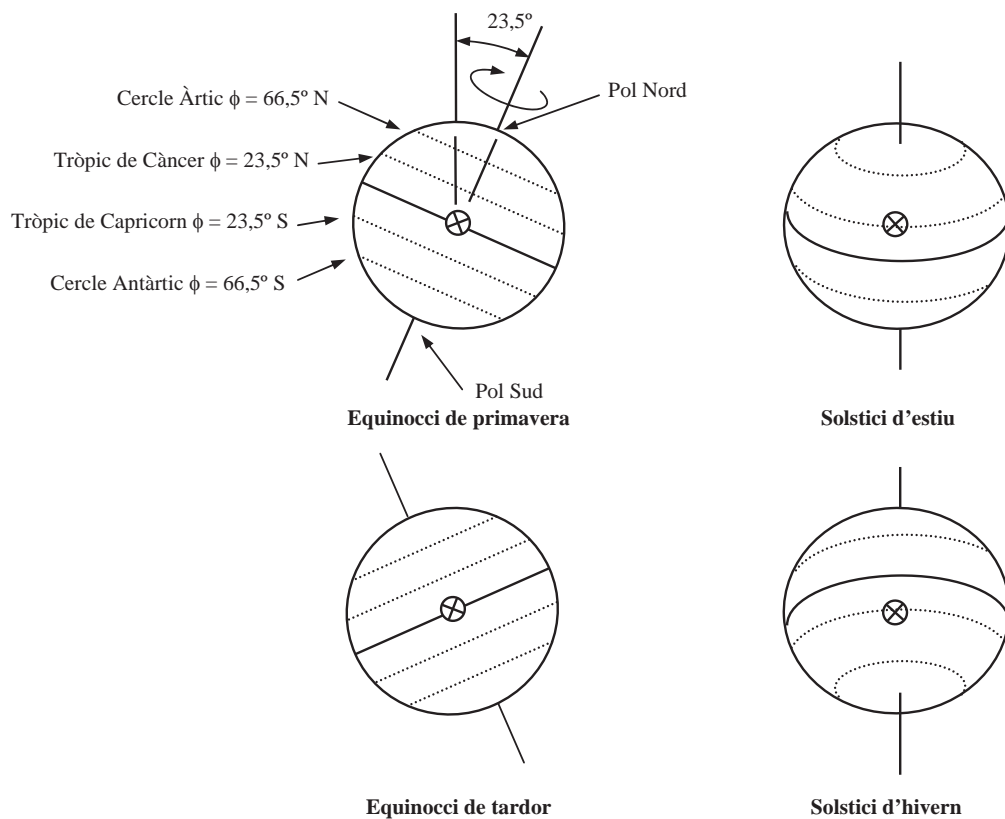


Fig. 2.7 La Terra vista des del Sol.

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.

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° (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° de la circumferència terrestre. Físicament aquests fusos comprenen la Terra existent entre dos meridians separats 15° (obviant algunes modificacions de tipus fronterer, polítiques o naturals) i tots vénen fixats com a positius a l'oest del meridià 0° o meridià de Greenwich. La magnitud que determina la posició d'aquests fusos horaris és la *longitud* i se simbolitza per la lletra λ (λ_0 pel de referència, Greenwich).

El *dia solar* a qualsevol punt del planeta es defineix pel temps transcorregut entre dos migdies solars successius (entenen 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 forma²

$$ET = 0,0072 \cdot \cos C - 0,0528 \cdot \cos(2 \cdot C) - 0,0012 \cdot \cos(3 \cdot C) - 0,1229 \cdot \sin C - 0,1565 \cdot \sin(2 \cdot C) - 0,0041 \cdot \sin(3 \cdot C) \quad (2.8)$$

$$\text{on } C = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{366}$$

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 ε 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 λ prendrà valors negatius si cau a l'est del meridià de Greenwich i positius si cau a l'oest.

² 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
ε	- 1		
<i>ET</i>		+11	+1
$\frac{1}{15} \cdot (\lambda_0 - \lambda)$		+8	+28
<i>TSV =</i>	16	54	44

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 sòl 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 (α_s) i l'azimut solar (γ_s). L'orientació de la superfície irradiada (o captador, per a nosaltres) quedarà també definida pel seu azimut (γ_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* β , 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 θ . 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

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

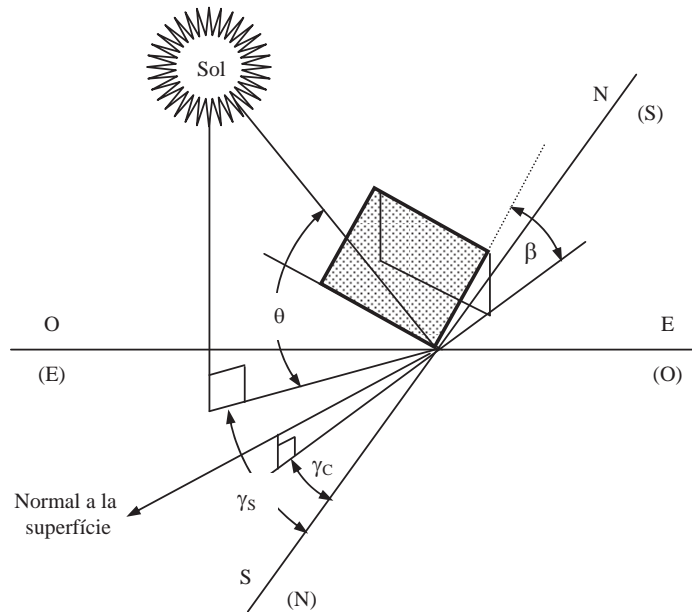


Fig. 2.8 Angles relatius a superfícies inclinades.

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

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

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

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

A la pràctica, la inclinació del captador β 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'obtidria integrant l'equació anterior des del moment de la sortida (t_s) al moment de la posta (t_p) del Sol:

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

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 ω_{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 2.1.³

Taula 2.1 Dies significatius per a cada mes

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

³ 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.

Exemple 2.4

Determineu la mitjana diària mensual de radiació solar extraterrestre per una superfície horitzontal de latitud $\phi = 40^\circ N$ 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:

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

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

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

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^2 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^2 .

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, \bar{H}_T , es pot expressar com

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

on \bar{H} és la mitjana mensual de radiació diària sobre una superfície horitzontal (obtinguda de mesures *in situ*, com les de l'annex) i \bar{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 separadament els components de radiació directa, difusa i reflectida del total de la radiació que arriba a la superfície terrestre amb l'expressió

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

on \bar{H}_d és la mitjana mensual de radiació difusa diària en superfície horitzontal, \bar{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 ρ 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.

\bar{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 \bar{H}_d/\bar{H} es pot correlacionar amb un coeficient de transmissió de l'atmosfera que anomenem *índex de nuvolositat* \bar{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

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

on \bar{H} és la mitjana mensual de radiació global diària en superfície horitzontal (la que trobem tabulada a l'annex) i \bar{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 \bar{H}_d/\bar{H} en funció de \bar{K}_T pren el nom de correlació de Liu i Jordan i s'expressa com:

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

Teòricament \bar{R}_b és una funció complicada de la transmitància 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:

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

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

$$\omega'_{sp} = \min[\omega_{sp}, \arccos(-\operatorname{tg}(\phi - \beta) \cdot \operatorname{tg} \delta)] \quad (2.22)$$

i ω_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° 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 / (m²·dia) (si $I_o(n)$ ve donat en kW/m²). Per tenir-ho tot en unes mateixes unitats, ens cal multiplicar per 3.600 i obtenir així el resultat en J/dia·m².
- 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 de sortida (o posta) ω_{sp} propiament dit, i l'angle horari afectat per la inclinació de la superfície captadora i definit com $\arccos(-\operatorname{tg}(\phi - \beta) \cdot \operatorname{tg} \delta)$ (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

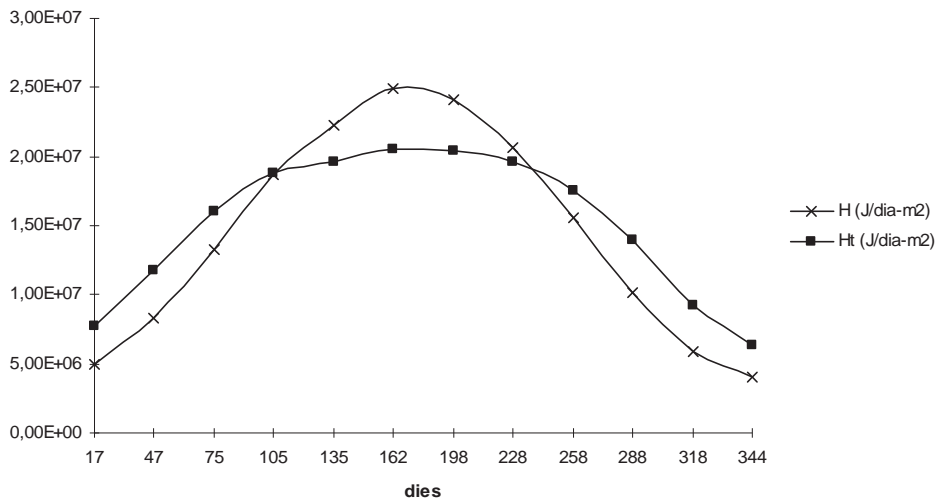
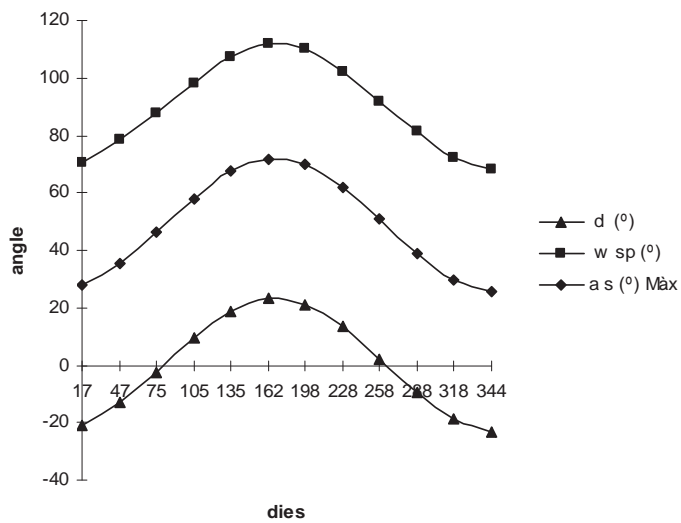
$$\text{Comp. reflectit} = \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) = 0,4 \cdot \left(\frac{1 - \cos 41,61'}{2} \right) = 0,05$$

- 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 (α_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	\overline{H} (J/dia-m ²) s. taules annex	δ (°) Eq. 2.2	ω_{sp} (°) Eq. 2.5	α_s (°) Màx Eq. 2.3	H_e (J/s-m ²) Eq. 2.15	\overline{H}_e (J/dia-m ²) Eq. 2.16
G (17)	17	4,92E+06	-20,92	70,33	27,71	649,69	1,42E+07
F (16)	47	8,28E+06	-12,95	78,31	35,68	807,58	1,96E+07
M (16)	75	1,32E+07	-2,42	87,87	46,21	985,91	2,65E+07
A (15)	105	1,86E+07	9,41	98,40	58,04	1138,82	3,39E+07
M (15)	135	2,23E+07	18,79	107,44	67,42	1220,25	3,91E+07
J (11)	162	2,49E+07	23,09	112,05	71,72	1243,70	4,13E+07
J (17)	198	2,41E+07	21,18	109,96	69,81	1228,24	4,02E+07
A (16)	228	2,07E+07	13,45	102,16	62,08	1166,76	3,59E+07
S (15)	258	1,55E+07	2,22	91,95	50,85	1039,65	2,91E+07
O (15)	288	1,01E+07	-9,60	81,43	39,03	859,07	2,16E+07
N (14)	318	5,90E+06	-18,91	72,44	29,72	686,46	1,55E+07
D (10)	344	3,99E+06	-23,05	67,99	25,58	602,77	1,28E+07



9	10	11	12	13	14	15	16	17
$K_T=H/H_e$ Taules annex o Eq. 2.19	H_d/H Eq. 2.20	$1-H_d/H$	ω'_{sp} (°) Eq. 2.22	R_b Eq. 2.21	Comp. directe	Comp. difús	R	H_T (J/dia-m ²) Eq. 2.17
0,35	0,53	0,47	70,31	2,38	1,12	0,46	1,58	7,79E+06
0,42	0,44	0,56	78,30	1,86	1,04	0,38	1,43	1,18E+07
0,50	0,37	0,63	87,87	1,41	0,89	0,32	1,21	1,61E+07
0,55	0,33	0,67	90,00	1,07	0,72	0,29	1,01	1,88E+07
0,57	0,31	0,69	90,00	0,88	0,60	0,27	0,88	1,96E+07
0,60	0,29	0,71	90,00	0,80	0,57	0,25	0,82	2,05E+07
0,60	0,29	0,71	90,00	0,84	0,59	0,25	0,85	2,04E+07
0,58	0,31	0,69	90,00	0,98	0,68	0,27	0,95	1,96E+07
0,53	0,34	0,66	90,00	1,26	0,83	0,30	1,13	1,76E+07
0,47	0,39	0,61	81,42	1,70	1,03	0,35	1,37	1,39E+07
0,38	0,48	0,52	72,42	2,22	1,15	0,42	1,57	9,27E+06
0,31	0,58	0,42	67,97	2,56	1,09	0,50	1,59	6,35E+06



Annex al capítol 2

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

ϕ	latitud en graus nord (hi manca la longitud λ)
\bar{H}	mitjana mensual de radiació diària sobre superfície horitzontal (en kJ/m ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -dia)	7572	11858	15798	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 ² -dia)	6434	11472	14994	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 ² -dia)	62070	9906	14671	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 ² -dia)	5600	10726	13652	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 ² -dia)	4920	8280	13220	18640	22290	24940	24130	20650	15540	10140	5900	3990
	\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 ² -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 ² -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 ² -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
Málaga ($\phi=36,85$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	\bar{H} (kJ/m ² -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 ² -dia)	9546	11978	17208	21352	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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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.

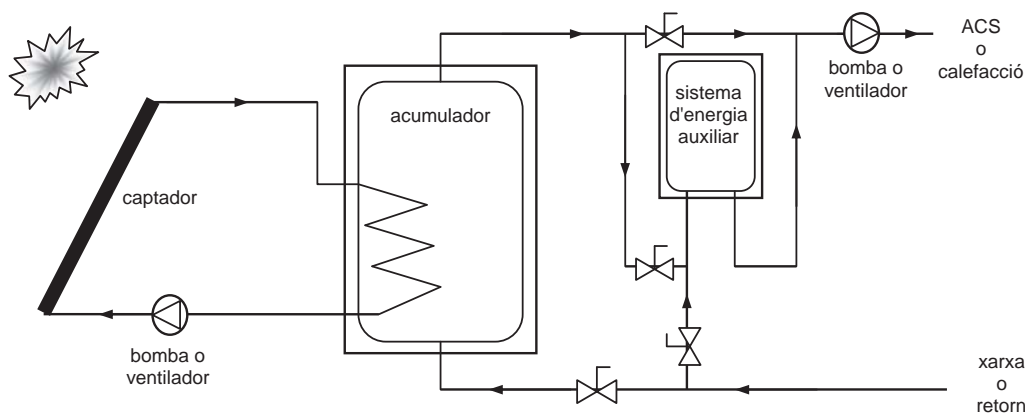


Fig. 3.1 Equema bàsic d'un sistema tèrmic solar.

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.

Temperatura del procés	Temperatura baixa (30 °C – 100 °C)	Temperatura mitjana (100 °C – 400 °C)	Temperatura alta (400 °C - 3.000 °C)
Captador	Captador pla (no concentrador)	Concentrador lineal o esfèric	Concentrador de disc parabòlic Concentrador de camp d'heliòstats
Aplicació	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.

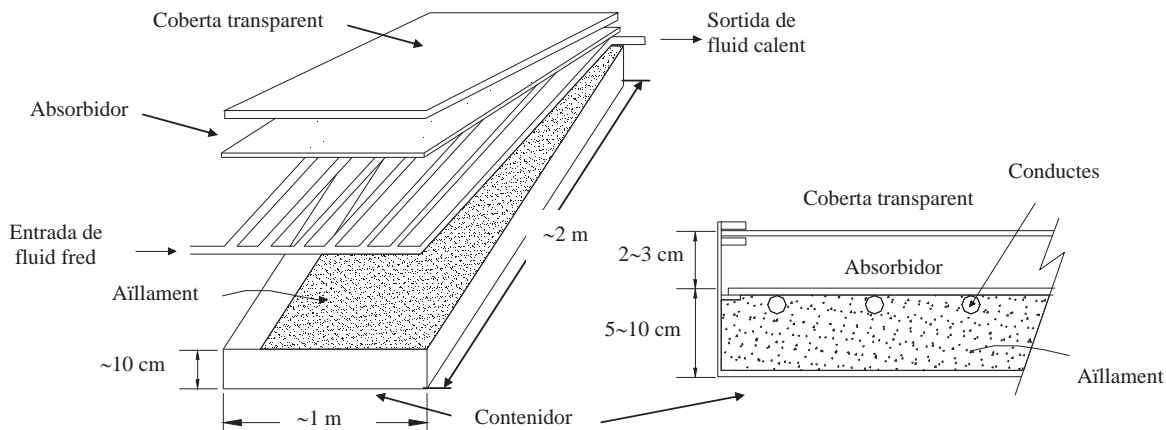


Fig. 3.2 Captador pla per a líquid de coberta única i secció transversal.

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).

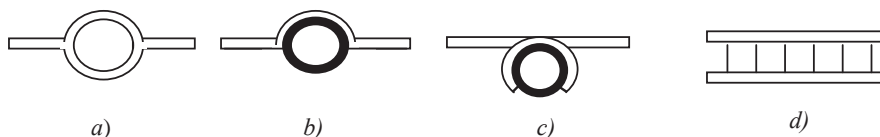


Fig. 3.3 Detalls dels tubs aletejats dels captadors per aigua: a) extrudit, b) soldat, c) unió forçada, d) multicanal per absorbidors de baixa conductivitat.

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.

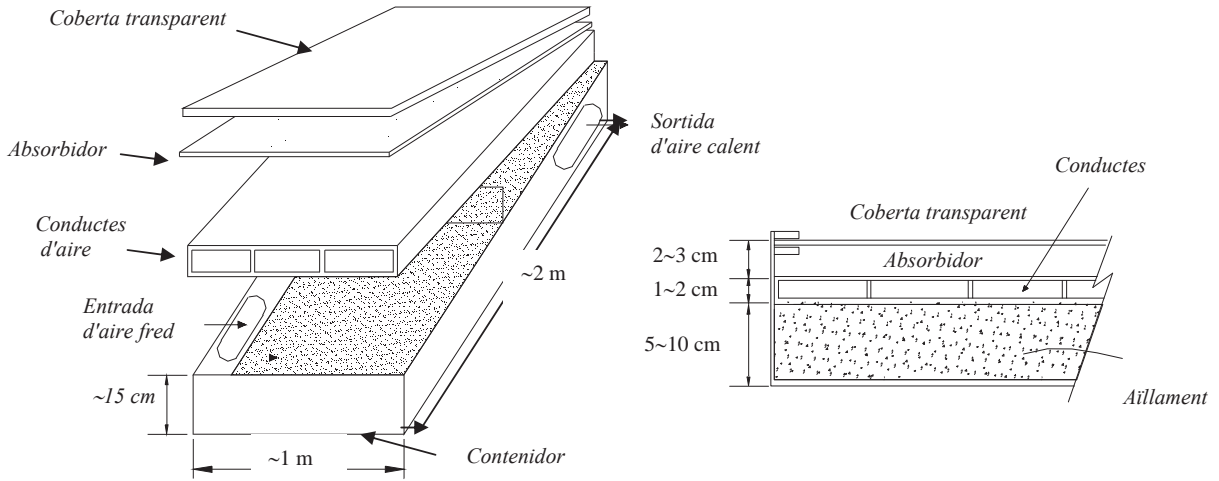


Fig. 3.4 Captador pla per aire de coberta única i secció transversal.

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.

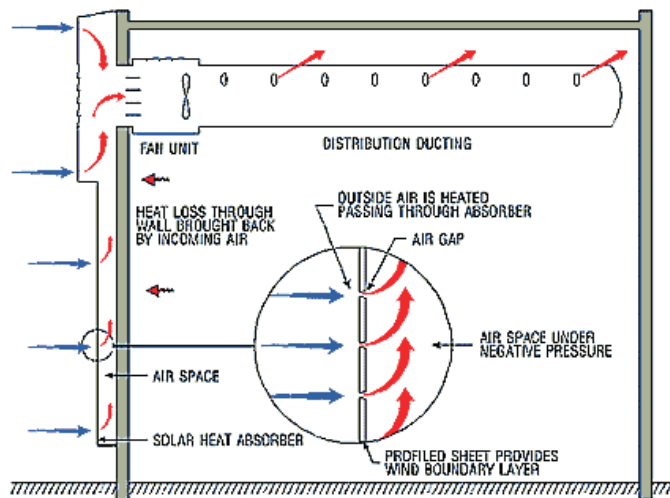


Fig. 3.5 Funcionament de sistema solar d'aire Solarwall (Estats Units) a l'hivern.

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.

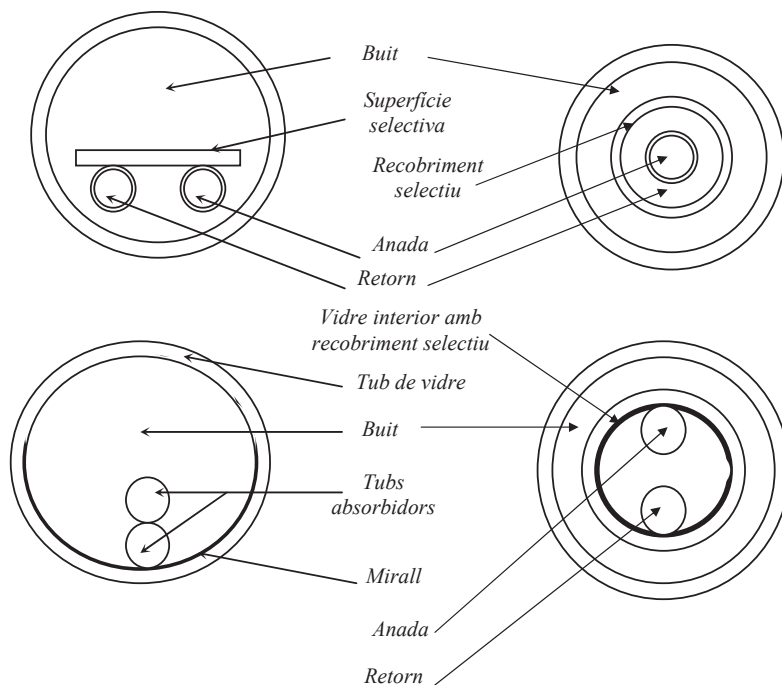


Fig. 3.6 Secció transversal d'alguns tubs de buit.

