

CAPÍTOL 7

Energia solar

En aquest llibre mencionem més d'una vegada que en realitat la quasi totalitat de les fonts d'energia que fem servir a La Terra provenen originàriament de l'energia que El Sol ha anat transmetent al nostre planeta al llarg de milions d'anys, i que és la que ha permès que la major part de processos atmosfèrics i naturals tinguin lloc en la manera que els coneixem avui dia. Així doncs, és lògic que davant de la situació actual, marcada per l'exhauriment progressiu dels combustibles fòsils en què es basa majoritàriament la nostra societat, posem les perspectives en El Sol com a font alternativa d'energia.

L'ús directe de la radiació solar com a mètode per a reduir el consum d'energies convencionals és possible en dues formes diferents. Per una banda, es troben tots aquells aspectes energètics relacionats amb el disseny i l'arquitectura; per exemple, la forma en com es decideix orientar un edifici és fonamental per tal de reduir-ne la despesa energètica en climatització. Per altra banda, podem aprofitar l'energia solar tot usant dispositius com per exemple les plaques solars, recullen, concentren i emmagatzemen l'energia del Sol. Al primer tipus d'elements relacionats amb el disseny se'ls agrupa sota el nom d'elements solars passius, mentre que els segons són anomenats actius. Aquest capítol està dedicat a entendre els fonaments físics de funcionament dels sistemes actius i a determinar el seu interès potencial com a solució energètica de futur.

7.1 Radiació solar incident

El flux de radiació solar màxim que pot arribar del Sol a La Terra és de 1500 W/m^2 . D'acord amb aquest valor, simplement fent servir una placa solar de només 4 m^2 de superfície (un quadrat de 2×2 metres de costat) obtindríem una potència de

$$4 \cdot 1500 = 6.000 \text{ W} = 6 \text{ kW} \quad (7.1)$$

suficient com per a mantenir el consum d'un habitatge mitjà sense problemes. Hem de ser conscients, però, que aquesta no és tota la realitat. Per una banda això implicaria que els rendiments de les plaques solars fossin del 100%, i a més hem de tenir en compte que 1500 W/m^2 és un valor que només s'assoleix quan tenim una placa completament perpendicular als rajos del sol fora de la influència de l'atmosfera. Això són condicions molts puntuals, pràcticament impossibles d'aconseguir a excepció de certs punts de l'Equador. Hem de pensar que de nit no rebem radiació solar, i a més les zones llunyanes a l'equador terrestre sempre reben valors de radiacions inferiors que les zones properes a aquest.

Per tal d'entendre amb una mica més de profunditat l'energia solar i el seu aprofitament, hem d'anar introduint un a un els diferents aspectes que tenen influència sobre la radiació que ens arriba del sol.

La geometria

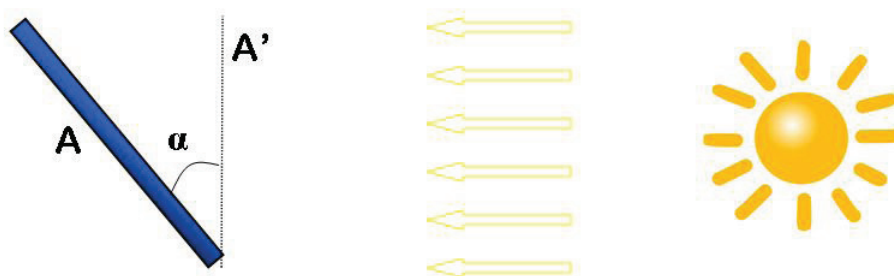


Figura 7.1: Esquema per entendre la influència de la inclinació de la placa solar en la potència aprofitada.

Els aspectes geomètrics afecten la radiació solar incident com es pot observar l'esquema de la Figura 8.1. Si una superfície no està perfectament encarada a la direcció d'on arriba la radiació solar, tot i que la placa tingui una àrea A en realitat estarem aprofitant la radiació que cau en una àrea

més petita A' , que equivaldrà a la mida de la seva ombra si la projectéssim sobre la paret. Si designem α l'angle de separació entre la direcció perpendicular a la radiació i la direcció real de la placa obtindrem que l'àrea A' , coneguda com a *àrea efectiva*, val