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 (Joule/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 λ s'anomena *conductivitat tèrmica* i és una característica física del medi en si. Si el medi és un sòlid, λ es considera aproximadament constant. Per a líquids i gasos, λ 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 λ , 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 màssic 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:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \sigma \cdot \Delta T^4 = \sigma \cdot (T_{\text{cos1}}^4 - T_{\text{cos2}}^4) \quad (3.5)$$

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

Recordem com al capítol anterior (figura 2.1) vàiem 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 absortivitat

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

c) Reflectància o reflectivitat

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

d) Transmitància 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

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

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 μm (radiació tèrmica), mentre que un cos a 6.000 K (radiació solar) tindrà aquest pic als 0,5 μm (rang del visibl!^~)

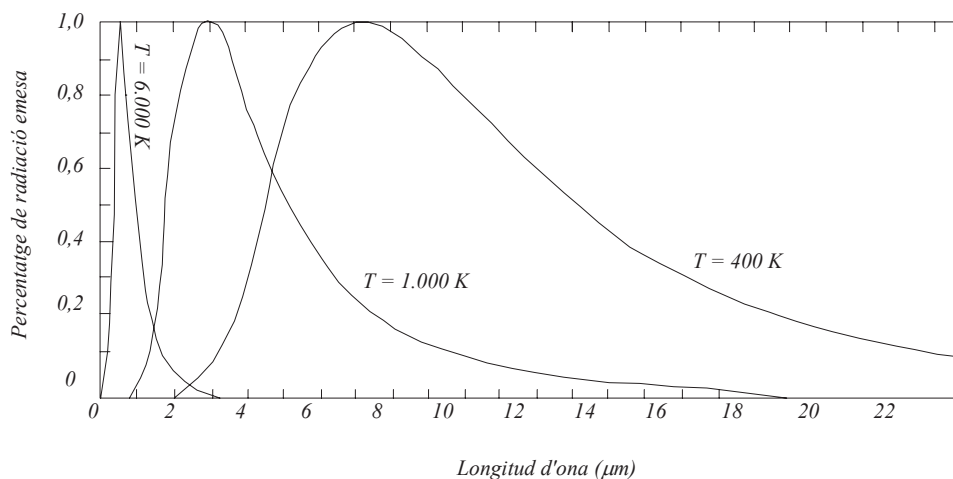


Fig. 3.7 Distribució espectral normalitzada de la radiació del cos negre a temperatures diferents.

A nivell percentual tindrem el següent:

Tipus de radiació	Temperatura d'emissió (K)	Rang (μm)	% 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 transmitància 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 Fe_2O_3 seria el d'un vidre normal de finestra. La seva transmitància té un pic a 0,3 μm 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 μm n'és totalment opac. El cas amb 0,02% de Fe_2O_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 μm ($\tau = 0,9 - 1$), mentre que més enllà baixa en picat. És a dir, per longituds d'ona entre 0 i 3 μm , aquest tipus de vidre és transparent a la radiació i deixa passar les ones mentre que per longituds més enllà de 3 μm és totalment opac a elles, no les transmet i les ha de reflectir.¹

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 μm) perquè escalfi la superfície captadora del seu interior. Aquesta superfície captadora arriba a altes temperatures però que resten sempre per sota dels 100 - 150 °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.

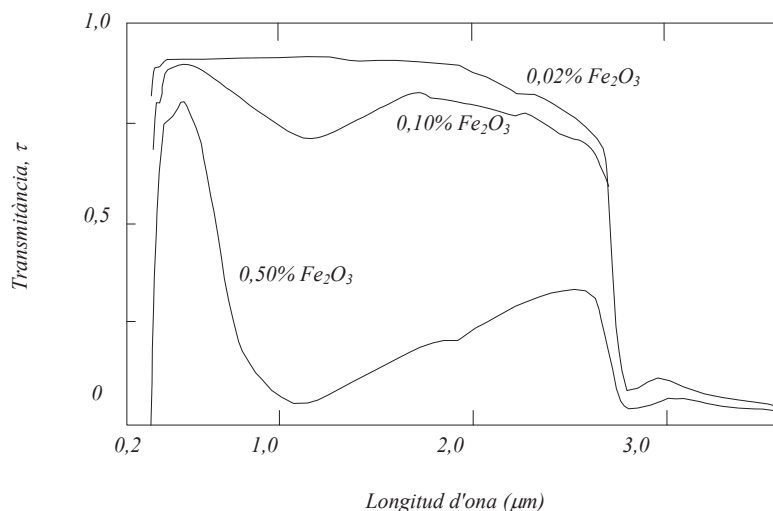


Fig. 3.8 Transmissivitat d'un vidre de 6 mm de gruix amb diferents continguts d'òxid.

En l'àmbit terrestre, el comportament del vidre és imitat per les mol·lècules de CO_2 , H_2O , etc., de l'atmosfera en el que es coneix per *efecte hivernacle*. Aquests components atmosfèrics tenen 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. El resultat és l'augment, sembla que comprovat, de la temperatura global del planeta a mida que augmenten les concentracions d'aquests gasos hivernacle a l'atmosfera.

¹ Noteu com el nostre rang de visió va de 0,4 a 0,7 μm ; per aquest motiu per als humans, el vidre és transparent perquè caiem en el seu rang d'alta transmissivitat.

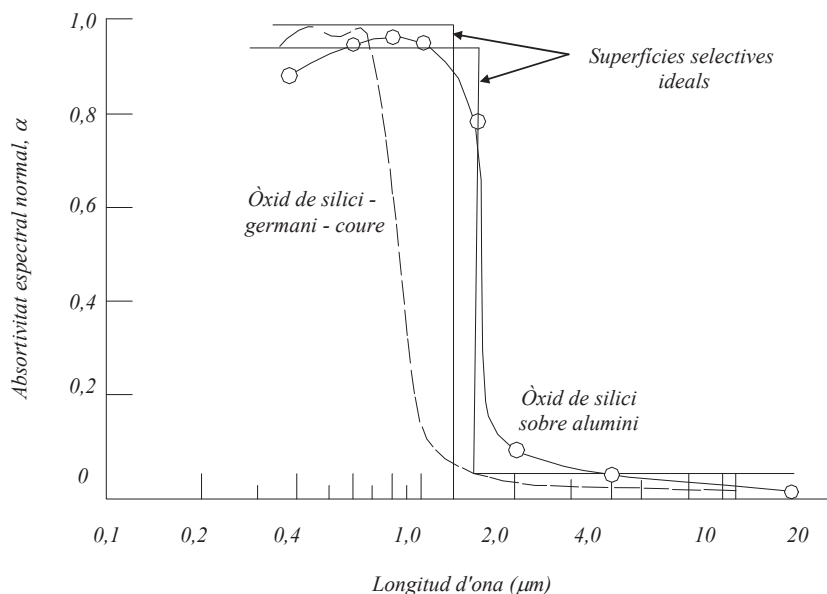


Fig. 3.9 Absortivitats d'algunes superfícies selectives.

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 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

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

On I_s és la radiació solar incident instantànea sobre la superfície de captació A_c del vidre, τ és la transmissivitat del vidre i α és l'absortivitat de la superfície captadora.

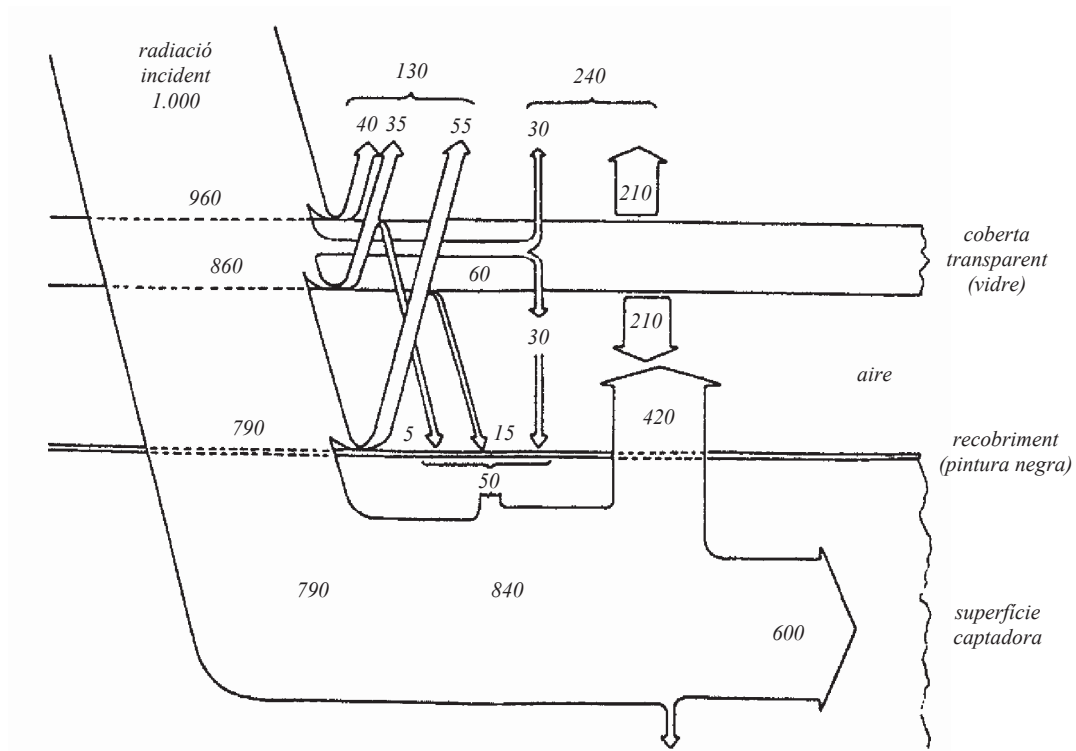


Fig. 3.10 Fluxs energètics en un captador pla.

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:

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

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 ε 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.

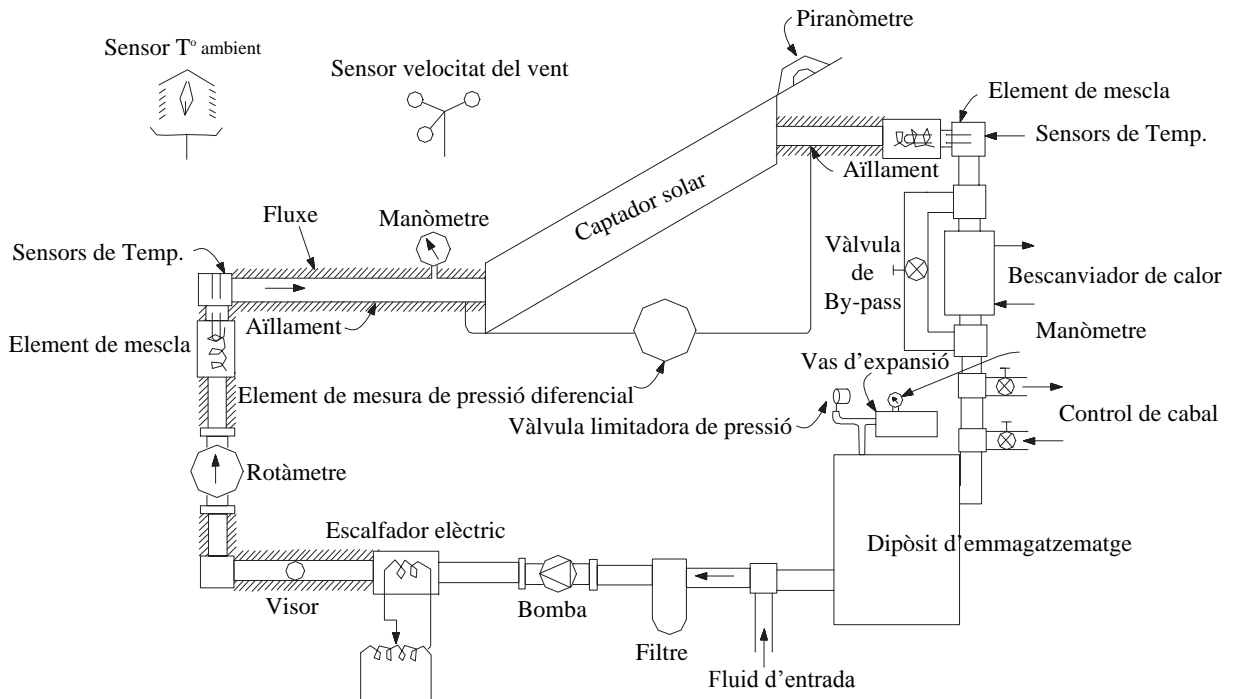


Fig. 3.11 Banc d'assaig per a l'obtenció de la recta de rendiment d'un captador per aigua.

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}_{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 $(T_e - T_a)/I_s$, 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).

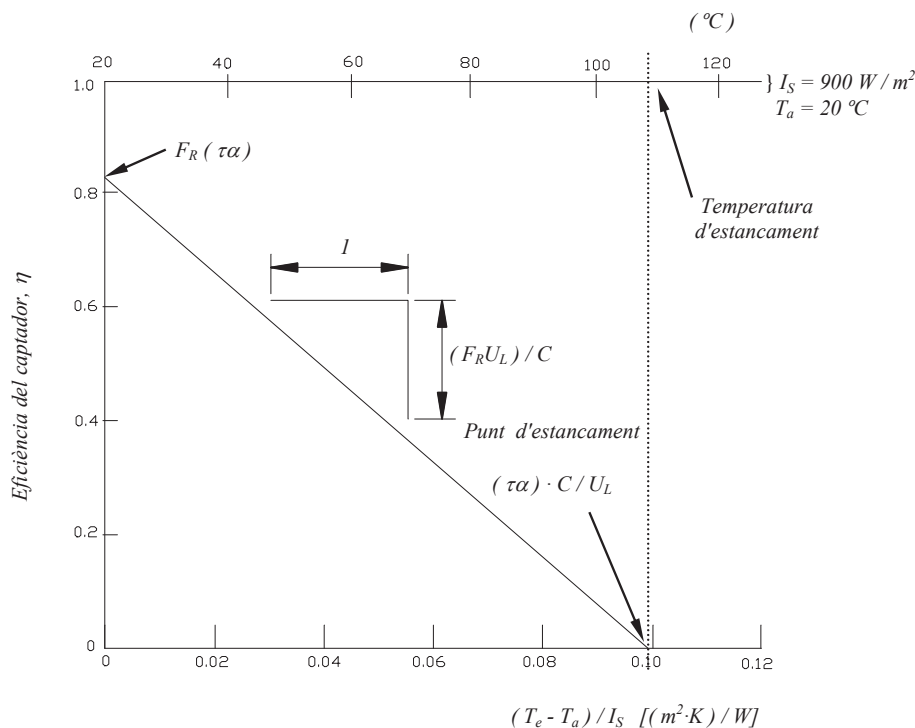


Fig. 3.12 Corba d'eficiència instantània per un captador pla típic.

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.

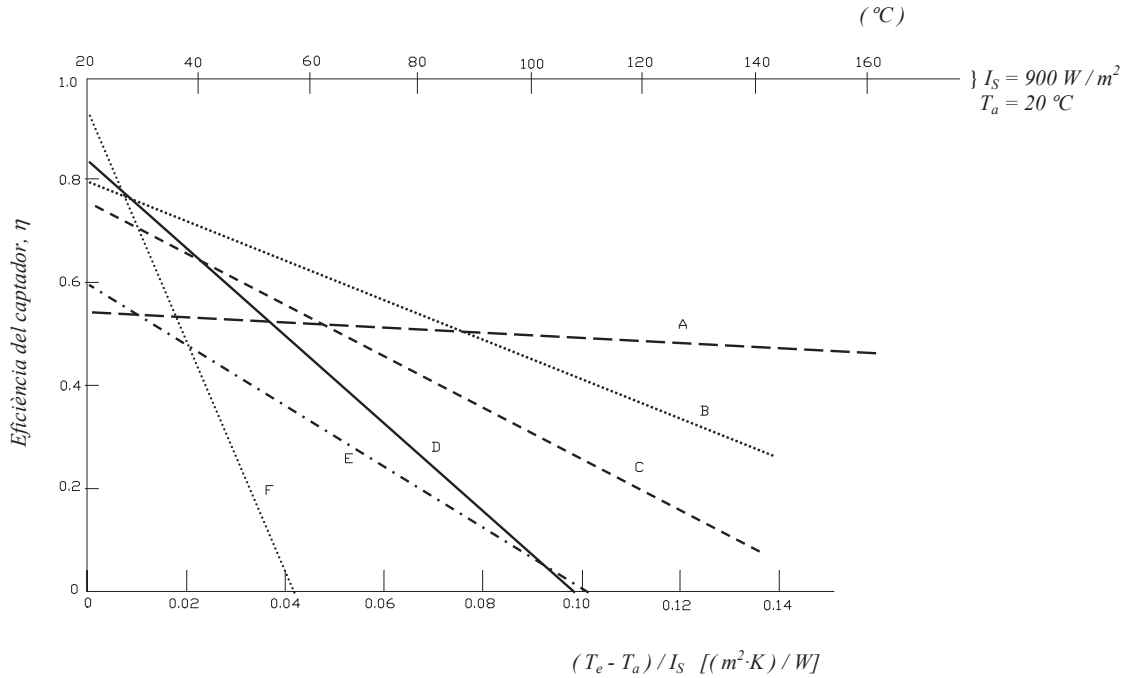


Fig. 3.13 Corbes d'eficiència instantània per diferents tipus de captador pla.

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:

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

Així doncs,

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

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_{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'obtidran aplicant el factor K com:

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

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

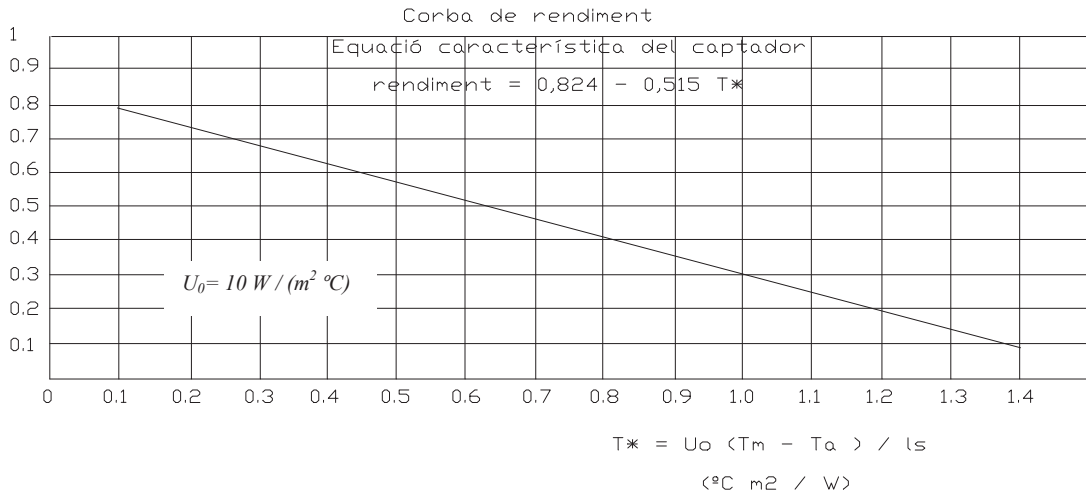


Fig. 3.14 Recta de rendiment d'un captador comercial (companyia Roca).

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 $U_o = 10 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ tenim una equació de rendiment com la següent:

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

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.

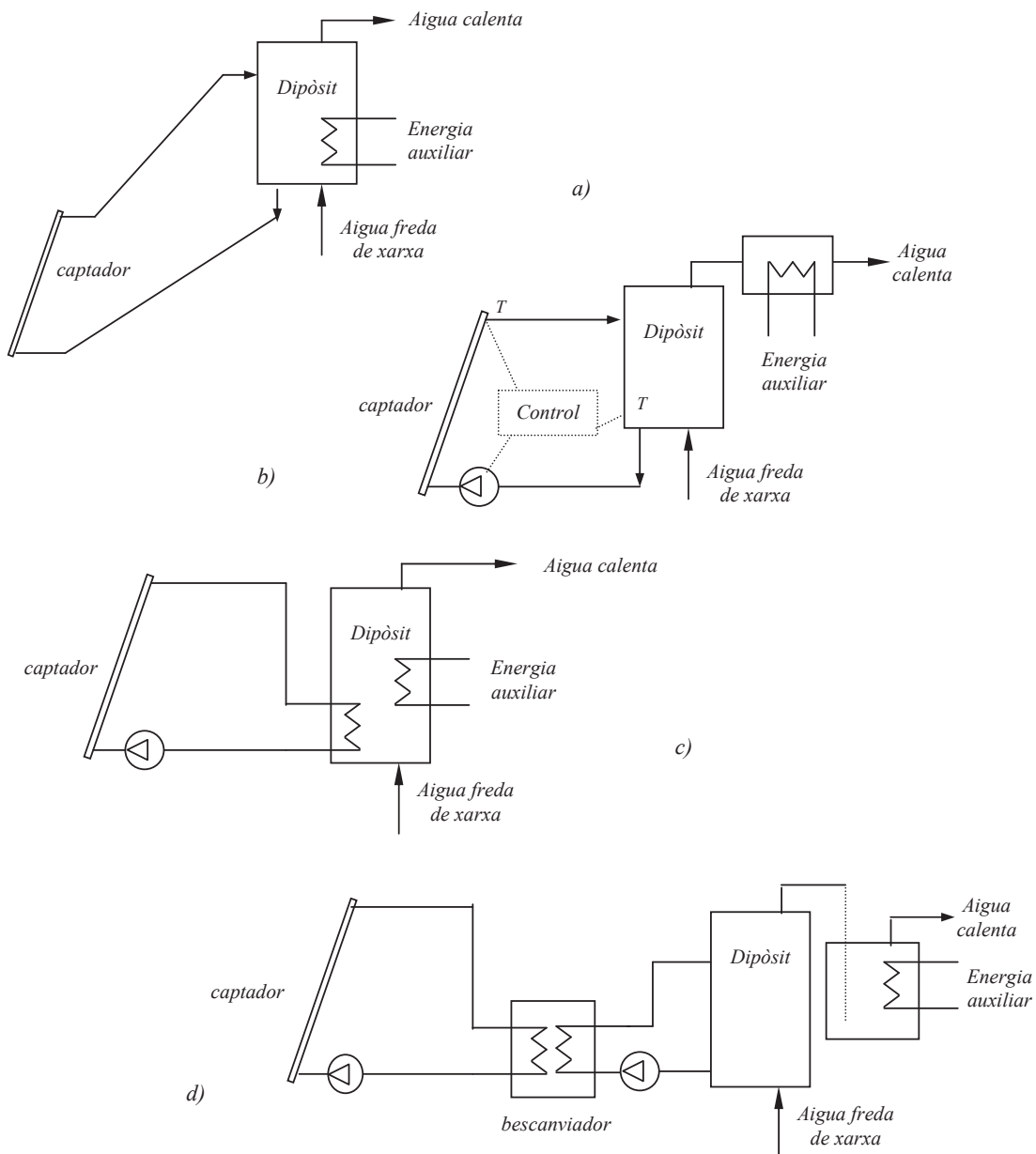


Fig. 4.1 Configuracions més comunes dels sistemes per líquid.: a) Sistema de circulació natural; b) Circulació forçada de dipòsit únic; c) Sistema amb circuit primari tancat; d) Sistema amb circuit primari tancat i bescanviador exterior.

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 perdríem 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.

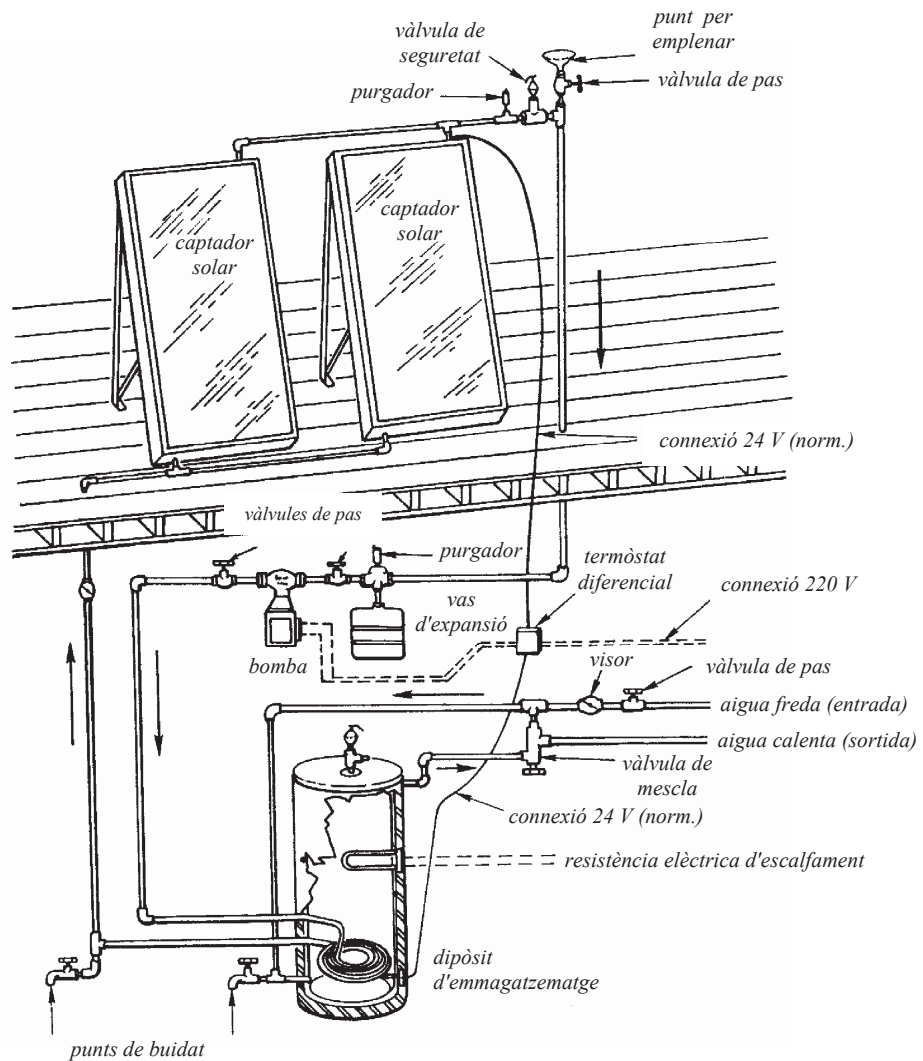


Fig. 4.2 Sistema d'escalfament solar d'ACS, que mostra el sistema de control.

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 serpentí 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 ε , 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 podem 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 ε 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, mal·leabilitat 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 m² 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 m² i en els de capacitat de 300 l la superfície és de 2,4 m².

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.

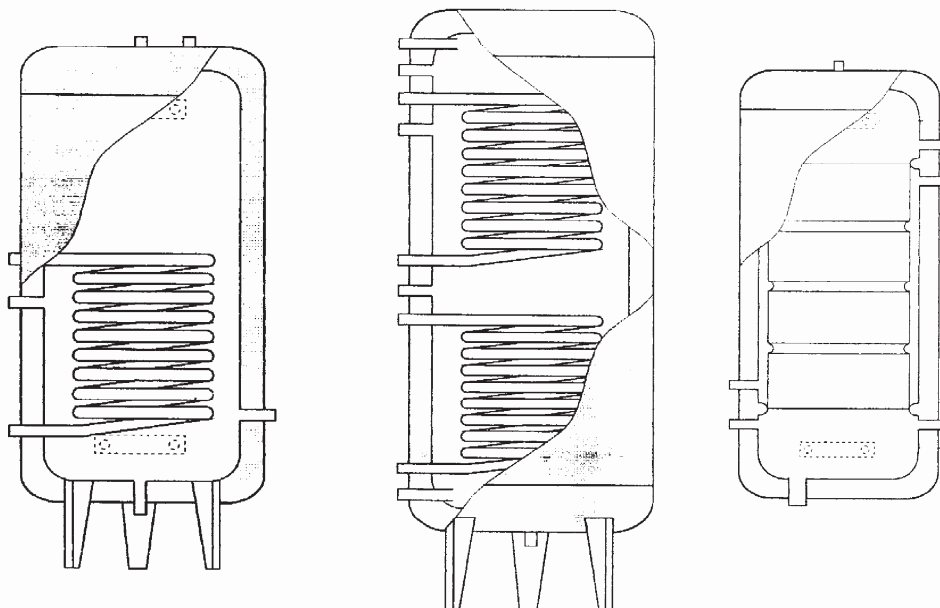


Fig. 4.3 Acumuladors amb serpenti, doble serpenti i de doble cambra (LKN).

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 m² 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 m³/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.

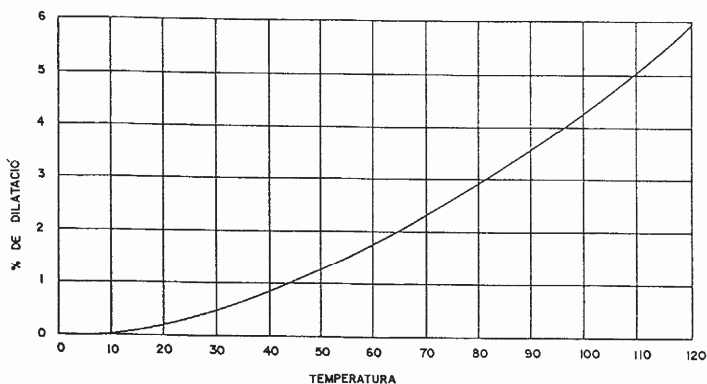


Fig. 4.4 Corba de dilatació de l'aigua per diferents temperatures.

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.

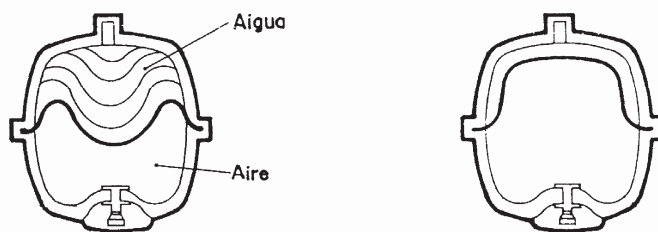


Fig. 4.5 Secció d'un vas d'expansió tancat.

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.

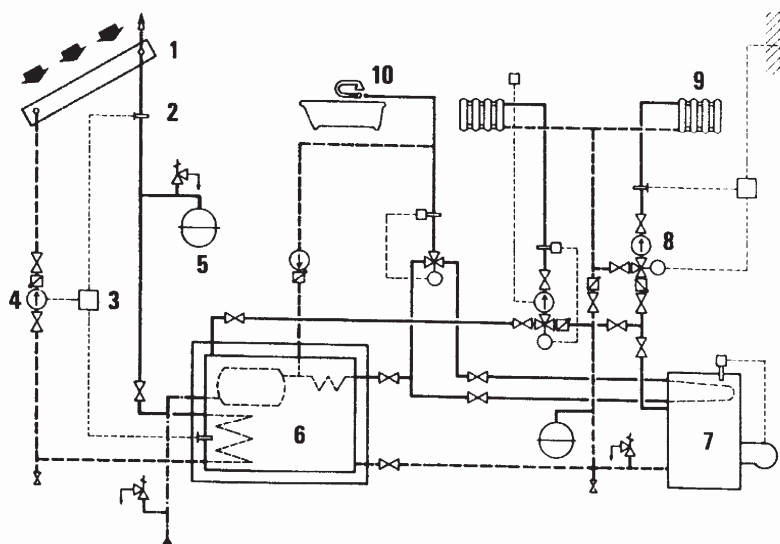


Fig. 4.6 Calefacció amb radiadors. 1) Captadors. 2) Termòstat. 3) Comandament. 4) Bomba. 5) Dipòsit d'expansió. 6) Acumulador d'aigua calenta amb bescanviador de calor i escalfador. 7) Caldera auxiliar de calefacció. 8) Bomba. 9) Radiador o sòl radiant. 10) Presa d'ACS (Font: CEAC, amb permís dels editors).

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 ceres. En aquest cas l'acumulació es denomina de *calor latent*, i aquestes sals o ceres acumulen la calor de canvi de fase. En la calefacció amb aire, la circulació es fa amb ventiladors.

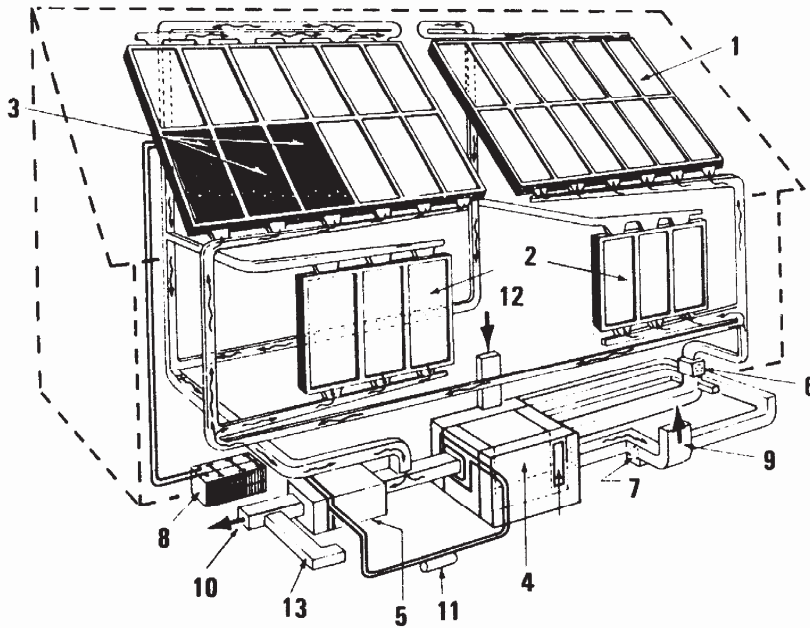


Fig. 4.7 Calefacció per aire amb acumulació de calor latent i cèl·lules solars. 1) Captadors tipus aire. 2) Captadors verticals al mur sud. 3) Cèl·lules fotovoltaïques. 4) Acumulador principal de calor latent. 5) Acumulador secundari de calor latent. 6) Ventilador del circuit primari. 7) Ventilador del 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).

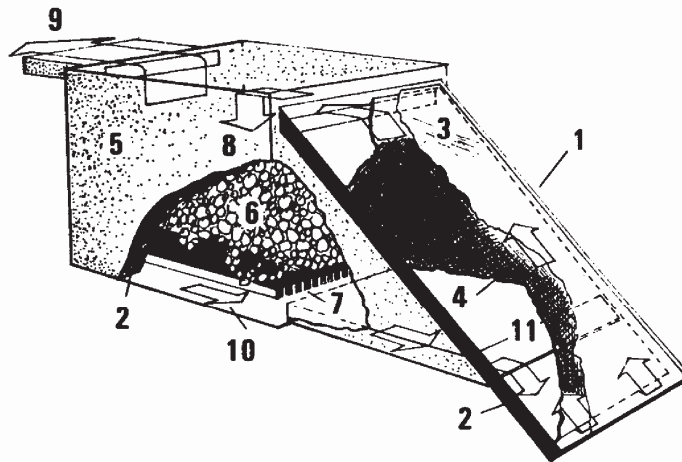


Fig. 4.8 Esquema de principi d'un sistema de calefacció solar per aire amb acumulador de llit de còdols. 1) Captador solar tipus aire. 2) Aïllament. 3) Tapa transparent. 4) Placa absorbidora negra. 5) Dipòsit. 6) Grava. 7) Separador. 8) Aire calent del captador. 9) Aire calent a l'habitacle. 10) Aire 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'habitable 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.

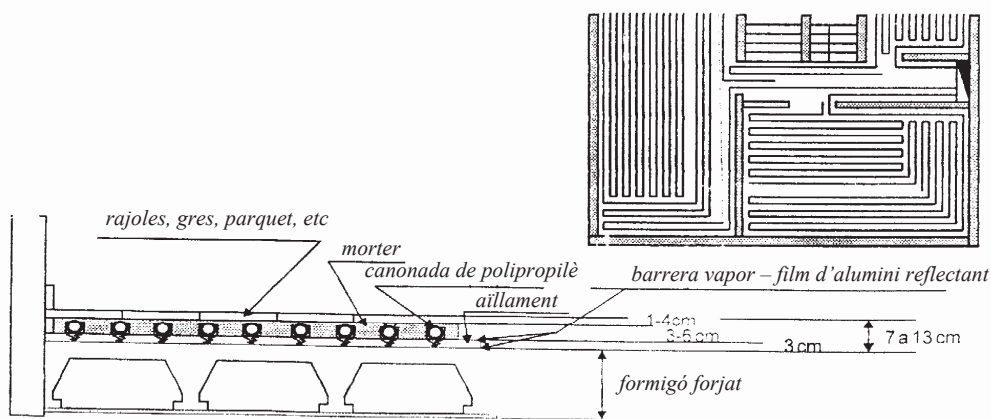


Fig. 4.9 Secció i esquema d'una instal·lació de calefacció amb sòl radiant (LKN).

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.

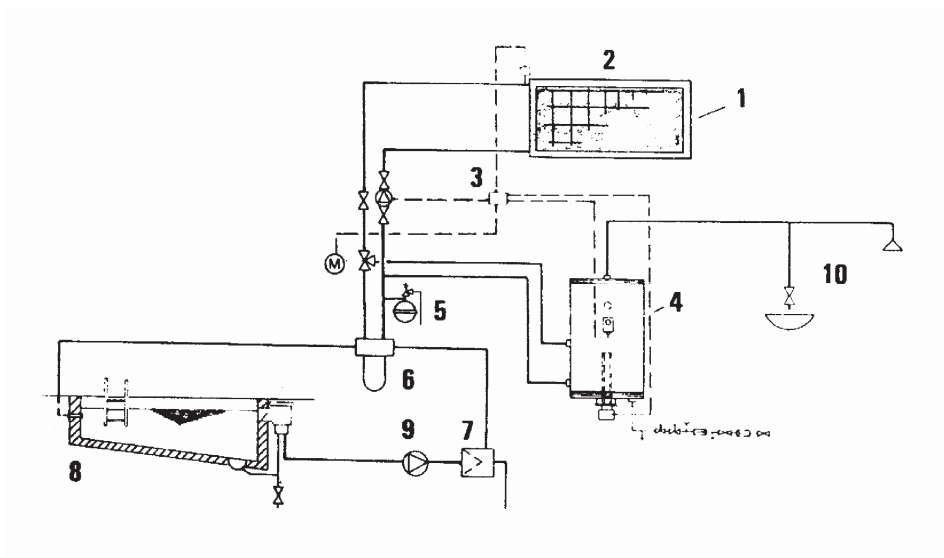


Fig. 4.10 Preparació d'aigua calenta solar combinada amb la calefacció de la piscina. 1) Captadors solars. 2) Termòstat. 3) Comandament. 4) Acumulador d'aigua calenta. 5) Dipòsit d'expansió. 6) Bescanviador de calor. 7) Instal·lació de filtres. 8) Piscina. 9) Bomba. 10) Presa d'ACS (Font: CEAC, amb permís 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 m² pot estar entre les 250.000 i les 425.000 pessetes.

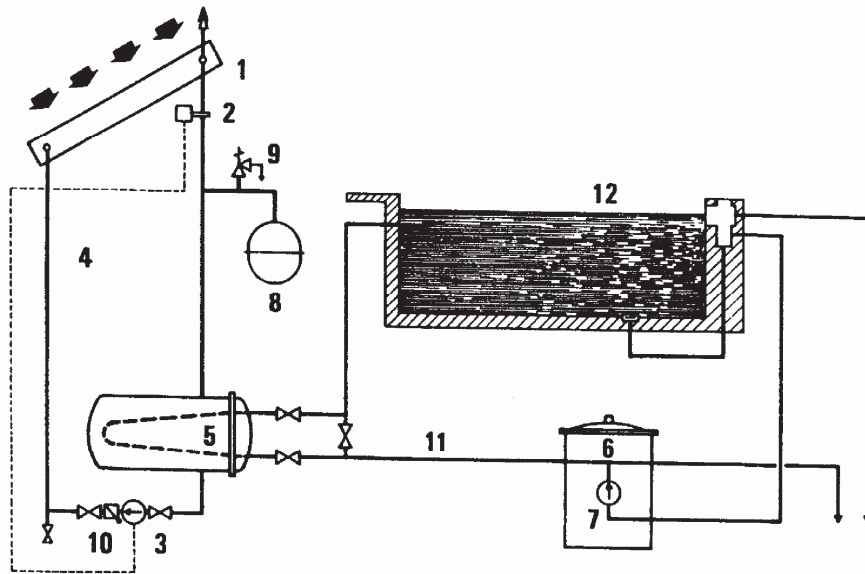


Fig. 4.11 Calefacció solar d'una piscina en circuit tancat. 1) Captadors solars. 2) Termòstat. 3) Comandament. 4) Circuit captador primari. 5) Bescanviador de calor. 6) Filtres de la piscina. 7) Bomba de la piscina. 8) Dipòsit d'expansió. 9) Vàlvula de retenció. 10) Dispositiu de retenció. 11) Circuit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

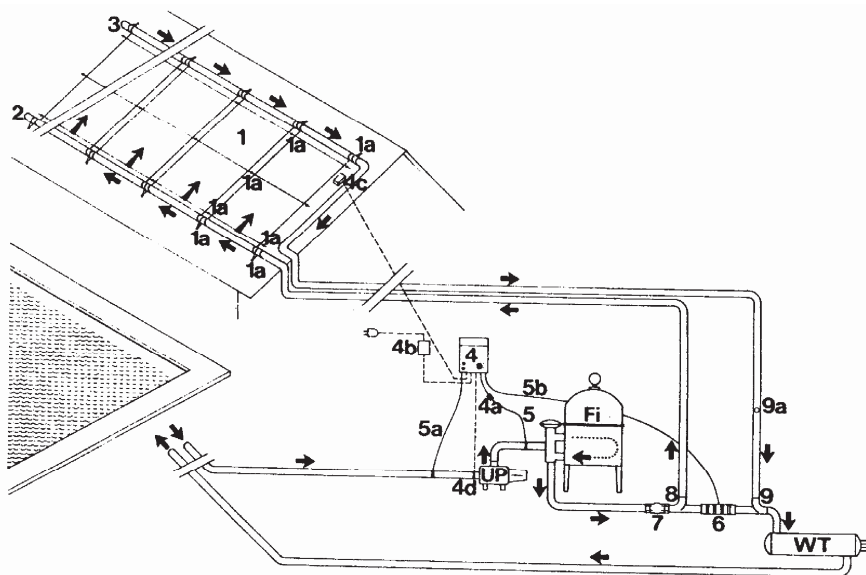


Fig. 4.12 Calefacció solar d'una piscina en circuit obert. 1) Captadors solars. 1a) Unions i fixacions. 2) Terminal. 3) Vàlvula de purga d'aire. 4) Comandament. 4a) Filtre de protecció. 4b) Transformador 220 V - 24 V. 4c) Sensor de radiació solar. 4d) Sensor de temperatura de la piscina. 5) Impuls hidràulic 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.

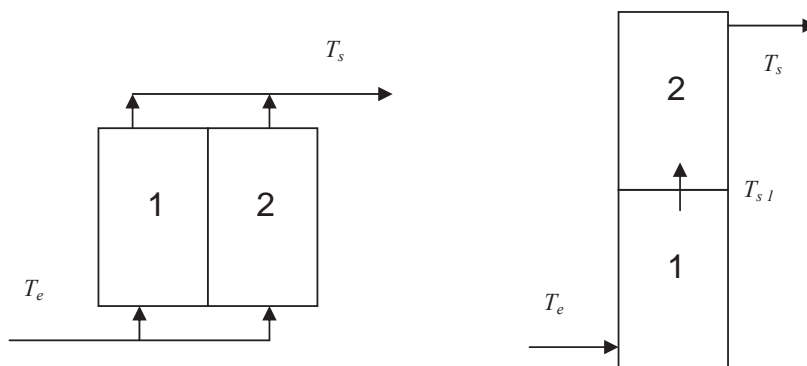


Fig. 4.13 Connexions en paral·lel i en sèrie

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

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

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

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:

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

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

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

Captador en estudi: Roca

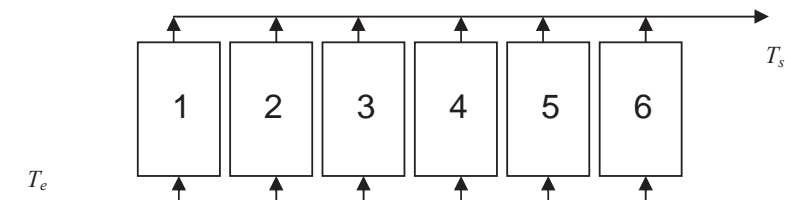
Recta de rendiment: $\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s} = 0,784 - 4,9 \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s}$

Àrea de captació: $1,9 \text{ m}^2$

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

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

a) Connexió en paral·lel



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

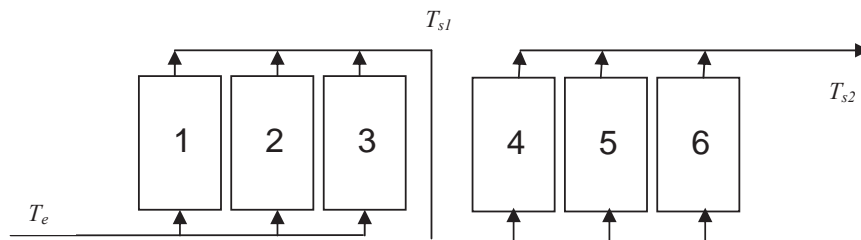
$$\dot{m}_{fluid} = 0,015 \frac{kg}{s \cdot m^2} \cdot A_c = 0,015 \cdot 1,9 = 0,0285 \frac{kg}{s}$$

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)	η (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:

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

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):

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

T_e	η_1	$T_{s1}-T_e$	T_{s1}	η_2	$T_{s2}-T_{s1}$	T_{s2}	$T_{s2}-T_e$	Q_u	η_{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 η_{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:

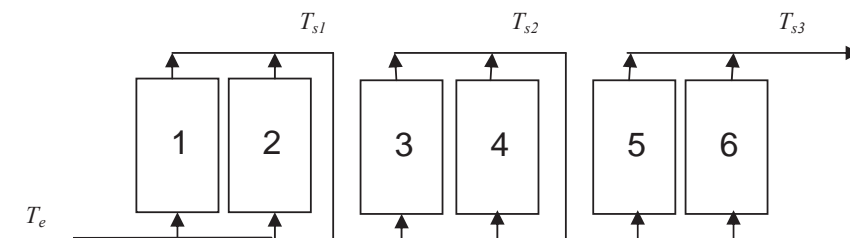
$$\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s} = 0,746 - 4,66 \cdot \frac{(T_e - T_a)}{I_s}$$

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	η_{tot} (cas b.1)	η_{tot} (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 captadors amb igual comportament valdrà:

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

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 Complementaries* (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 connectats 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'equilibrat.