$$A' = A \cos \alpha. \quad (7.2)$$

La latitud

Aquest efecte, tot i que està íntimament relacionat amb el de l'apartat anterior, convé estudiar-lo per separat ja que és important considerar-lo en el moment de la instal·lació. Estudiem les conseqüències del fet en com la radiació solar incideix a La Terra. Considerem sis plaques solars (A, B, C, D, E, F) situades en diferents punts del planeta (Figura 8.2). Suposem que totes elles tenen una àrea d'1 m². Suposarem que les plaques estan estirades horitzontalment a sobre del terra en cada un del sis punts, de forma que les orientacions de les plaques serien les que es veuen al dibuix. A la placa F òbviament no hi incideix radiació en aquest moment, ja que correspon a una zona on ara mateix és de nit. A la resta de plaques la radiació incident es calcula multiplicant els 1500 W/m² per l'àrea efectiva de la placa, és a dir,

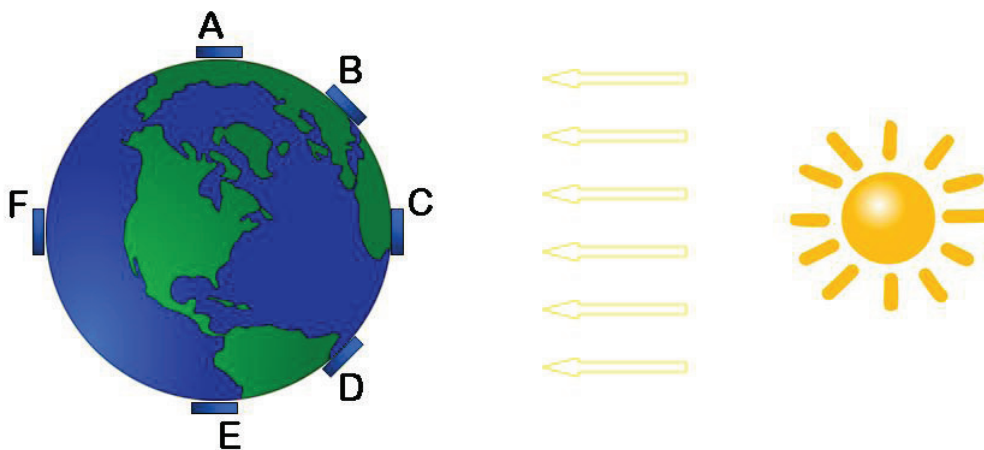


Figura 7.2: Influència de la latitud sobre la radiació rebuda en un instant concret del dia.

$$\text{Placa A : } \rightarrow A \cos 90 \cdot 1500 = 0 \text{ W}$$

$$\text{Placa B : } \rightarrow A \cos 45 \cdot 1500 = 1060 \text{ W}$$

$$\text{PlacaC} : \rightarrow A \cos 0 \cdot 1500 = 1500 \text{ W} \quad (7.3)$$

$$\text{PlacaD} : \rightarrow A \cos (-45) \cdot 1500 = 1060 \text{ W}$$

$$\text{PlacaE} : \rightarrow A \cos (-90) \cdot 1500 = 0 \text{ W}$$

En aquest cas, l'angle correspon amb la latitud del punt. Es pot veure clarament com en aquest cas concret la radiació incident és màxima a l'Equador i nul·la en els Pols. Evidentment aquest problema es pot corregir inclinant la placa solar respecte al terra per tal d'aconseguir encarar-la a la radiació. Per exemple, inclinant 45° la placa B aconseguiríem la mateixa radiació incident que la de la placa C. Per aquest motiu les plaques solars sempre s'instal·len inclinades un cert angle respecte al terra, i l'angle d'inclinació és diferent depenent de la zona del planeta a la qual ens trobem.

És important remarcar també que el càlcul dels apartats anteriors representa només el que succeeix en un instant particular del dia. A continuació expliquem com calcular valors de radiació promitjats al llarg d'un dia sencer o d'un any, que és el que realment pot ser important a efectes pràctics.

Variació dia-nit

Considerem el cas de les plaques solars B o C de la Figura 8.2. Tot i que en el dibuix aquestes plaques estan en la zona del planeta encarada a la radiació solar, a mida que La Terra giri sobre si mateixa aquesta situació canviarà mica en mica, i quan passin unes hores aquestes plaques quedaran a l'esquerra del dibuix (es farà de nit en aquelles zones) i la radiació s'anirà anul·lant.