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 β sobre un pla horitzontal es determinarà en funció de la latitud geogràfica ϕ i del període d'utilització de la instal·lació: ϕ° per a una instal·lació anual, $(\phi + 10)^\circ$ per a una utilització hivernal i $(\phi - 10)^\circ$ 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.

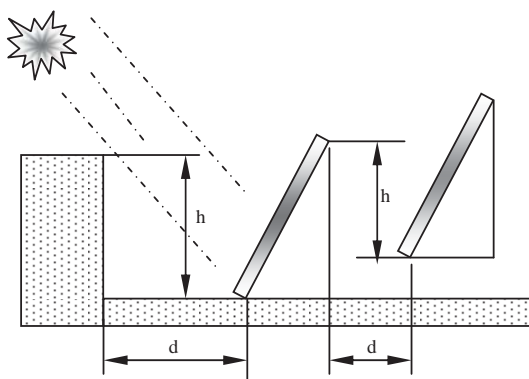


Fig. 4.14 Separació entre files de captadors.

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 <i>k</i>	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·m² d'àrea de captadors. En les instal·lacions on els captadors estiguin connectats en sèrie, el cabal de la instal·lació s'obindrà 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.

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 Estimació de les necessitats 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'aigua calenta sanitària (ACS) pel consum propi. Aquestes necessitats acostumen a ser funció de la situació geogràfica de l'edificació, l'orientació, la qualitat de la construcció i el particular sistema de vida dels seus ocupants.

5.1.1 Necessitats tèrmiques de calefacció

L'estimació de les necessitats tèrmiques de calefacció (que en última instància es converteix en l'estimació del consum de combustible) es pot fer de diferents maneres. Algunes són molt exhaustives, a partir de la simulació horària del comportament tèrmic de l'edifici en estudi, però amb la necessitat d'utilitzar programes de càlcul prou potents per la seva realització.

Ara bé, fins el grau d'exactitud que es pot desitjar en l'àmbit domèstic, moltes vegades n'hi ha prou amb mètodes més aproximats. Un d'aquests mètodes simplificats és l'anomenat dels *graus-dia* (*degree-days* en anglès) que permet definir unes condicions ambientals exteriors basades en la diferència de temperatures entre l'ambient interior i l'exterior. El consum energètic en calefacció mensual, L_{CAL} , es suposa proporcional al nombre de graus-dia durant el mes:

$$L_{CAL} = (K_G \cdot A_G) \cdot GD_{mes} \quad (5.1)$$

on GD_{mes} és el nombre de graus-dia del mes i $(K_G \cdot A_G)$ és el producte de l'àrea de l'edifici pel coeficient global de pèrdues de l'edifici.

a) Els graus-dia

Els graus-dia, en un dia, es defineixen com la diferència entre una temperatura base (T_b) de referència (normalment 15°C o 18°C) i la temperatura exterior mitjana quan la primera és més elevada que la segona. Aquesta temperatura exterior mitjana es calcula com la mitja de les temperatures màxima (T_M) i mínima (T_m) d'aquell dia. Per tant, el nombre de graus-dia en un mes qualsevol de n dies es pot escriure com:

$$GD_{mes} = \sum_{i=1}^n \left[T_b - \frac{1}{2}(T_M - T_m) \right]_i \quad (5.2)$$

Si la temperatura mitja del dia és superior a la temperatura base de referència, el nombre de graus-dia a prendre és 0.

Un llistat de graus-dia en valor mensual per les diferents ciutats de la península 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.

b) El producte ($K_G \cdot A_G$)

Com hem dit ($K_G \cdot A_G$) és el producte de l'àrea de l'edifici pel coeficient global de pèrdues de l'edifici. Aquest coeficient global de pèrdues K_G és una mitja ponderada dels coeficients de transmissió de calor dels diferents tancaments que *tanquen* l'edifici que es vol calefactar.

La normativa bàsica d'edificació referent a les condicions tèrmiques als edificis (NBE-CT-79) defineix aquest coeficient de transmissió global mitjançant l'expressió:

$$K_G = \frac{\sum K_e A_e + 0,5 \cdot \sum K_n A_n + 0,8 \cdot \sum K_q A_q + 0,5 \cdot \sum K_s A_s}{\sum A_e + \sum A_n + \sum A_q + \sum A_s} \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (5.3)$$

On els subíndex e , n , q i s fan referència, respectivament, als coeficients de transmissió tèrmica K i àrees A de tancaments en contacte amb l'ambient exterior, tancaments amb altres edificis o locals no calefactats, tancaments de sostre o coberta i tancaments de separació amb el terreny o soleres. Definit així, podem escriure també

$$K_G A_G = \sum K_e A_e + 0,5 \cdot \sum K_n A_n + 0,8 \cdot \sum K_q A_q + 0,5 \cdot \sum K_s A_s \quad (W/^\circ C) \quad (5.4)$$

on

$$A_G = \sum A_e + \sum A_n + \sum A_q + \sum A_s \quad (m^2) \quad (5.5)$$

Coefficients K de transmissió de calor

De les equacions anteriors se'n dedueix que l'obtenció del valor de K_G passa, en primer lloc, per l'obtenció dels diferents valors dels coeficients de transmissió de calor K dels elements constructius que formen els tancaments existents. Aquests coeficients K corresponen als valors de conductància U mostrats a l'equació 3.1¹:

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

On, repetim allò que dèiem a l'apartat 3.2 (*Mecanismes de transmissió de calor*), \dot{Q} és el flux d'energia per unitat de temps (*Joule / s = W*), A és la superfície de transmissió i U (o K) és la constant de proporcionalitat que anomenem conductància, el valor invers de la qual és la resistència R .

En el cas de disposar d'un tancament o element constructiu específic, com ara un mur, una solera, un sostre o bé una porta ..., que ens separi dos ambients a diferent temperatura, la transferència de calor que es produirà des de l'ambient calent al fred seguirà també l'equació 3.1. I els mecanismes físics que regiran la transmissió de calor també seran els de la *conducció*, la *convecció* i la *radiació*, encara que aquest últim en molta menys mesura i normalment despreciable. Així, per qualsevol tipus de tancament, tots aquest mecanismes es donaran simultàniament i ens trobarem amb un procés com el mostrat a la figura 5.1.

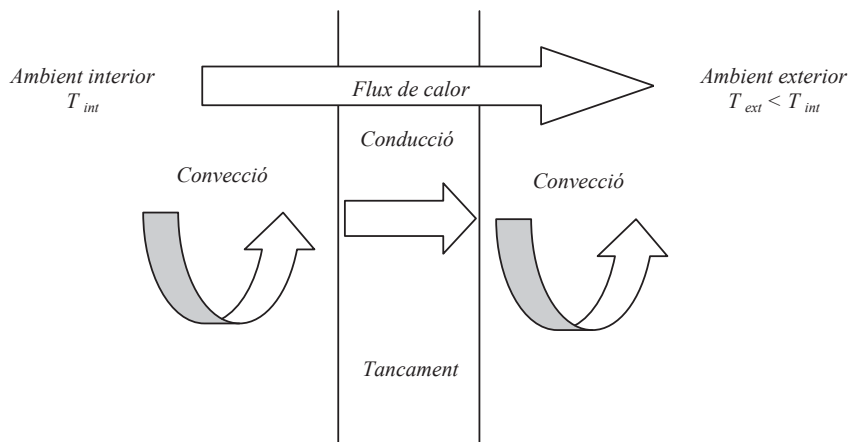


Fig. 5.1 Mecanismes de transmissió de calor esdevinguts en un tancament vertical

El coeficient de transferència de calor K haurà d'incloure, per tant en la seva expressió, les variables que permetin sobretot l'avaluació dels efectes sumats de la conducció i de la convecció. Això és, haurà de tenir en compte els efectes de la conductivitat tèrmica del material λ , el seu gruix e i els dels coeficients superficials de transferència de calor per convecció a banda i banda del tancament h_e i h_i . De forma matemàtica, l'expressió de la conductància total d'un tancament com el de la figura 5.1 s'escriurà com:

¹ L'equivalència de U i K és total; tan sols és un problema de nomenclatura.

$$K_{total} = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_i}}, \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (5.6)$$

Que ens expressarà el flux de calor per unitat de superfície i per grau de diferència de temperatura entre dos ambients separats per un tancament format d'un sol material. En el cas de disposar d'un tancament format per capes de diferents materials constructius com mostra la figura 5.2, la resistència tèrmica total serà la suma de les resistències tèrmiques parcials de cada capa:

$$R_{total} = \frac{1}{h_e} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_i}, \quad (m^2 \cdot ^\circ C/W) \quad (5.7)$$

I la conductància (o coeficient de transmissió tèrmica global) serà:

$$K_{total} = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_i}}, \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (5.8)$$

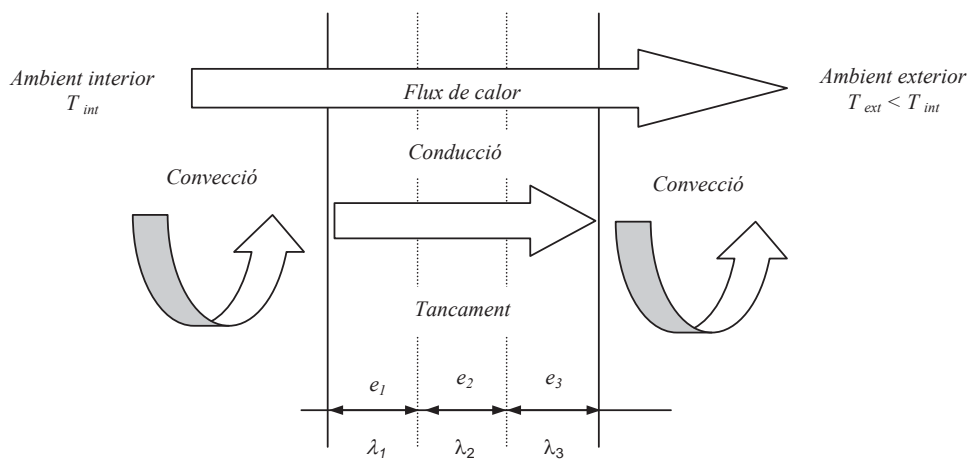





Fig. 5.2 Mecanismes de transmissió de calor esdevinguts en un tancament vertical format per capes de diferents materials constructius

Els valors de les resistències tèrmiques superficials de transmissió de calor per convecció (en $kcal/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$ o $W/m^2 \cdot ^\circ C$) i que ens expressen la transmissió de calor per unitat de superfície en contacte amb aire ambient vénen donats per la taula 5.1 en funció del sentit del flux de calor.

Taula 5.1 Resistència tèrmica superficial de l'aire (convecció, $R = 1/h$) en $m^2 h \text{ } ^\circ\text{C}/\text{kcal}$ ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/W$)

Posició del tancament i sentit del flux de calor	Situació del tancament					
	De separació amb espai exterior o local obert			De separació amb un altre local o cambra d'aire		
	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$
Tancaments verticals o amb pendent sobre l'horitzontal $> 60^\circ$ i flux horitzontal 	0,13 (0,11)	0,07 (0,06)	0,20 (0,17)	0,13 (0,11)	0,13 (0,11)	0,26 (0,22)
Tancaments horitzontal o amb pendent sobre l'horitzontal $\leq 60^\circ$ i flux ascendent 	0,11 (0,09)	0,06 (0,05)	0,17 (0,14)	0,11 (0,09)	0,11 (0,09)	0,22 (0,18)
Tancaments horitzontals i flux descendent 	0,20 (0,17)	0,06 (0,05)	0,26 (0,22)	0,20 (0,17)	0,20 (0,17)	0,40 (0,34)

Els diferents valors de la conductivitat tèrmica λ per alguns dels elements constructius més utilitzats es poden trobar a la taula 5.2.

Taula 5.2 Conductivitats tèrmiques de materials utilitzats en tancaments

Material	λ (W/m $^\circ\text{C}$)	Material	λ (W/m $^\circ\text{C}$)
ROQUES NATURALS		METALLS	
Roques compactes	3,50	Fundició i acer	58
Roques poroses	2,33	Coure	384
Sorra amb humitat natural	1,40	Bronze	64
Sòl coherent humitat natural	2,10	Alumini	204
Sorra	0,58		
Grava	0,81	FUSTA	
Escòria de carbó	0,19	Fustes frondoses	0,21
		Fustes de coníferes	0,14
PASTES, MORTERS I FORMIGONS		Contraxapat	0,14
Morters de calç i bastards	0,87	Tauler conglomerat de partícules	0,08
Mortor de ciment	1,40		
Enlluït de guix	0,30	Moquetes, catifes	0,05
Formigons normals i lleugers			
Formigó armat (normal)	1,63	MATERIALS AÏLLANTS TÈRMICS	
Formigó amb àrids lleugers	0,33	Conglomerat de suro	0,039
Formigó cel·lular amb àrids silícis	0,67	Escuma elastomèrica	0,034
Formigó cel·lular sense àrids	0,09	Llana de vidre	0,037
		Llana mineral	0,040
MAONS I PLAQUETES		Poliestirè expandit	0,037
Fàbrica de maó massís	0,87	Poliestirè extrusionat	0,033
Fàbrica de maó perforat	0,76	Poliestirè reticulat	0,038
Fàbrica de maó buit	0,49	Poliuretà conformat, escuma de Aire (en terme mig, fins a 100 mm)	0,026
			0,18 (m^2K/W)

Exemple 5.1

Avalua la variació del coeficient de transmissió de calor K d'un mur exterior de 30 cm de gruix en els següents casos.

- a) Mur sense aïllar format per 29 cm de maó massís + 1 cm d'enlluït de guix. (**R**: 1,89 W/m²·K)
 b) Mur amb 5 cm de cambra d'aire format per 14 cm de maó massís + 10 cm de maó buit + 1 cm d'enlluït de guix. (**R**: 1,35 W/m²·K)
 c) Com b) però omplint la cambra d'aire amb 5 cm de poliestiré expandit. (**R**: 0,52 W/m²·K)

Per alguns tipus de tancaments específics, la millor solució és consultar la mateixa norma (*Norma Bàsica de la Edificació NBE-CT-79, sobre Condiciones Térmicas en los Edificios*, i a nivell autonòmic, la *Norma Reglamentària d'Edificació sobre Aïllament Tèrmic NRE.AT-87* proposada per la Generalitat de Catalunya) o bibliografia específica.

Destaquem alguns valors per portes i finestres a les taules 5.3 i 5.4 següents:

Taula 5.3 Coeficient de transmissió tèrmica K ($K = 1/R$ on $R = 1/h_i + \Sigma(e/\lambda) + 1/h_e$) d'alguns tipus de finestres en W/m² °C

Tipus d'envidrat	Gruix nominal de la cambra d'aire (en mm)	Tipus de fusteria	Inclinació del buit en relació a l'horitzontal	
			$\geq 60^\circ$	$< 60^\circ$
Senzill		Fusta	5,0	5,5
		Metàl·lica	5,8	6,5
Doble	6	Fusta	3,3	3,5
		Metàl·lica	4,0	4,3
	9	Fusta	3,1	3,3
		Metàl·lica	3,9	4,2
	12	Fusta	2,9	3,1
		Metàl·lica	3,7	4,0
Doble finestra	≥ 30	Fusta	2,6	2,7
		Metàl·lica	3,0	3,2
Formigó translúcid	--	--	3,5	3,7
Els valors d'aquesta taula es donen per la superfície total del forat i no de la superfície del vidre. S'ha estimat que aquesta correspon a 0,7 del forat en fusteria de fusta i 0,8 en fusteria metàl·lica.				

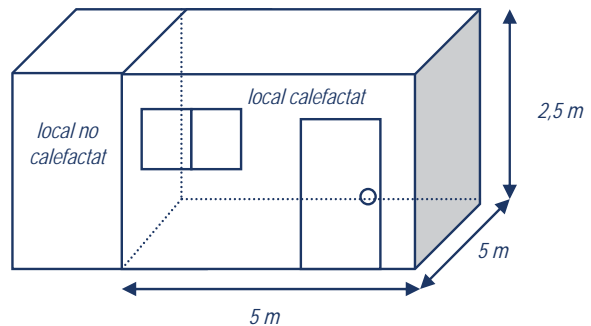
Taula 5.4 Coeficient de transmissió tèrmica K ($K = 1/R$ on $R = 1/h_i + \Sigma(e/\lambda) + 1/h_e$ per separació amb exterior i $R = 1/h_i + \Sigma(e/\lambda) + 1/h_i$ per separació amb local no calefactat) d'algunes portes en $W/m^2 \cdot ^\circ C$

Tipus de porta		Separació amb:	
		Exterior	Local no calefactat
Fusta	Opaca	3,5	2,0
	Envidrat simple en < 30 %	4,0	
	Envidrat simple en 30 a 60 %	4,5	
	Envidrat doble	3,3	
Metàl·lica	Opaca	5,8	4,5
	Envidrat simple	5,8	
	Envidrat doble amb cambra de 6 mm en < 30 %	5,5	
	Envidrat doble amb cambra de 6 mm en 30 a 70 %	4,8	
Vidre sense marc		5,8	4,5

Exemple 5.2

Calcula el K_G i el K_{GA_G} del local calefactat de la figura si les dades constructives son les següents:

Element constructiu	K ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	A_{bruta} (m^2)	A_{neta} (m^2)
Coberta	0,8	25	25
Mur	1,2	50	47,2
Finestra	5,8	1,0	1,0
Porta	4,5	1,8	1,8
Sòl	1,3	25	25



De forma resumida, seguint l'equació 5.3, els resultats venen donats a la taula següent per aquest exemple senzill:

Apartat		Tipus	K (W/m ² ·°C)	A _{net} (m ²)	K·A _{net} (W/°C)	Coefficient corrector	(W/°C)
							$\sum K_e A_e$
e	Tancaments en contacte amb l'ambient exterior	Mur Porta Finestra	1,2 4,5 5,8	34,7 1,8 1,0	41,64 8,1 5,8	1	55,54
							$0,5 \cdot \sum K_n A_n$
n	Tancaments de separació amb altres edificis o local no calefactats	Mur	1,2	12,5	15	0,5	7,5
							$0,8 \cdot \sum K_q A_q$
q	Tancaments de sostre o coberta	Coberta	0,8	25	20	0,8	16
							$0,5 \cdot \sum K_s A_s$
s	Tancaments de separació amb el terreny	Solera	1,3	25	32,5	0,5	16,25
			$A_G = \sum A_i =$		100	$K_G A_G =$	95,29

I finalment

$$K_G = \frac{\sum K_e A_e + 0,5 \cdot \sum K_n A_n + 0,8 \cdot \sum K_q A_q + 0,5 \cdot \sum K_s A_s}{\sum A_e + \sum A_n + \sum A_q + \sum A_s} = \frac{95,29}{100} = 0,95 \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{°C})$$

Si no es pot calcular tal i com s'ha exemplificat anteriorment, el producte $K_G A_G$ es pot arribar a estimar a partir del consum anual de combustible de l'edifici segons l'equació 5.9 com

$$K_G A_G = \frac{N_C \cdot PCI_C \cdot \eta_{\text{caldera}}}{GD_{\text{any}}} \quad (5.9)$$

On N_C són les unitats de combustible consumides en calefacció durant un any, PCI_C és el poder calorífic inferior del combustible (vegeu la taula 5.5) i η_{caldera} és el rendiment mitjà de la caldera (actualment força elevats, de l'ordre de 0,85 a 0,9 caient fins a 0,6 per velles calderes de fuel, i amb valor 1 per a calefacció elèctrica)².

² Pel càlcul del producte $K_G A_G$, l'expressió 5.4 difereix de la 5.9 en que aquesta última té en compte les pèrdues per *infiltracions* (doncs treballem amb dades de consum de combustible directament) mentre que a la primera caldria estimar-les, calcular-les i sumar el nou terme obtingut al calculat per l'expressió 5.4, doncs ens proporciona les pèrdues únicament degudes als tancaments.

Taula 5.5 PCI d'alguns combustibles de calefacció.

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

5.1.2 Necessitats tèrmiques per l'escalfament d'ACS

Les necessitats tèrmiques que suposa l'escalfament de l'aigua calenta sanitària depenen, 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:

$$L_{ACS} = 35 \left(\frac{\text{litres}}{\text{persona i dia}} \right) \cdot N_H \cdot N_M \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} \cdot (T_{ACS} - T_{xarxa}) \quad (5.10)$$

on ρ_{H_2O} és la densitat de l'aigua (1 kg/litre), $c_{p_{H_2O}}$ 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 per cada un dels mesos) i la temperatura de l'aigua calenta que desitgem, normalment entre els 40°C i 45°C.

Exemple 5.3

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 $K_G A_G$ 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

$$L_{CAL} = (K_G \cdot A_G) \cdot GD_{mes} \quad [W]$$

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

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

El producte ($K_G \cdot A_G$), com hem dit, és el coeficient global de pèrdues tèrmiques de l'edifici i que nosaltres considerarem 475 W/°C. I GD el nombre de graus-dia del mes (segons les taules de l'annex). Noteu com els GD mensuals no coincideixen amb els de les taules perquè els d'aquest exemple s'han obtingut multiplicant la columna dels GGD_{diaris} 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 $T_{ACS} = 45$ °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}	GD diaris (15°C - T_a)	GD mensuals	L_{CAL} (MJ/mes) (Eq. 5.1)	L_{ACS} (MJ/mes) (Eq. 5.10)	L_{TOT} (MJ/mes) (Eq. 5.11)
G	31	4,9	5	10,1	313,1	12.850	908	13.758
F	28	7,2	6	7,8	218,4	8.963	800	9.763
M	31	11,4	8	3,6	111,6	4.580	840	5.420
A	30	14,6	10	0,4	12,6	492	769	1.262
M	31	18,3	11	0,0	0,0	0	772	772
J	30	21,9	12	0,0	0,0	0	725	725
J	31	24,8	13	0,0	0,0	0	727	727
A	31	24,6	12	0,0	0,0	0	749	749
S	30	21,6	11	0,0	0,0	0	747	747
O	31	15,5	10	0,0	0,0	0	795	795
N	30	9,5	8	5,5	165,0	6.772	813	7.585
D	31	5,7	5	9,3	288,3	11.832	908	12.740
Totals	365				1108,4	45.489	9.555	55.043

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

Edifici	Consum d'ACS
Hospitals i clíniques (*)	60 litres / llit
Residències geriàtriques (*)	40 litres / persona
Escoles	5 litres / alumne
Aquateraments (*)	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:

$$L_{TOT} = L_{ACS} + L_{CAL} \quad (5.11)$$

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 instal·lador 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:

$$Q_{TOT} - L_{TOT} + E_{AUX} = \Delta U \quad (5.12)$$

On Q_{TOT} és l'energia solar útil total obtinguda durant el mes, L_{TOT} és la suma de les necessitats tèrmiques durant el mes, E és l'energia auxiliar total requerida durant el mes i ΔU és l'intercanvi d'energia en la unitat d'emmagatzematge, que es pot considerar nul davant dels altres valors. Així, l'equació 5.12 es pot escriure com:

$$Q_{TOT} = L_{TOT} - E_{AUX} \quad (5.13)$$

Que podem adimensionalitzar com:

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

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

L'equació 5.14 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 5.14 suggereix que f es pot relacionar empíricament amb els dos grups adimensionals següents:

$$X = \frac{A_c \cdot F'_R \cdot U_L \cdot (T_{ref} - T_a) \cdot \Delta t}{L_{TOT}} \quad (5.15)$$

$$Y = \frac{A_c \cdot F'_R \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot \bar{H}_T \cdot N_M}{L_{TOT}} \quad (5.16)$$

On Δt 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 5.15 i 5.16 es poden escriure de nou en una forma lleugerament modificada per conveniència de càlcul com:

$$\frac{X}{A_c} = \frac{F'_R U_L \cdot \left(\frac{F'_R}{F_R}\right) \cdot (100 - T_a) \cdot \Delta t}{L_{TOT}} \quad (5.17)$$

$$\frac{Y}{A_c} = \frac{F_R (\tau \alpha) \cdot \left(\frac{F'_R}{F_R}\right) \cdot N_M \cdot \bar{H}_T}{L_{TOT}} \quad (5.18)$$

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 5.3, per al cas de sistemes que utilitzin líquid com a fluid portador de calor, i a la figura 5.4 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 5.15 i 5.16. 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

$$f = 1,029 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,245 \cdot Y^2 + 0,0018 \cdot X^2 + 0,0215 \cdot Y^3 \quad (5.19)$$

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

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

$$f = 1,04 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,159 \cdot Y^2 + 0,00187 \cdot X^2 + 0,0095 \cdot Y^3 \quad (5.20)$$

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

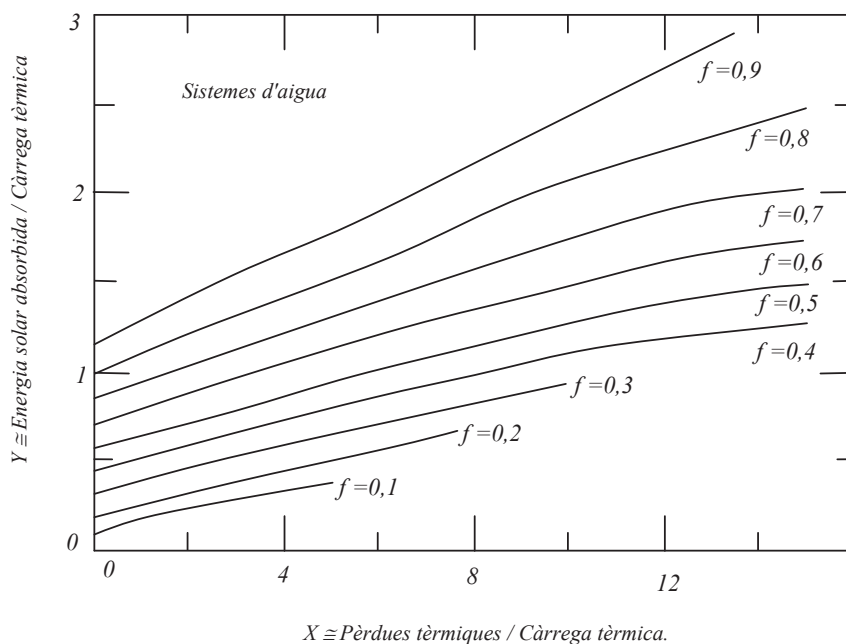


Fig. 5.3 Corbes- f per sistemes d'aigua.

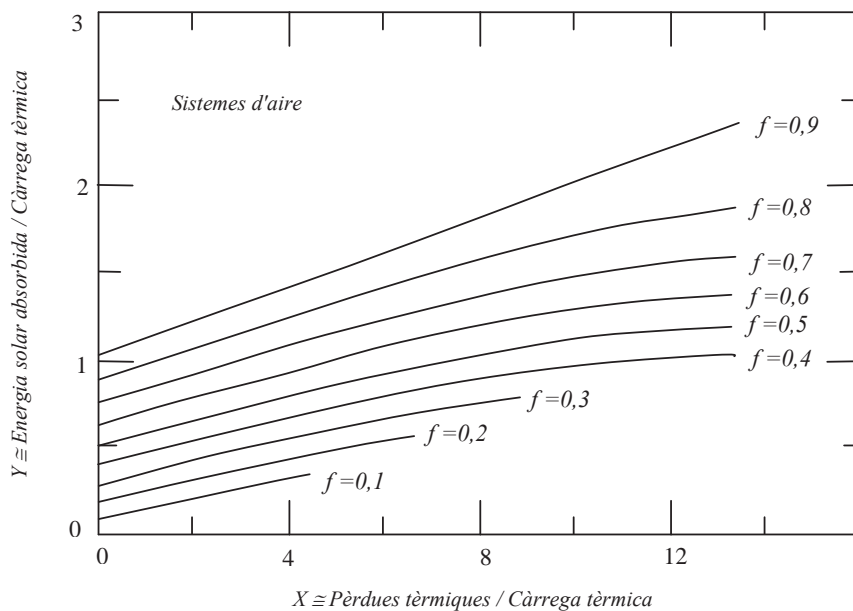


Fig. 5.4 Corbes- f per sistemes d'aire.

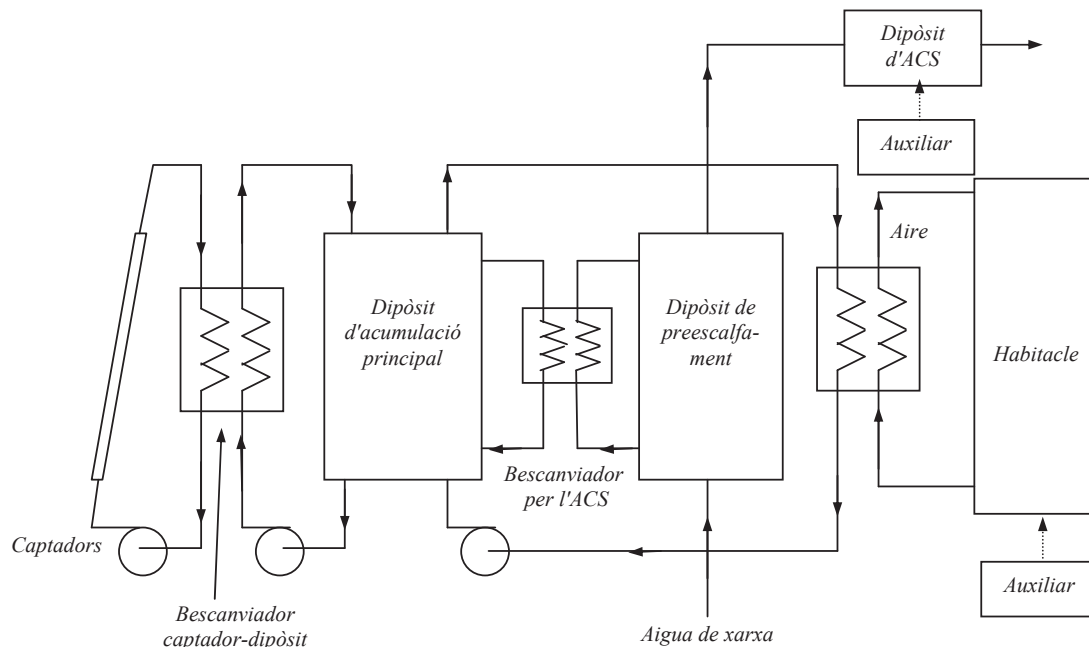


Fig. 5.5 Esquema d'una configuració típica d'un sistema que utilitzi líquid com a sistema de transport energètic.

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 5.5, exigeix que els diferents paràmetres que determinen el comportament del sistema, i que hem estudiat al llarg de tota l'obra, es moguin entre els valors donats per la taula 5.7.

Taula 5.7 Paràmetres de disseny típics pels sistemes que utilitzen líquid com a sistema de transport energètic

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

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 anticongelat 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·m².

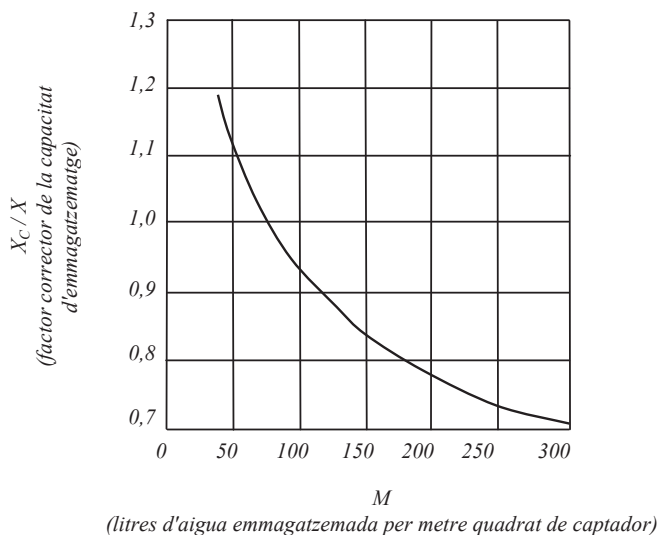


Fig. 5.6 Factor de correcció d'emmagatzematge.

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 m² de superfície captadora (valor de disseny), ve reflectit per la figura 5.6 i l'equació 5.21:

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{M}{75} \right)^{-0,25} \quad (5.21)$$

on M és la capacitat d'emmagatzematge per m² de superfície captadora del nostre sistema, diferent als 75 l/m² de disseny, i que es pot moure entre 37,5 i 300 l / m².

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 .

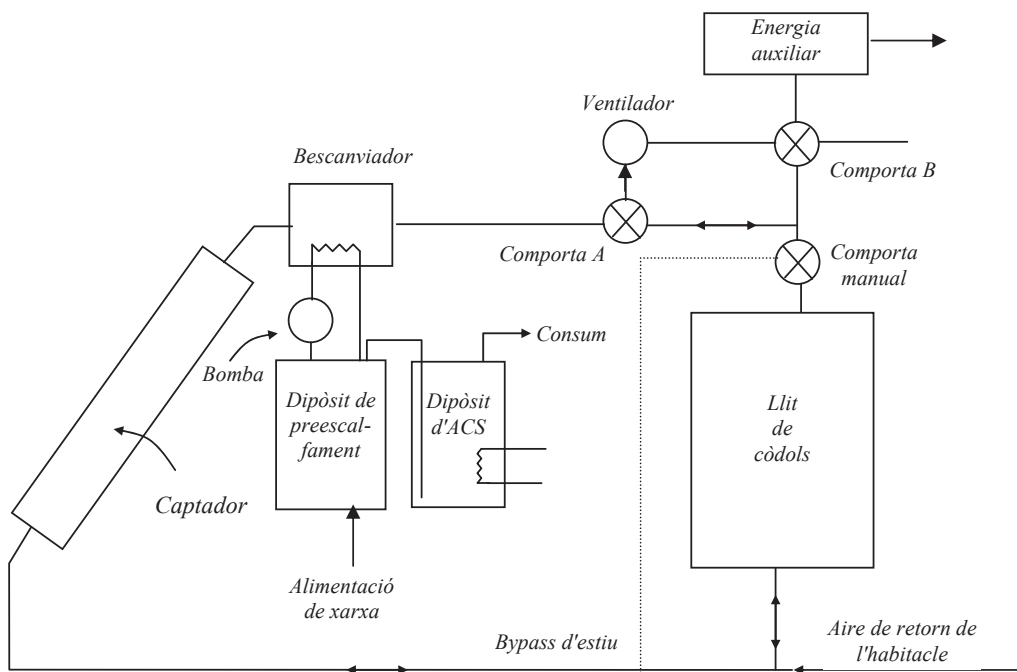


Fig. 5.7 Esquema d'una configuració típica d'un sistema que utilitzi aire com a sistema de transport energètic

Taula 5.8 Paràmetres de disseny típics pels sistemes que utilitzen aire com a sistema de transport energètic.

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

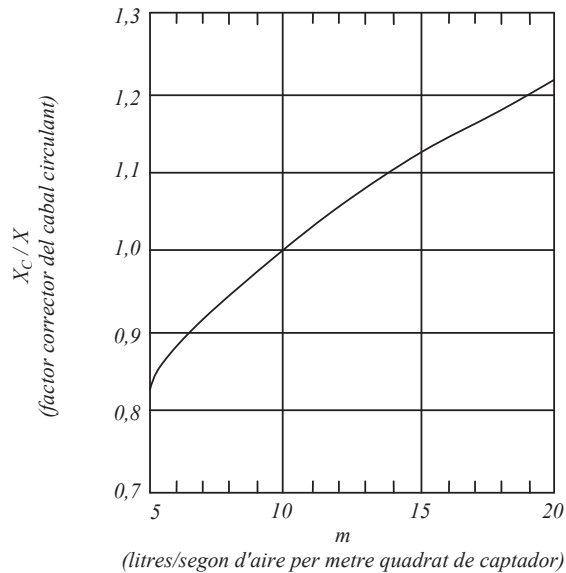


Fig. 5.8 Factor de correcció pel cabal circulant.

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 m² de superfície captadora (valor de disseny), ve reflectida a la figura 5.8 i l'equació 5.22:

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{m}{10,1} \right)^{0,28} \quad (5.22)$$

on m és el cabal circulant per m² de superfície captadora del nostre sistema i que es pot moure entre 5 i 20 l/s·m².

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 m² de superfície captadora (valor de disseny), ve reflectit a la figura 5.9 i l'equació 5.23:

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{V}{0,25} \right)^{-0,3} \quad (5.23)$$

on V és la capacitat d'emmagatzematge en m³ de roca per m² de superfície captadora del nostre sistema, diferent als 0,25 de disseny, i que es pot moure entre 0,125 i 1 m³ / m².

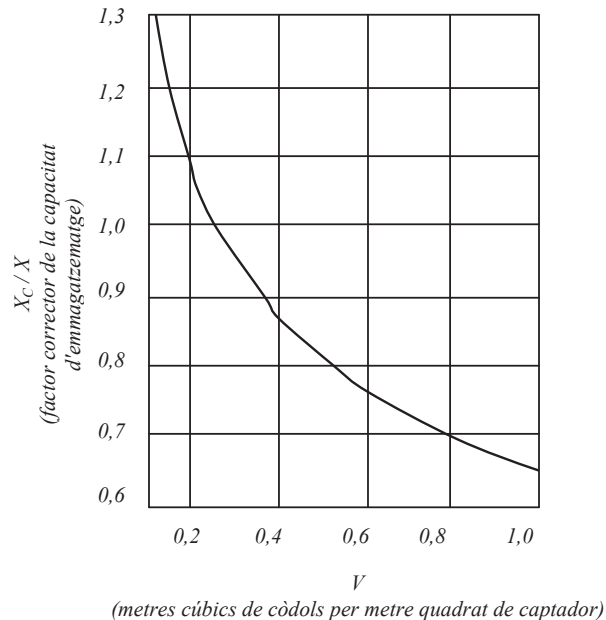


Fig. 5.9 Factor de correcció d'emmagatzematge.

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:

$$\frac{X_C}{X} = \frac{11,6 + 1,18 \cdot T_{ACS} + 3,86 \cdot T_{XARXA} - 2,32 \cdot T_a}{(100 - T_a)} \quad (5.24)$$

Per a tots els casos exposats, els factors correctors calculats amb les expressions anteriors multipliquen l'equació 5.15 (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 $F_R U_L = 4,9 \text{ (W / } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2)$

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} (MJ/mes) Exemple 5.3	X/A ($1/m^2$) Eq. 5.17	H_T (J/dia- m^2) Exemple 2.5	Y/A ($1/m^2$) Eq. 5.18
G	31	2,68E+06	4,9	95,1	13.758	0,084	7,79E+06	0,013
F	29	2,42E+06	7,2	92,8	9.763	0,109	1,18E+07	0,026
M	31	2,68E+06	11,4	88,6	5.420	0,205	1,61E+07	0,069
A	30	2,59E+06	14,6	85,4	1.262	0,833	1,88E+07	0,337
M	31	2,68E+06	18,3	81,7	772	1,341	1,96E+07	0,591
J	30	2,59E+06	21,9	78,1	725	1,330	2,05E+07	0,639
J	31	2,68E+06	24,8	75,2	727	1,316	2,04E+07	0,656
A	31	2,68E+06	24,6	75,4	749	1,278	1,96E+07	0,611
S	30	2,59E+06	21,6	78,4	747	1,307	1,76E+07	0,531
O	31	2,68E+06	15,5	84,5	795	1,320	1,39E+07	0,409
N	30	2,59E+06	9,5	90,5	7.585	0,141	9,27E+06	0,028
D	31	2,68E+06	5,7	94,3	12.740	0,090	6,35E+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 5.19:

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

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

Àrea = 2 m ²			Fracció d'energia solar (MJ/mes)	Àrea = 4 m ²			Fracció d'energia solar (MJ/mes)
X	Y	f		X	Y	f	
0,167	0,026	0,016	223	0,334	0,053	0,032	442
0,218	0,053	0,040	387	0,436	0,106	0,078	762
0,410	0,138	0,111	603	0,820	0,276	0,214	1161
1,666	0,673	0,485	612	3,332	1,347	0,797	1006
2,683	1,183	0,748	578	5,365	2,365	1,000	772
2,660	1,278	0,800	580	5,319	2,557	1,000	725
2,632	1,312	0,818	595	5,264	2,625	1,000	727
2,555	1,223	0,777	582	5,111	2,445	1,000	749
2,614	1,063	0,685	512	5,228	2,125	0,996	744
2,641	0,817	0,530	421	5,282	1,634	0,828	658
0,282	0,055	0,038	287	0,564	0,110	0,075	565
0,180	0,023	0,012	155	0,360	0,047	0,024	308
total			5.535 (MJ/any)	total			8.620 (MJ/any)
f anual			0,101	f anual			0,157

Àrea = 8 m ²			Fracció d'energia solar (MJ/mes)	Àrea =16 m ²			Fracció d'energia solar (MJ/mes)	
X	Y	f		X	Y	f		
0,669	0,106	0,063	871	1,338	0,211	0,123	1.692	
0,871	0,211	0,152	1.479	1,742	0,423	0,285	2.783	
1,640	0,553	0,396	2.146	3,280	1,106	0,674	3.651	
6,664	2,693	1,000	1.262	13,329	5,386	1,000	1.262	
10,731	4,730	1,000	772	21,461	9,460	1,000	772	
10,639	5,114	1,000	725	21,278	10,228	1,000	725	
10,528	5,250	1,000	727	21,055	10,499	1,000	727	
10,222	4,891	1,000	749	20,444	9,782	1,000	749	
10,457	4,251	1,000	747	20,913	8,501	1,000	747	
10,564	3,269	1,000	795	21,127	6,538	1,000	795	
1,128	0,221	0,144	1.095	2,256	0,441	0,271	2.054	
0,719	0,093	0,048	609	1,438	0,186	0,093	1.189	
total			11.978 (MJ/any)				total	17.147 (MJ/any)
f anual			0,218				f anual	0,312

Àrea =24 m ²			Fracció d'energia solar (MJ/mes)	Àrea = 32 m ²			Fracció d'energia solar (MJ/mes)	
X	Y	f		X	Y	f		
2,007	0,317	0,179	2.464	2,676	0,423	0,232	3.188	
2,613	0,634	0,402	3.924	3,485	0,846	0,503	4.914	
4,920	1,659	0,855	4.632	6,561	2,212	0,961	5.209	
19,993	8,079	1,000	1.262	26,657	10,772	1,000	1.262	
32,192	14,190	1,000	772	42,923	18,920	1,000	772	
31,917	15,341	1,000	725	42,556	20,455	1,000	725	
31,583	15,749	1,000	727	42,110	20,998	1,000	727	
30,666	14,672	1,000	749	40,888	19,563	1,000	749	
31,370	12,752	1,000	747	41,826	17,002	1,000	747	
31,691	9,807	1,000	795	42,254	13,076	1,000	795	
3,384	0,662	0,381	2.889	4,511	0,883	0,476	3.608	
2,157	0,279	0,137	1.741	2,877	0,372	0,178	2.268	
total			21.427 (MJ/any)				total	24.963 (MJ/any)
f anual			0,389				f anual	0,454

Àrea = 50 m ²			Fracció d'energia solar (MJ/mes)	Àrea = 80 m ²			Fracció d'energia solar (MJ/mes)
X	Y	f		X	Y	f	
4,181	0,660	0,339	4.659	6,689	1,057	0,485	6.671
5,445	1,321	0,681	6.648	8,711	2,114	0,854	8.336
10,251	3,456	1,000	5.420	16,401	5,529	1,000	5.420
41,652	16,832	1,000	1.262	66,644	26,931	1,000	1.262
67,067	29,563	1,000	772	107,307	47,300	1,000	772
66,493	31,961	1,000	725	106,389	51,138	1,000	725
65,797	32,809	1,000	727	105,275	52,495	1,000	727
63,887	30,567	1,000	749	102,219	48,908	1,000	749
65,353	26,566	1,000	747	104,565	42,506	1,000	747
66,022	20,431	1,000	795	105,636	32,690	1,000	795
7,049	1,379	0,641	4.861	11,279	2,207	0,805	6.103
4,495	0,581	0,264	3.362	7,192	0,930	0,388	4.945
total			30.727 (MJ/any)	total			37.253 (MJ/any)
f anual			0,558	f anual			0,677

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

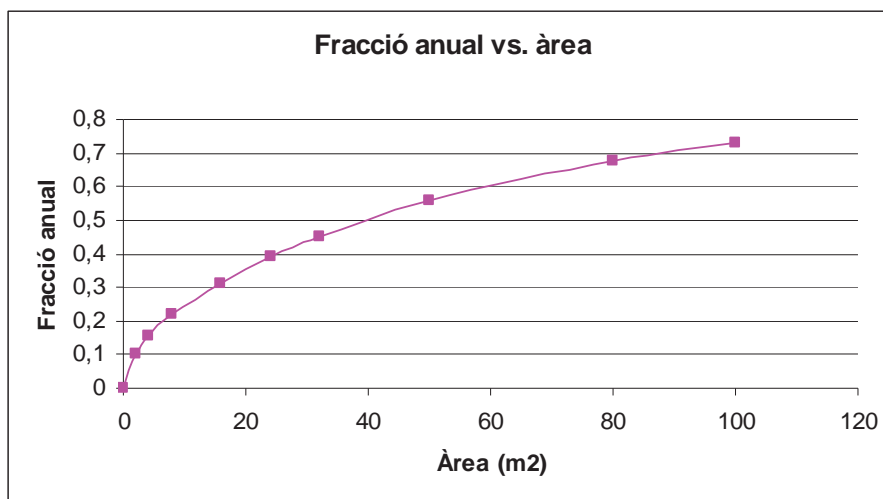


Fig. 5.10 Fracció solar anual en funció de l'àrea de captació.

Fixem-nos com a mida que l'àrea de captació augmenta, es fa cada cop més i més difícil d'augmentar la fracció solar anual de forma proporcional: al principi creix de forma brusca (fins als 10 m² aproximadament) per posteriorment decaure ràpidament arribant de forma asintòtica a la fracció anual de 0,8. Això serà sempre així i ens indica la no linealitat existent entre l'energia captada i la inversió a realitzar en metres quadrats de captació.

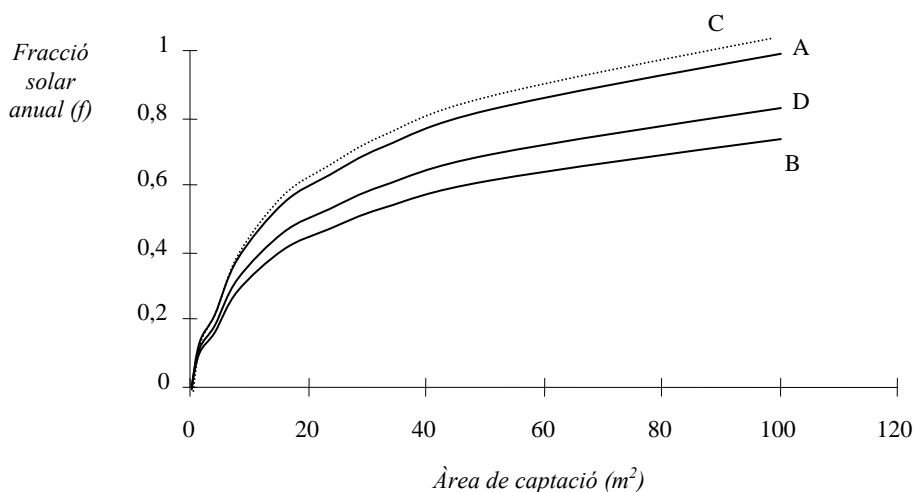


Fig. 5.11 Fracció solar anual en funció de l'àrea de captació per diferents sistemes:

- 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 l/m²
- 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 podem 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 5.11 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 5.10.

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 temperatura ambient mitjana mensual (en °C)
 GD 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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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
	GD	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_a	6,0	6,7	9,3	11,0	13,0	16,2	18,1	18,7	16,8	13,1	8,9	6,2
	GD	328,0	263,5	263,5	204,0	74,4	0	0	0	0	114,7	128,0	291,5
	T_{XARXA}	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_a	5,0	6,6	10,0	12,7	15,8	20,6	24,2	23,7	19,8	14,0	9,0	5,6
	GD	321,7	246,4	208,1	122,9	41,1	2,0	0	0	7,8	86,0	209,1	309,8
	T_{XARXA}	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Màlaga ($\phi = 36,85$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	11,8	12,6	14,6	16,2	19,1	22,6	24,9	25,4	23,0	19,3	15,8	12,9
	GD	126,0	88,8	75,2	36,3	2,2	0	0	0	0	5,8	37,5	103,5
	T_{XARXA}	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_a	9,5	10,7	13,3	15,1	18,7	22,7	25,7	26,1	23,4	18,5	14,0	10,7
	GD	175,5	130,2	99,1	46,8	7,0	0	0	0	0	12,9	64,6	166,5
	T_{XARXA}	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_a	7,0	8,1	11,0	12,6	16,4	19,2	21,7	19,9	17,7	16,2	9,7	7,4
	GD	244,9	168,0	136,4	57,0	0	0	0	0	0	0	141,0	220,1
	T_{XARXA}	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_a	7,2	8,1	9,2	10,4	13,5	15,9	15,8	18,4	16,9	13,8	9,9	8,3
	GD	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_{XARXA}	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_a	3,3	4,6	8,2	10,5	13,5	18,1	21,0	20,8	17,6	12,2	7,2	3,9
	GD	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_{XARXA}	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_a	10,1	10,5	12,2	14,5	17,3	21,4	24,0	24,5	22,6	18,4	14,3	11,5
	GD	185,2	153,2	139,8	92,1	14,6	0,2	0	0	0,1	21,9	89,8	147,3
	T_{XARXA}	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_a	16,8	17,0	17,7	18,5	19,6	21,2	22,9	23,6	23,3	22,3	20,2	17,8
	GD	0,9	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
	T_{XARXA}	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_a	4,6	5,4	9,0	11,1	14,4	17,8	20,2	20,6	18,3	13,4	8,2	5,1
	GD	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_{XARXA}	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_a	9,2	10,1	12,3	14,2	15,6	18,6	20,1	20,5	18,2	14,9	11,9	9,5
	GD	146,0	121,4	101,0	55,6	23,5	1,5	0	0	2,4	15,8	75,9	151,6
	T_{XARXA}	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_a	3,7	4,9	8,2	10,5	13,6	18,4	21,5	21,3	18,1	12,5	7,5	4,3
	GD	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_{XARXA}	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_a	17,4	17,5	18,2	19,2	20,4	22,2	24,3	24,7	24,1	22,7	20,5	18,4
	GD	1,9	2,3	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	T_{XARXA}	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8

S, Sebastià ($\phi = 43,32$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	7,7	8,0	10,7	11,8	13,4	16,7	18,4	18,9	18,1	14,6	10,9	8,0
	GD	207,7	179,2	142,6	99,0	6,2	0	0	0	0	0	111,0	167,4
	T_{XARXA}	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Santander ($\phi = 43,47$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	9,3	9,2	11,5	12,3	14,2	16,9	18,8	19,3	18,2	15,3	12,2	9,9
	GD	171,4	148,1	157,7	128,1	52,8	6,9	0	0	5,9	47,7	98,8	167,3
	T_{XARXA}	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Saragossa ($\phi = 41,50$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	6,1	7,7	11,3	13,7	17,0	21,2	23,9	23,7	20,6	15,4	10,2	6,8
	GD	285,3	221,5	186,8	49,4	26,4	0,8	0	0	3,3	51,7	175,6	285,8
	T_{XARXA}	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Segòvia ($\phi = 40,95$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	2,4	4,0	7,6	10,1	13,2	18,2	21,7	21,3	17,5	11,8	6,6	3,1
	GD	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_{XARXA}	4	5	7	9	10	11	12	11	10	9	7	4
Sevilla ($\phi = 37,41$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	10,3	11,6	14,1	16,4	19,1	23,4	26,3	26,4	23,7	19,2	14,6	11,0
	GD	157,3	102,3	69,9	25,2	3,9	0	0	0	0	5,5	53,9	161,8
	T_{XARXA}	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Sòria ($\phi = 41,77$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	2,3	3,5	6,6	8,9	11,9	16,5	19,6	19,5	16,4	11,0	6,2	3,1
	GD	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_{XARXA}	4	5	7	9	10	11	12	11	10	9	7	4
Tarragona ($\phi = 41,42$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	8,9	10,0	11,7	13,7	16,7	20,3	23,0	23,2	21,7	17,7	13,3	10,3
	GD	187,2	146,7	133,5	66,8	13,7	0,4	0	0	0,7	18,7	100,0	178,2
	T_{XARXA}	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
Terol ($\phi = 40,92$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	5	6	9	12	16	20	23	24	19	14	9	6
	GD	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_{XARXA}	4	5	7	9	10	11	12	11	10	9	7	4
Toledo ($\phi = 39,85$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	5,9	7,3	10,6	13,4	16,9	22,1	26,1	25,3	21,3	11,2	9,9	6,4
	GD	265,4	208,0	176,7	91,1	29,5	1,5	0	0	2,0	37,2	155,5	284,0
	T_{XARXA}	6	7	9	11	12	13	14	13	12	11	9	6
València ($\phi = 39,46$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	10,3	10,9	13,1	14,8	17,8	21,3	23,9	24,5	22,4	18,3	14,4	11,1
	GD	176,2	132,2	115,8	49,9	4,6	0	0	0	0,1	11,0	72,7	175,3
	T_{XARXA}	8	9	11	13	14	15	16	15	14	13	11	8
Valladolid ($\phi = 41,65$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	3,5	5,1	8,7	10,9	14,0	18,5	21,3	20,8	17,9	12,8	7,7	4,3
	GD	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_{XARXA}	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Vitòria ($\phi = 42,85$)	G	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	T_a	4,5	5,3	8,7	10,4	13,1	16,7	18,9	19,3	17,2	12,7	8,3	5,5
	GD	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_{XARXA}	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). Aquests vint anys són els que es suposen com a temps de vida regular de l'element que imposa el cost variable de les instal·lacions solars tèrmiques això és d'un captador pla. Però val a dir que hi ha elements com l'acumulador o el bescanviador que, sense el manteniment adequat, poden resultar molt menys durables.

En aquest tema veurem quines són les eines econòmiques que ens permeten avaluar la viabilitat econòmica d'un projecte d'energia solar tèrmica i estudiarem els criteris que més ens poden ajudar a l'hora de dimensionar el nostre sistema. Veurem que això serà de manera prou correcta sobre el paper, encara que molt aproximada des d'un punt de vista quantitatiu exacte.

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. L'aplicabilitat de tots ells és genèrica i no exclusiva dels sistemes amb energia solar, podent-se utilitzar per comparar i avaluar qualsevol tipus de projecte que impliqui una despesa econòmica a recuperar en un plaç temporal determinat. Val a dir, però, que a mesura que l'estudi econòmic es fa més i més complet, les incerteses augmenten de forma proporcional en introduir valors que segurament deixaran de ser constants al llarg del temps i l'aproximació a la realitat es fa cada cop més difícil.

Potser el criteri més utilitzat és del *valor actual net (VAN)*, basat en la suma dels *fluxos de caixa* existents al llarg del període de vida de la instal·lació però en valor monetari actual o present, és a dir, tenint en compte el valor del diner en el temps. El *VAN* es pot expressar en termes de taxa mínima d'interès a partir de la qual el projecte no dona ni pèrdues ni beneficis per definir la *taxa interna de retorn (TIR)* com més endavant veurem. I veurem també com d'aquest se'n deriva el *criteri del temps de recuperació de la inversió*, definit de la forma més usual com el temps necessari per què els beneficis derivats d'una activitat compensin la inversió total inicial. En el cas de l'energia solar, això seria el temps que ha de passar fins que es pugui recuperar la inversió en forma de combustible estalviat.

Existiria encara un criteri més primitiu que seria el que anomenen *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 a utilitzar. El sistema que ens proporioni el cost d'operació i manteniment mínim al llarg de la vida del sistema utilitzant només energia solar serà l'afavorit.

6.1.1 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 valor 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, forma de càlcul es coneix com *interès simple*, 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 :

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

i

$$F_n = P(1 + in) \quad (6.3)$$

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

$$I_n = iF_{n-1} \quad (6.4)$$

i

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

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:

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

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

Exemple 6.1

Un individu rep en préstec 1.000€ 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

$$F_n = P(1+i)^n = 1.000(1+0,06)^5 = 1338,20 \text{ €}$$

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:

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

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

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

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) i per tractar-se de no res més que processos d'interès en definitiva, les equacions que permeten tractar la influència de la inflació en el preu dels bens de consum són les mateixes que en el cas de l'interès (equacions 6.6 o 6.7) vistes anteriorment tan sols substituint i per d ¹.

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:

- *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:

$$P = \sum_{k=1}^n A(1+i)^{-k} \rightarrow P = A \cdot \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (6.8)$$

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

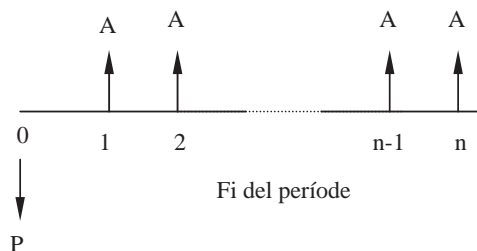


Fig. 6.1 Diagrama de flux d'efectiu per a una sèrie de tipus uniforme.

¹ Alguns cops podem trobar l'equació 6.6 escrita com $F_n = P(1+d)^{n-1}$, on es té en compte que la inflació es coneix a finals d'anys mentre que l'interès s'aplica a principis.

- *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:

$$P = \sum_{k=1}^n (k-1) G (1+i)^{-k} \rightarrow P = G \left[\frac{1 - (1+ni)(1+i)^{-n}}{i^2} \right] \quad (6.9)$$

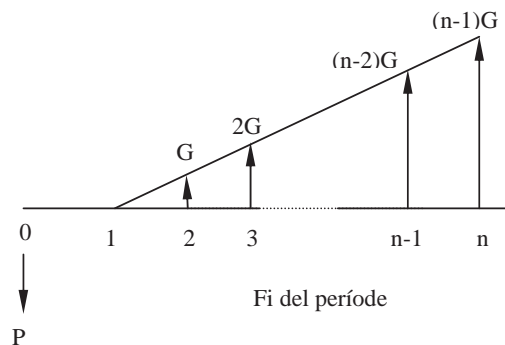


Fig. 6.2 Diagrama de flux d'efectiu per una sèrie tipus gradient.

- *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:

$$P = \sum_{k=1}^n A \frac{(1+d)^{k-1}}{(1+i)^k} = A \cdot P(n, d, i) = A \cdot \begin{cases} \frac{1}{(i-d)} \left[1 - \left(\frac{1+d}{1+i} \right)^n \right] & \text{si } i \neq d \\ \frac{n}{1+d} & \text{si } i = d \end{cases} \quad (6.10)$$

Fixem-nos com donant un valor nul a d , l'equació 6.10 ens permet obtenir l'equació 6.8, corresponent a una sèrie uniforme de fluxos d'efectiu:

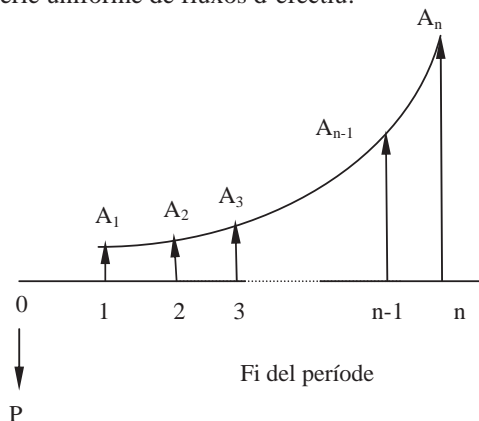


Fig. 6.3 Diagrama de flux d'efectiu per una sèrie geomètrica.

6.2 Anàlisi econòmica dels sistemes fototèrmics

Els sistemes solars tèrmics 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 pot tenir en compte factors tan variats 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. Però moltes vegades la introducció de variables que intentin fer l'estudi econòmic més i més acurat no fan més que introduir-hi més i més incerteses a llarg plaç.

L'anàlisi econòmica d'aquests sistemes es veurà també afectada per l'ús que es fa dels mateixos doncs el cost d'inversió, la despesa associada al sistema d'acumulació o la fracció solar anual que ens fixarà l'estalvi en combustible, podran ser causa i afectaran, a la vegada, el funcionament de la nostra instal·lació, ja siguin sistemes d'aigua calenta sanitària domèstics amb elevada fracció solar i mida reduïda, sistemes d'aigua calenta sanitària amb calefacció de mida mitjana o sistemes per calefacció amb baixa fracció anual però amb gran necessitat d'acumulació.

Els tres criteris d'anàlisi econòmica que aquí presentem són força coneguts i utilitzats de forma diversa, però en realitat deriven del mateix: el criteri del valor actual net.

6.2.1 El valor actual net (VAN)

El criteri d'anàlisi econòmica que presentem, conegut pel *criteri del valor actual net* o *VAN*, no és res més que un càlcul d'interès acumulat que porta a *valor monetari actual* les despeses i beneficis existents al llarg del temps de vida de la instal·lació per poder-ho comparar amb el cost de la inversió també amb valor monetari actual. Com sempre, el nostre problema és el de comparar valors monetaris en espais temporals diferents doncs el diner té un valor diferent en funció del moment temporal en que es troba. Així doncs, per operar amb valors monetaris esdevinguts en punts temporals diferents, ens cal portar els citats valors a un mateix punt temporal. Explicuem-ho.

Definim la relació entre beneficis i depeses d'una explotació qualsevol i per un període temporal n com el flux de caixa FC donat per l'equació 9.11 com

$$FC_n = (\text{Beneficis} - \text{Despeses})_n \quad (6.11)$$

El *valor actual* (avui) d'aquest flux de caixa esdevingut a finals del període temporal n (normalment escollit com a un any) i afectat per una taxa fixa d'interès i (que normalment associarem al valor de la inflació o *ipc*), el podem escriure seguint l'equació 6.7 com

$$VA = \frac{FC}{(1+i)^n} \quad (6.12)$$

Per una determinada explotació, existirà un primer desemborsament inicial I (*inversió inicial*) que es voldrà recuperar a partir dels beneficis nets generats per la mateixa (això és, dels beneficis bruts menys les despeses). L'estat d'aquesta recuperació avaluada en el punt temporal actual i a partir dels fluxos de caixa que es vagin repetint per cada període temporal al llarg del cicle de vida de l'explotació es coneix com *valor actual net* i es podrà escriure segons l'equació 6.8 com

$$VAN = -I + \frac{FC_1}{(1+i)} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} = -I + \sum_{k=1}^n FC_k (1+i)^{-k} = -I + FC \cdot \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (6.13)$$

On I és la inversió inicial total, FC_k és el flux de caixa del període considerat, i és l'índex de preus al consum i n el nombre d'anys. Pels sistemes tèrmics solars, aquests valors es poden definir d'una forma una mica més específica.

- *Inversió inicial.* La inversió inicial I en un sistema d'energia solar ha de tenir en compte el preu global de l'equip (captadors, ventiladors o bombes, bescanviadors, controls, canonades, estructures de suport) i el preu de la seva instal·lació a menys que aquesta reverteixi en la mateixa edificació de la casa (per exemple, en casos de captadors que funcionin com a tancaments). La despesa instal·lada d'un equip solar es pot desglossar en dos termes, un de fix i un de variable, funció de l'àrea de captació:

$$C_S = C_{SA} A_C + C_{SF} \quad (6.14)$$

on C_S és el cost total de l'equip solar instal·lat, C_{SA} és el cost variable funció de l'àrea de captació (on s'hi inclou la compra i la instal·lació del captador i un percentatge del cost d'emmagatzematge), A_C és l'àrea de captació i C_{SF} és el cost solar fix, independent de l'àrea de captació (on s'hi inclouen controls, ventiladors, bombes, bescanviadors de calor, sondes i instal·lació general dels diferents components).

En instal·lacions petites ($A_C < 10 \text{ m}^2$) per ACS² i no compactes³, la major part del cost ve determinat per components que són independents de l'àrea de captació (bàsicament elements de control i sensors) o que no augmenten en proporció a la mateixa (vàlvules, bombes, canonades i dipòsits). Per tant, l'equació 9.14 es converteix en una corba que decreix ràpidament a mida que creix A_C . L'obtenció dels valors numèrics corresponents a C_{SA} i C_{SF} és funció de l'estat actual del mercat i es pot aconseguir mitjançant una recta de regressió que ens relacioni el pressupost de la instal·lació amb l'àrea de captació instal·lada. Per sistemes amb captadors plans instal·lats i fins a 5 m^2 de captació, els preus oscil·len entre els 800 i els 1.300 € per m^2 incloent-hi emmagatzematge, instal·lació i impostos⁴. Amb valors actuals, i amb moltes reserves, podríem donar per aproximadament bona la recta següent:

$$C_S = C_{SA} A + C_{SF} = 300A + 1.000 \quad [\text{€}] \quad (6.15)$$

La distribució de les despeses per instal·lacions d'aigua calenta sanitària de mida mitjana o alta (fins a 100 m^2) es mostra a la taula 6.1 com a resultat del programa "Solarthermie 2000" en la que dins de l'aspecte "Control" s'hi inclouen sensors, bombes, vàlvules de regulació i altres elements electrònics. Dins d'aquest programa de seguiment, el cost específic de les instal·lacions va oscil·lar entre els 400 i els 900 € per m^2 .

² Pensem que cada tipus d'instal·lació pot tenir una corba de despeses específica i no seran iguals les d'un sistema d'ACS que les d'un sistema per l'escalfament de piscines, per exemple.

³ Per a equips compactes (els que inclouen captació fins a uns 4 m^2 i acumulació en un sol conjunt de dimensions reduïdes) el preu pot oscil·lar entre els 1.500 i els 1.800 € per unitat.

⁴ Per sistemes que utilitzin tubs de buit, aquest preu pot pujar fins als 1.000 o 2.000 € per m^2 d'àrea bruta instal·lada.

Concepte	Cost específic (€/ m ²)	Rang (€/ m ²)	%
Captadors	198	150 – 275	30,8
Estructura	71,5	10 – 225	11,1
Conductes i connexió en circuit de captadors	69	30 – 150	10,7
Conductes en circuits secundaris	93,5	40 – 325	14,6
Acumulació i bescanviador	74,5	50 – 175	11,6
Control	29	15 – 75	4,6
Altres	19	10 – 80	3,0
Disseny i posta en marxa	87,5	50 – 150	13,6
Total	642		

Taula 6.1 Despeses mitjanes en instal·lacions solars de fins a 100 m² (Programa “Solarthermie 2000”)

L'evolució de cost de les grans instal·lacions en funció del m² cau lleugerament amb l'augment de l'àrea de captació però es manté en les dades anteriors fins i tot per sistemes de 800 m² o més enllà (400 €/ m² pel sistema de major dimensió avaluat: 1.600 m² de captació).

Per avaluar la inversió, també cal tenir en compte els casos en els que la instal·lació està subjecta a desgravacions fiscals i/o subvencions de qualsevol tipus. Aquesta pot ser una part complicada no tant per la seva quantificació sinó pels criteris específics que inclouen els règims de subvencions per cada ciutat, comarca o comunitat i que permeten un tractament fiscal diferenciat per als usuaris que es decideixin per les energies renovables. En segons quins casos, la utilització d'instal·lacions solars ens permet una desgravació en impostos (renda, propietat, IAE) o, en el cas d'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 doncs forma part de la mateixa però en forma d'estalvi.

- *Flux de caixa.* El flux de caixa, o *benefici net*, es defineix en 6.11 com la diferència entre els beneficis bruts i les despeses existents en una instal·lació d'energia solar. En aquest sentit, cal veure què entenem per beneficis i què entenem per despeses en instal·lacions solars tèrmiques.
 - *Beneficis.* Una instal·lació d'energia solar no proporciona beneficis en sentit estricte com a flux monetari tangible. El benefici, en aquest cas, es transforma en *estalvi de combustible convencional E* que ha de permetre la recuperació de la inversió realitzada. Aquest *estalvi solar* es pot avaluar segons la fracció anual solar com

$$E = f_{\text{anual}} L_{\text{TOT}} \frac{\text{preu del combustible}}{\text{PCI} \cdot \eta_{\text{caldera}}} \quad (6.16)$$

El producte $f_{\text{anual}} L_{\text{TOT}}$ és la quantitat d'energia que ens proporciona el Sol anualment i que, per tant, representarà finalment el valor monetari del combustible estalviat. El preu dels diferents tipus de combustibles convencionals utilitzats es pot trobar a la pàgina web del Departament de Treball, Indústria, Comerç i Turisme de la Generalitat de Catalunya (<http://www.gencat.net/dict/energia/preus>) o un resum dels més utilitzats a la taula 6.2. Cal tenir en compte que en funció del tipus de consumidor, el preu dels combustibles pot variar substancialment.

<i>Tipus d'energia</i>	<i>Preu</i>	<i>Unitat</i>
<i>Gasoil de calefacció</i>	<i>0,40</i>	<i>€/litre</i>
<i>Electricitat⁵</i>	<i>0,06</i>	<i>€/kWh (terme energia)</i>
	<i>0,27</i>	<i>€/kW i mes (terme potència)</i>
<i>Gas Natural</i>	<i>2,31</i>	<i>€/client i mes (terme fix)</i>
	<i>0,04</i>	<i>€/kWh (terme variable)</i>

1 kWh = 3.600 kJ

Taula 6.2 Taula de preus de l'energia en l'àmbit domèstic a desembre de 2002

Cal dir que el preu dels combustibles sempre ha estat del tot irreal pel fet de no contemplar el cost social i econòmic dels problemes que el seu consum genera. Aspectes com els dels vessaments de cru de petroli, les fuites radioactives, la contaminació del medi, els problemes d'emmagatzematge dels residus nuclears, etc. són tan sols petits exemples de *despeses socialitzades* que haurien d'anar a càrrec de les empreses comercialitzadores dels combustibles i que ara per ara no es tenen en compte. Si aquestes empreses consideressin aquestes despeses externes per integrar-les al preu dels combustibles (procés conegut amb el nom d'*internalització de costos externs*) el preu dels mateixos podria haver d'augmentar d'un 150 a un 200%.⁶

- *Despeses.* Les despeses són essencialment d'*operació* i les podem dividir entre les que contemplen el cost de l'energia auxiliar utilitzada en l'operació de bombes o ventiladors i centrals de control (coneguda amb el nom d'*energia paràsita*) i les associades al manteniment anual de la instal·lació⁷.

La despesa associada a l'energia paràsita és difícil d'avaluar per què caldria un control exhaustiu del consum i dels períodes de funcionament dels elements consumidors. El creixement de la despesa en energia paràsita en funció de l'àrea de captació és clarament logarítmic i tendeix a un valor constant a mesura que creix la instal·lació. Aquest límit es xifra en uns 0,26 cèntims d'euro per kWh d'energia solar obtinguda (o 0,00072 €/MJ) però és un valor molt poc segur i inexacte al ser funció, a la vegada, del preu de l'electricitat i del propi funcionament i dels elements del sistema.

Les despeses associades al manteniment d'una instal·lació solar són potser una mica més fàcils de quantificar doncs parteixen de programes de manteniment que especifiquen clarament les operacions a realitzar en aquests sistemes (taula 4.1). Per instal·lacions petites és un factor menyspreable però a mida que la instal·lació creix, el cost de les operacions de manteniment cal ser tingut en compte (principalment, el que fa referència a substitució dels aïllaments i la seva protecció UV, dels filtres, dels

⁵ Molt variable. Consultar els preus de l'energia.

⁶ Podeu veure els resultats del projecte europeu de internalització de costos (ExternE Project) a <http://externe.jrc.es/>

⁷ En aquest conjunt de despeses ens en deixem d'altres que poden ser importants com les de la contractació d'una possible assegurança contra riscos externs, les que implicarien el pagament dels increments anuals d'un préstec en el cas que s'hagués demanat per la construcció de la instal·lació o fins i tot les referents a possibles augmentos en impostos de propietat, etc.

bescanviadors, de les bombes i de la qualitat del líquid en el primari). En sistemes de dimensió elevada, s'acostuma a prendre entre un 1 i un 2% de la inversió per any fet que implica un encariment d'uns 2 cèntims d'euro per kWh d'energia solar obtinguda (o 0,0055 €/MJ).

- *Taxa d'interès.* No existeix cap altre punt que generi més controvèrsia i discussió que la taxa d'interès i que apareix a l'equació 6.13 i el model econòmic que aquesta taxa implica. Des d'aquest punt de vista purament econòmic, la utilització d'una taxa d'interès vol dir quasi literalment “l'arbre que puguis tallar avui, no el tallis demà”. Per tant és clarament un model econòmic no sostenible que tan sols contempla la pèrdua de valor dels béns en el temps sense cap altra contemplació. A falta d'un sistema millor per contemplar la viabilitat dels projectes d'energia renovable que sigui a la vegada entès pels ens de decisió de la societat de consum actual, tan sols ens queda la opció de jugar el més net que es pugui⁸. Si bé normalment s'utilitza el valor interanual de la inflació (índex de preus al consum, ipc) la discussió es centra sobre si aquest valor pot ser representatiu de l'evolució del valor del diner en el temps o no, i molt especialment si és representatiu de l'evolució del preu dels combustibles en el temps (factor primordial a l'hora de determinar el flux de caixa). Independentment de les discussions que es poden generar, allò que sí que implica la utilització del concepte de VAN és que aquest valor de i es suposa constant al llarg del temps de vida de l'explotació o la inversió. I no existeix res menys cert.
- *Període de vida.* El concepte de valor actual net te en compte el temps de vida màxim de la instal·lació i que en el cas de sistemes solars tèrmics es suposa d'uns 20 anys. Aquesta suposició implica que tots els components tinguin aquesta vida, però val a dir que sistemes com el de control o d'acumulació, amb 15 anys, o el de conductes, amb 25 anys, donen períodes de vida considerablement diferents. Els elements que han de ser substituïts abans d'aquest límit temporal provocaran un flux de caixa diferent que invalidarà els càlculs econòmics

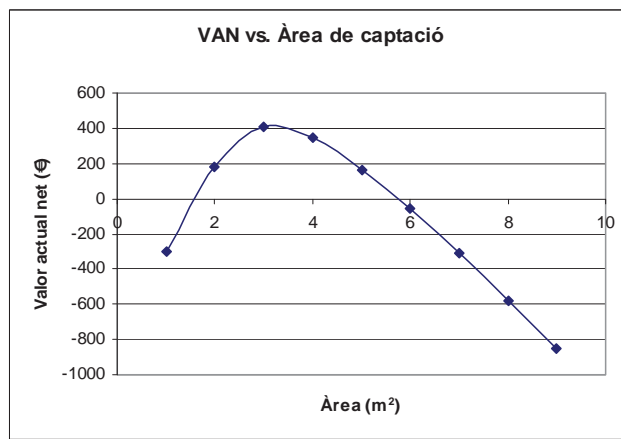
Exemple 6.3

Determineu l'àrea òptima de captació pel sistema solar a instal·lar a Lleida mitjançant el criteri del valor actual net més elevat si tan sols el volem dimensionar per les necessitats d'aigua calenta sanitària, el temps de vida considerat és de 20 anys, la inflació anual es considera constant i del 2%, el combustible utilitzat és gasoil de calefacció amb PCI de 8.550 kcal / litre i el rendiment de la caldera es considera de 0,5.

Si repetim els càlculs de corbes f realitzats al tema anterior, però ara tan sols per les necessitats tèrmiques d'aigua calenta sanitària L_{ACS} , obtindrem els valors de fracció solar anual que mostra la primera columna de la taula inferior per cada una de les àrees estudiades. Amb un preu de la instal·lació solar que segueixi la recta 6.15, un cost de manteniment del 0,5% anual sobre la inversió i un preu del combustible de 0,40 €/ litre, el major valor actual net s'obté per una àrea de 3 m², amb una fracció solar anual de 0,70 i un estalvi total de 411 €. Els resultat vénen reflectits a la taula i gràfica següents:

⁸ Els conceptes de la *sostenibilitat* aplicats a l'economia i als anàlisis de viabilitat en projectes, porten cada cop més a models econòmics capaços de quantificar en major i millor mesura els aspectes mediambientals i ecològics (*sostenibilitat dura*). Tot i així, no queda gens clar com es pot quantificar o portar a valor monetari la pèrdua de la diversitat biològica o dels hàbitats, per exemple.

Àrea (m ²) Full "Corbesf"	f anual	L _{TOT} (MJ / any)	Inversió (6.15)	Estalvi anual comb. (6.16)	Despeses (€/any)	Flux de caixa (6.11)	VAN (6.13)
1	0,317	9.555	1.300	68	7	61	-300
2	0,548	9.555	1.600	117	8	109	181
3	0,706	9.555	1.900	151	10	141	411
4	0,780	9.555	2.200	167	11	156	343
5	0,820	9.555	2.500	175	13	163	160
6	0,850	9.555	2.800	182	14	168	-60
7	0,871	9.555	3.100	186	16	171	-311
8	0,888	9.555	3.400	190	17	173	-578
9	0,901	9.555	3.700	192	19	174	-855



6.2.2 La taxa interna de retorn (TIR)

Lligat al concepte de valor actual net, existeix el concepte de taxa interna de retorn *TIR*. La taxa interna de retorn és el valor de la taxa d'interès *i* que fa nul el valor actual net. Aquesta taxa interna es pot considerar com la taxa d'interès que el projecte pot proporcionar *i*, per tant, si és superior a la taxa d'interès amb la qual els inversors poden obtenir algun tipus de finançament, la inversió serà, en general, desitjable. Entre diferents alternatives d'inversió, serà millor la que presenti un *TIR* major. Considerant l'equació 6.13, el valor del *TIR* vindrà donat per la següent modificació de la citada equació:

$$0 = -I + \sum_{k=1}^n \frac{FC_k}{(1 + TIR)^k} \quad (6.17)$$

6.2.3 El temps de retorn de la inversió (TRI)

Els factors econòmics utilitzats a l'apartat anterior es poden utilitzar per calcular el temps de retorn de la inversió (*TRI*) de la nostra instal·lació. En aquest cas, el *TRI* es defineix 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. En aquest sentit un projecte serà tant més rentable com més curt sigui el seu període de retorn⁹.

⁹ El *TRI* no és un valor excessivament fiable i mai s'ha d'utilitzar en solitari per donar idea de la viabilitat d'un projecte. En tot cas com a indicació secundària del risc d'una determinada inversió.

Aquest temps de recuperació de la inversió es pot obtenir a partir de l'equació 6.13 imposant un valor actual net nul (recuperació de la inversió). Això ens porta a una expressió com

$$VAN = 0 \rightarrow I = FC \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (6.18)$$

de la que ens podem aïllant el valor de n . Resolent per n (els anys de recuperació) i utilitzant i en tant per u, tindrem:

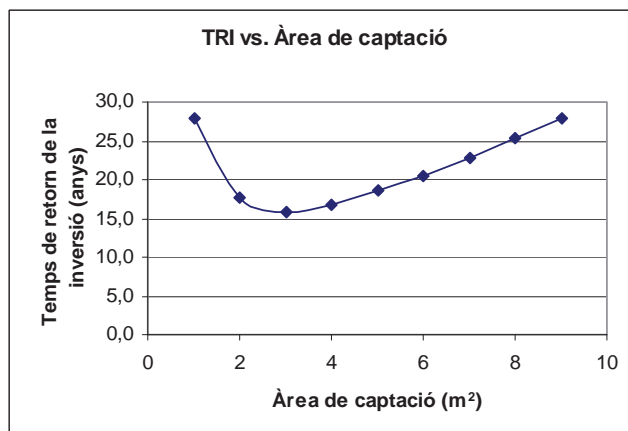
$$n = \frac{\ln\left(\frac{FC}{FC - iI}\right)}{\ln(1+i)} \quad (6.19)$$

Exemple 6.4

Per les mateixes condicions de l'exemple 6.3, determina el temps de retorn de la inversió òptim mitjançant el criteri del temps de retorn de la inversió.

Amb les mateixes condicions que l'apartat anterior, el temps de retorn òptim (menor) és de 9 anys i coincideix amb el de major valor actual net per la mateixa àrea de 4 m^2 (però podria no haver estat així). Els resultat vénen reflectits a la taula i gràfica següents:

Àrea (m^2) Full "Corbesf"	f_{anual}	L_{TOT} (MJ / any)	Inversió (6.15)	Estalvi anual comb. (6.16)	Despeses (€/any)	VAN (6.13)	TIR (6.19)
1	0,317	9.555	1.300	68	7	-300	27,9
2	0,548	9.555	1.600	117	8	181	17,6
3	0,706	9.555	1.900	151	10	411	15,8
4	0,780	9.555	2.200	167	11	343	16,8
5	0,820	9.555	2.500	175	13	160	18,5
6	0,850	9.555	2.800	182	14	-60	20,5
7	0,871	9.555	3.100	186	16	-311	22,8
8	0,888	9.555	3.400	190	17	-578	25,3
9	0,901	9.555	3.700	192	19	-855	28,0



De l'estudi dels resultats dels dos últims exemples, veiem com l'àrea que optimitza l'estudi econòmic és la de 3 metres quadrats, valor que correspon a una fracció anual del 0,70 (és a dir, el Sol ens proporcionaria un 70% 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 2 captadors seria el valor apropiat per obtenir 4 metres quadrats (a més, cal que correspongui a un nombre parell de captadors, perquè així se'n facilita la disposició i l'equilibri hidràulic del circuit).

Si l'estudi es repeteix augmentant les necessitats tèrmiques d'aigua calenta sanitària amb les de calefacció, observariem un fet característic dels sistemes amb necessitats tèrmiques irregulars al llarg de l'any: la baixada dràstica de la fracció solar anual tot i l'augment de l'àrea de captació i un temps de recuperació de la inversió que ja no coincideix amb l'òptim del valor actual net. Aquest fet mostra a la vegada, per una banda, la fiabilitat relativa del criteri del temps de recuperació de la inversió que, recordem, no es pot utilitzar com a criteri únic a l'hora de valorar una inversió, i per una altra, les limitacions del mètode econòmic aplicat a les corbes f quan les necessitats tèrmiques a cobrir no estan equilibrades al llarg d'un any o quan són ordres de magnitud diferents. Tan sols observant els valors de X i Y obtinguts per les àrees escollides i les necessitats tèrmiques, notem com ja estem molt lluny dels límits imposats pel mètode de càlcul i la necessitat d'anar cap a simulacions més acurades.

Un últim punt important que cal tenir en compte és el de la connexió dels captadors (que veiem en el tema anterior). 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, per exemple, 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.

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.

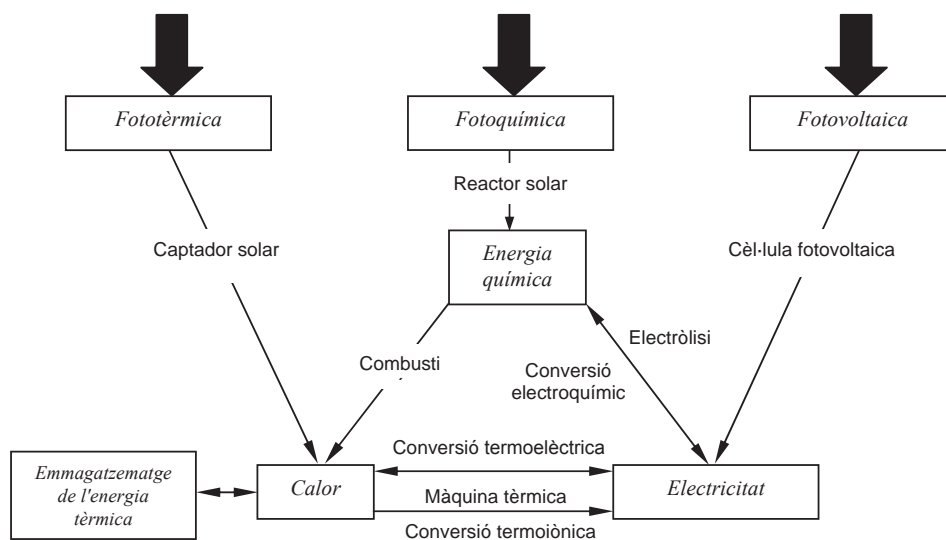


Fig. 7.1 Processos de conversió de l'energia solar.

Al 1988 es disposava de 500 MW_e 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 m²/kW_e en relació als 1-2 m²/kW_e). 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.

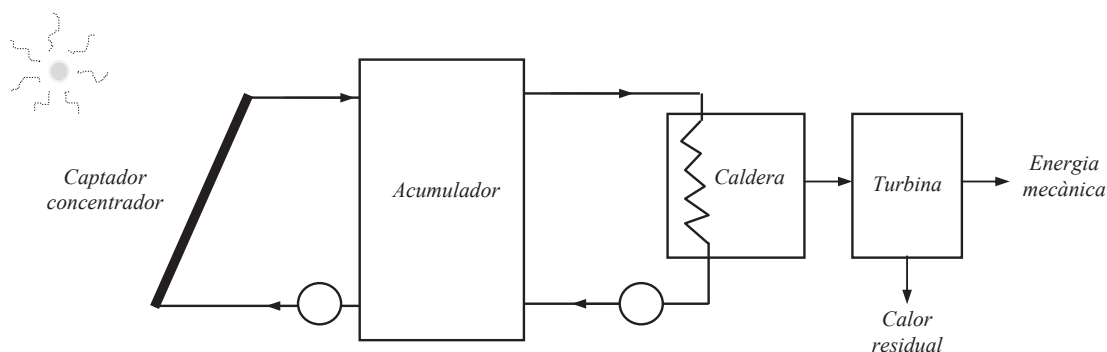


Fig. 7.2 Esquema de la conversió d'energia tèrmica en mecànica.

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.

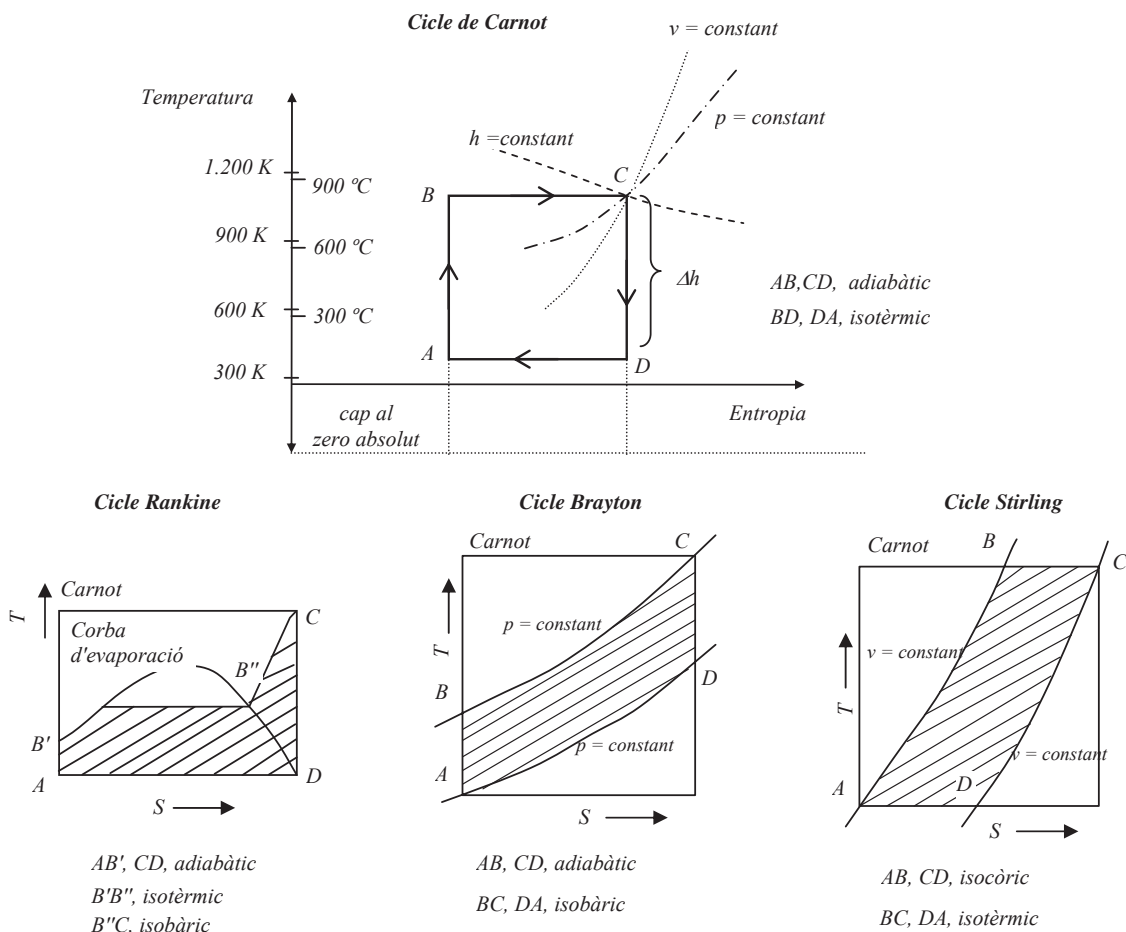


Fig. 7.3 Diagrames dels cicles termodinàmics ideals de significat pràctic per a centrals tèrmiques solars. El cicle de Carnot és un cicle hipotètic reversible sense pèrdues, que segueix quatre processos consecutius: compressió isentròpica, addició de calor isoterma, expansió isentròpica i cessió de calor 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.

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{Focus fred}}}{T_{\text{Focus calent}}} \quad (7.1)$$

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**:

$$C = \frac{A_{\text{obertura}}}{A_{\text{absorbidor}}} \quad (7.2)$$

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 **camp d'heliòstats**, en els quals ja es necessita fer un seguiment en els dos eixos.

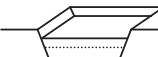
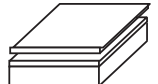

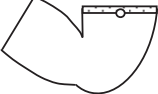
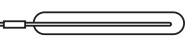
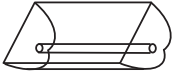






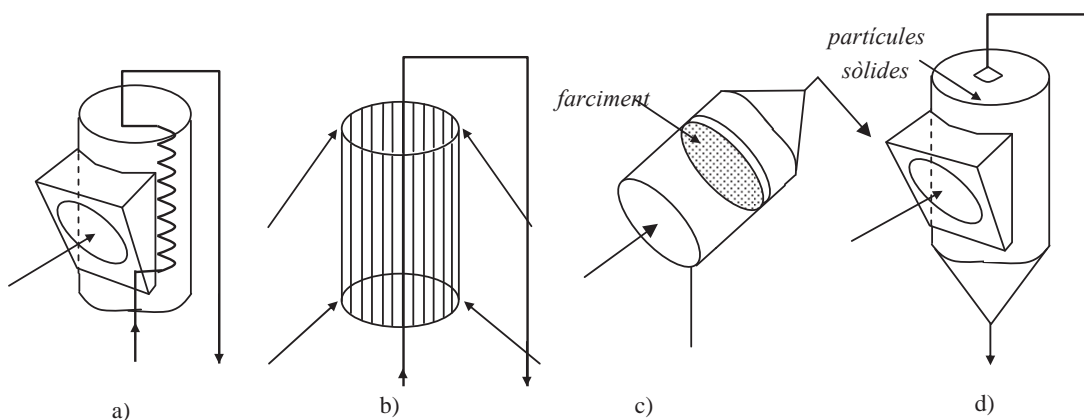
		Tipus de captador		Raó de concentració "C"	Rang de temperatures i potència K i MW	Aplicacions	
		Nom	Esquema				
Estacionaris		Llac solar no convectiu		Captadors plans	$C \leq 1$	300 < T < 360 P < 5 MW _t	Generació d'energia Calor de procés
		Captador pla					
		Xemeneia solar					
		Reflector d'absorció invertit parabòlic compost					
Seguidors	Un eix	Tub de buit		Absorbidors tubulars	$C \leq 1$	320 < T < 460 P < 1 MW _t	d'electricitat Calor de procés
		Reflector parabòlic compost (CPC)					
	Reflector cilindro-parabòlic (TPC)		$5 \leq C < 15$	340 < T < 560			
	Dos eixos	Refractor Fresnel		Absorbidors puntuals	$15 \leq C < 40$	340 < T < 560	
		Refractor cilíndric			$10 \leq C < 40$	340 < T < 540	
		Reflector de plat parabòlic			$10 \leq C < 50$	340 < T < 540 P < 100 MWe	
	Dos eixos	Reflector esfèric		Absorbidors puntuals	$100 \leq C < 1.000$	340 < T < 1.500 P < 150 kWt/unitat	
Camp d'heliòstats			$100 \leq C < 300$		340 < T < 1.500 P < 150 kWt/unitat	Tractam. de materials Descontaminació fotolítica	
			$100 \leq C < 1.500$		400 < T < 3.000 P < 200 MWe		Lasers solars

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.



Tipus de receptor	Definició	Fluid portador de calor	Fluxe energètic obtingut (kW/m ²)	Fluxe energètic màxim (esperat) (kW/m ²)
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'*estrès* 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.

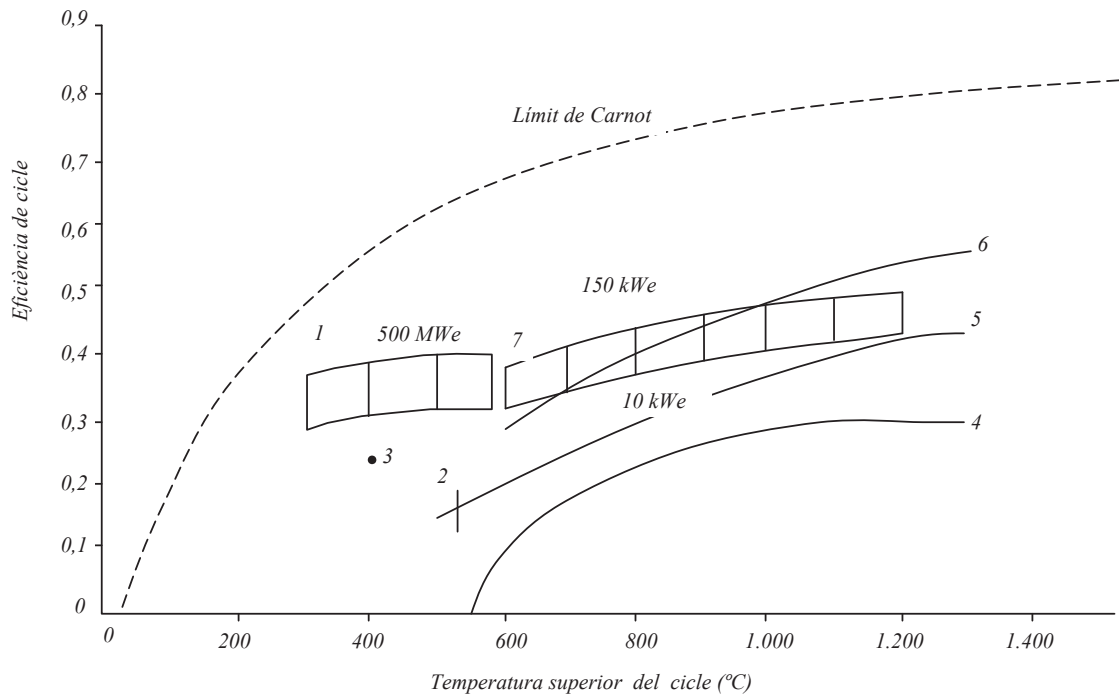


Fig. 7.6 Rendiments de cicles termodinàmics reals ($T_F = 300 \text{ K}$): 1) cicle de Rankine amb vapor d'aigua en la gamma dels 300 MW_e , 2) el mateix de gamma petita, fins a 3 MW_e ; 3) cicle de Rankine amb refrigerants en la gamma dels 100 kW_e ; 4) cicle de Brayton obert sense recuperació de calor; 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 $0,4 \text{ MW}_e$.

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_t) 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_t) no se sobrepassen valors de 0,3.

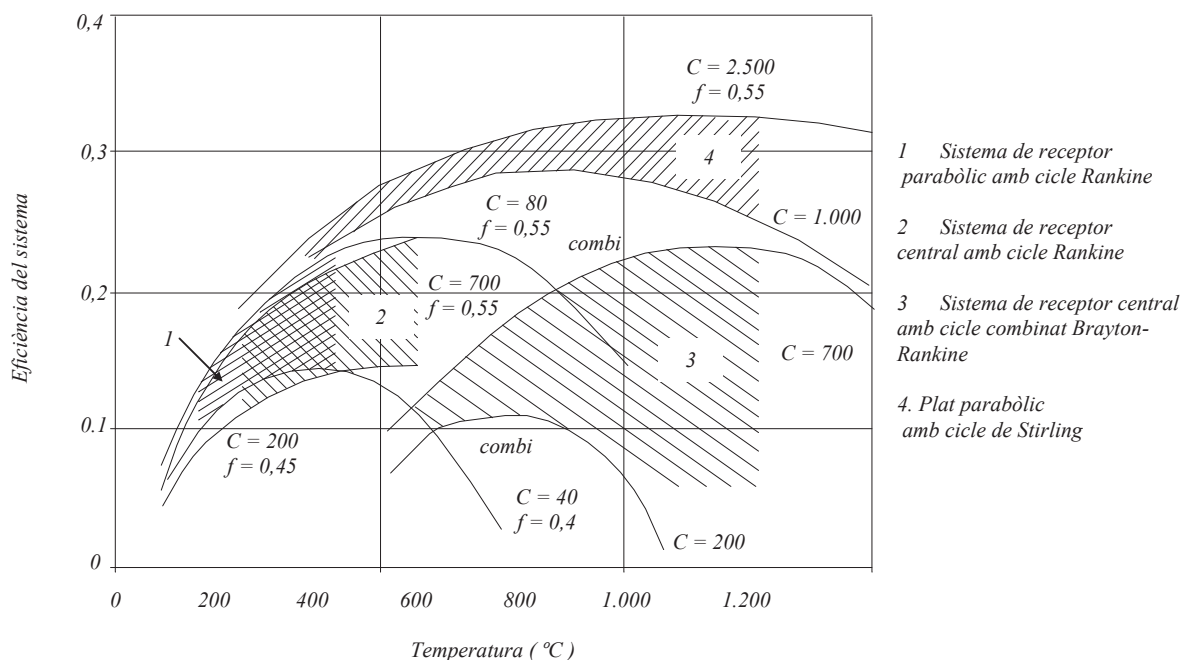


Fig. 7.7 Regions de conversió eficient en funció de la temperatura, per a diferents tipus de centrals solars tèrmiques. Els límits vénen donats per l'eficàcia en la conversió de la radiació en calor, per la concentració assequible o a causa de la temperatura: 1) limitada per la temperatura dels olis 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_t o 140 kW_e, 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_e 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).

Tipus de planta	Desenvolupada des de		Sistemes instal·lats	Operacionals	En projecte (1993)
Cilindro- parabòlic	1973	Número	15	8	1
		MWe	285	275	80
		m ²	1.799.000	1.789.000	464.000
Receptor central	1973	Número	6	-	1
		MWe	30	-	5
		m ²	117.000	-	40.000
Disc parabòlic (farm)	1977	Número	4	3	1
		MWe	5,38	5,288	4,88
		m ²	35.672	34.547	-
Disc parabòlic (motor Stirling)	1977	Número	15	3	1
		MWe	6,9	0,125	50
		m ²	50.200	540	-

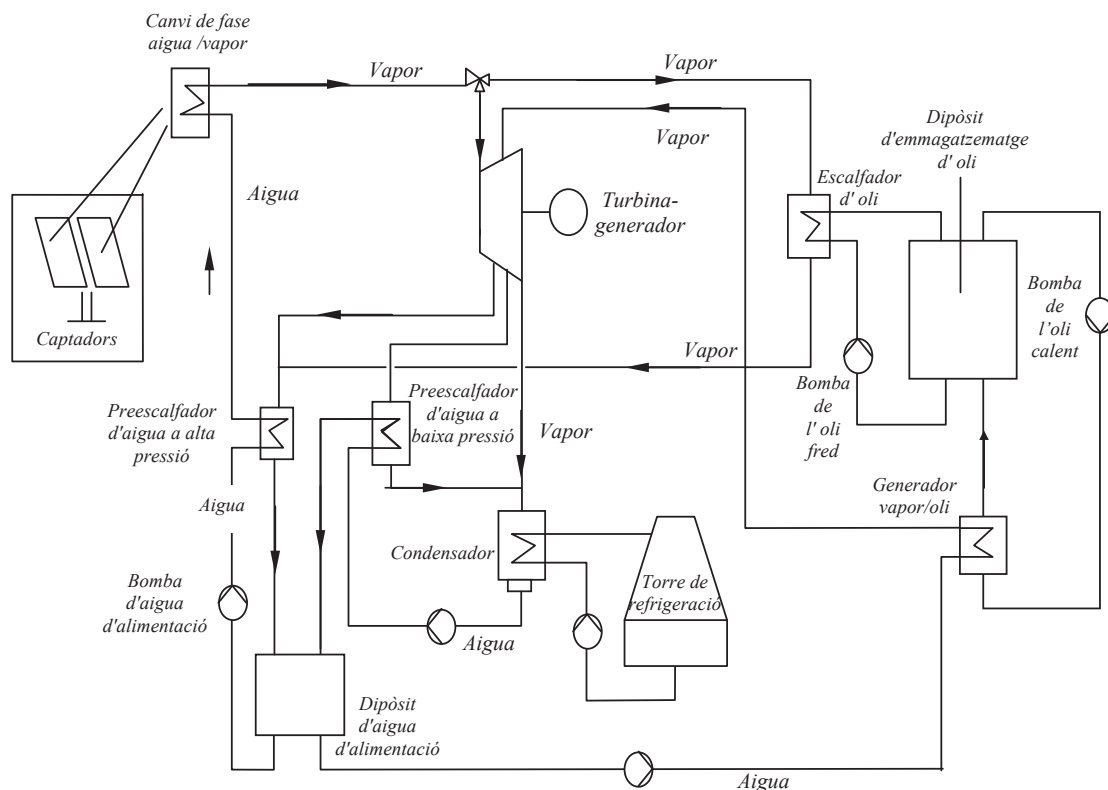


Fig. 7.8 Esquema del principi de funcionament de la CST pilot Solar One, a Barstow, Califòrnia

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 ± 30 i 40° .
- Es poden assolir potències d'entre 100 kW_t (paraboloides) i alguns centenars de MW_e (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_e i el preu de producció entre 0,08 i 0,11 dòlars/kWh_e, 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_e fins a 1.000 MW_e 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_e, i el cost de producció, entre els 0,3 i 0,5 dòlars/kWh_e.
- 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.

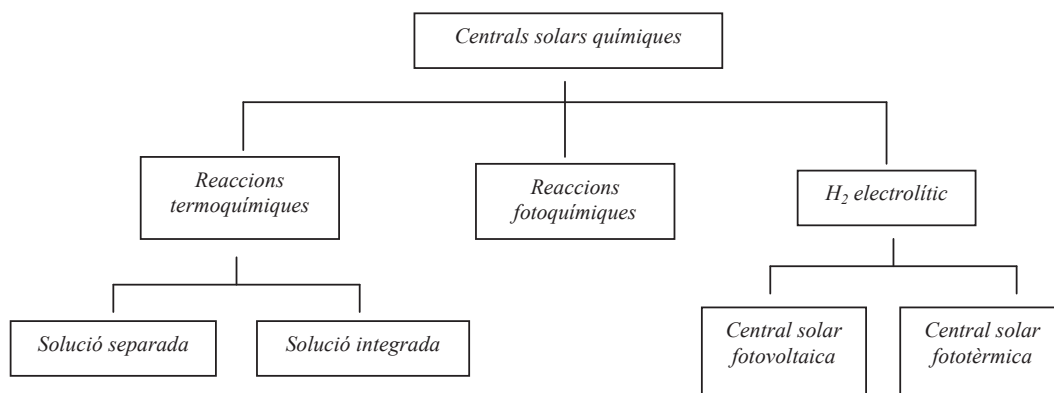


Fig. 7.9 Processos de conversió de l'energia solar.

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.

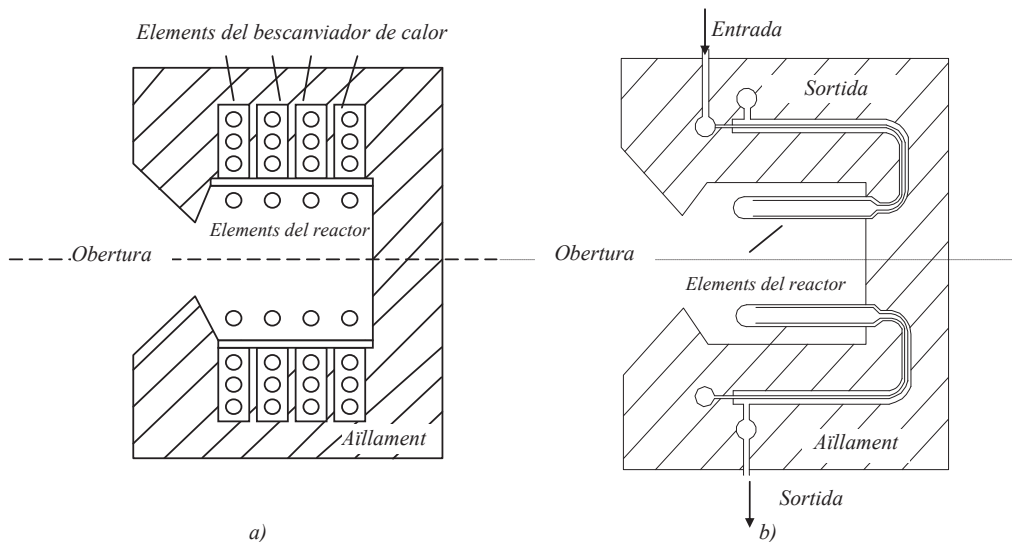
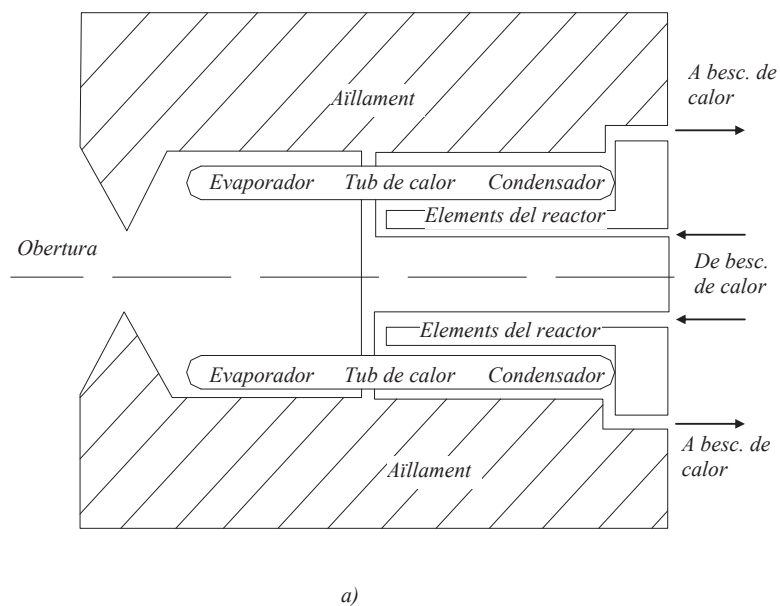


Fig. 7.10 Diagrama esquemàtic dels reactors-receptors tubulars: en disposició espiral (a) i axial (b).

- **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.



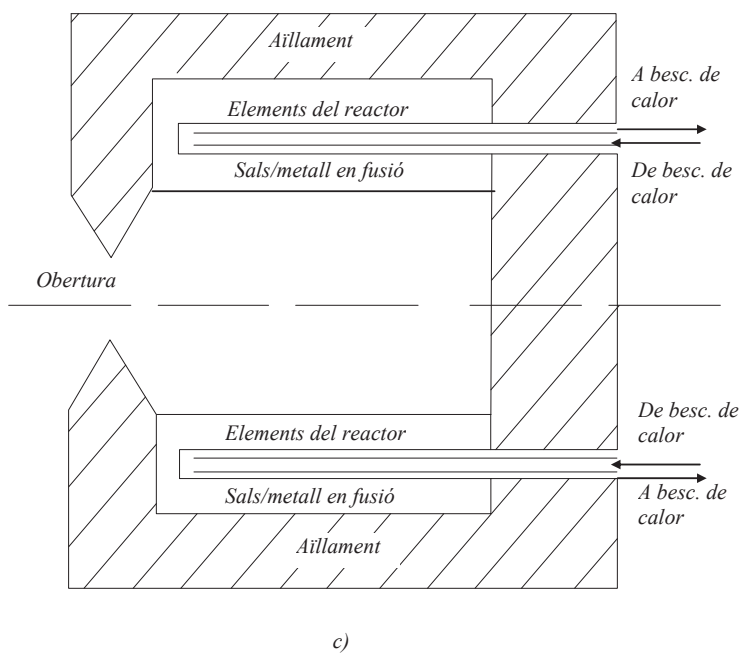
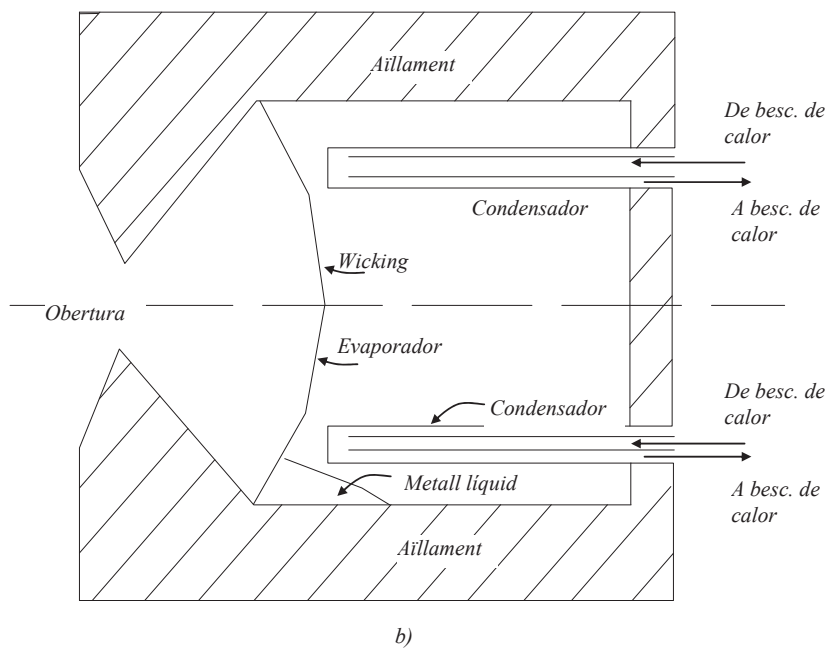


Fig. 7.11 Diagrama esquemàtic dels reactors-receptors indirectes: de tub de calor (a), de reflux (b) i de material fos (c); (besc. vol dir bescanviador).

- **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.

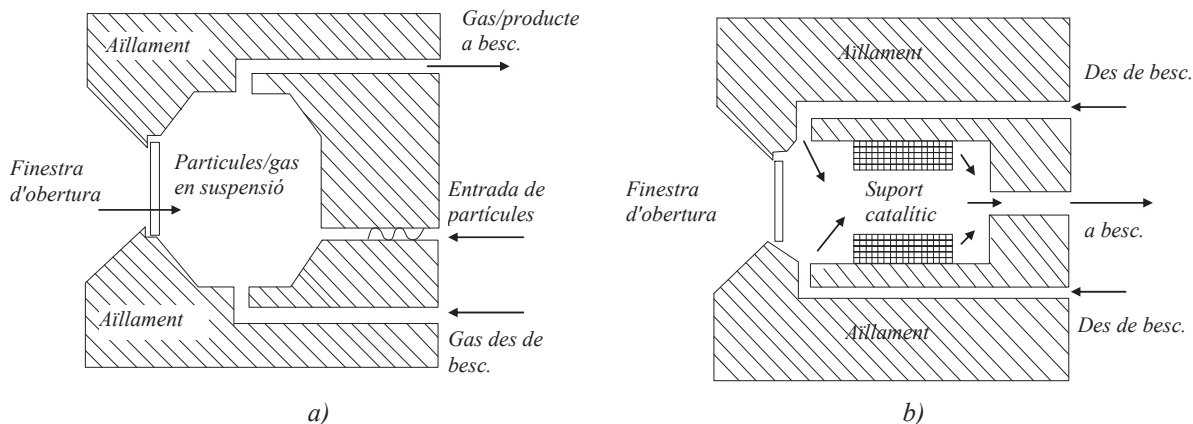


Fig. 7.12 Diagrama esquemàtic dels reactors-receptors d'absorció directa: a) de partícules i b) matricial.

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-H₂-aigua).

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]