Si representem en un gràfic el valor de la radiació solar incident en un punt al llarg d'un dia, obtenim la forma de la Figura 8.3. Allà s'observen clarament els moments de la sortida i la posta del Sol, i es veu com la radiació incident màxima s'assoleix just en el punt intermig entre aquests dos moments. La corba que fa la figura correspon a una funció sinusoidal, d'acord amb el concepte d'àrea efectiva que hem introduït adalt. L'àrea ratllada representa el flux total d'energia que obtindríem si durant les 24 hores del dia tinguessim radiació màxima, mentre que l'àrea que queda sota la corba és el flux d'energia real. Es pot comprovar que l'àrea sota la corba és exactament una quarta part de l'àrea ratllada. Per tant, aquest és el factor que hem d'aplicar per poder tenir en compte les variacions dia-nit en la radiació solar. Per tant, les radiacions incident en les plaques B i C d'adalt, promitjades al llarg d'un dia sencer, serien una quarta part dels valors màxims:

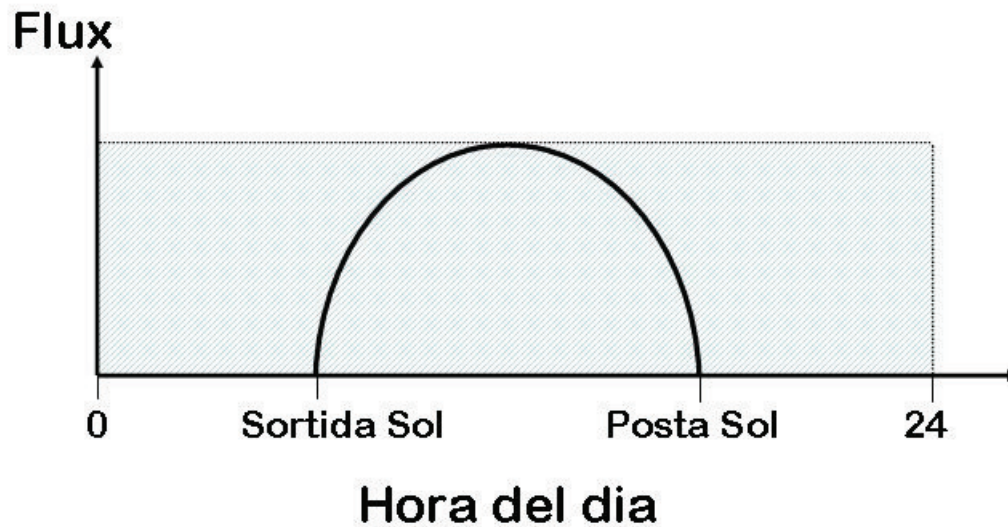


Figura 7.3: La línia corba mostra el nivell de flux de radiació rebut del Sol al llarg del dia (que té forma de funció cosinus) mentre que la línia horitzontal de punts mostra el valor màxim (al migdia) que s'obté en aquell punt

$$\text{Placa B : } \rightarrow \frac{1}{4} A \cos 45 \cdot 1500 = 265 \text{ W}$$

$$\text{Placa C : } \rightarrow \frac{1}{4} A \cos 0 \cdot 1500 = 375 \text{ W}$$

El fet que la radiació es redueixi a una quarta part per aquest efecte ens demostra com d'interessant és l'ús de plaques solars amb sistemes motoritzats de seguiment, que giren automàticament per tal d'estar sempre encarades al Sol. Amb aquest sistema rebríem a la placa sempre la radiació solar màxima, excepte per la nit, que lògicament seguiria sent zero. D'aquesta manera el rendiment de les plaques augmentaria notablement. Tot i així, a dia d'avui els preus d'aquests sistemes de motorització són encara força elevats i per aquest motiu només s'utilitzen en casos particulars on augmentar el rendiment de la instal·lació resulta essencial.

Variació estiu-hivern

Per poder entendre com la radiació solar incident canvia al llarg de l'any hem de tenir present que la inclinació de La Terra respecte al Sol canvia degut al procés de translació de La Terra, fet que dona lloc a les estacions

de l'any. En la Figura 8.4 mostrem aquesta idea. En el dibuix de l'esquerra l'Hemisferi Nord està més encarat cap al Sol que l'Hemisferi Sud, i per aquest motiu en aquella situació rep més radiació solar (a l'Hemisferi Nord seria estiu, en aquest cas). El dibuix de la dreta, en canvi, representa la situació contrària (hivern a l'Hemisferi Nord). Com que l'angle d'inclinació de La Terra respecte el sol és actualment d'uns 23.5° , tindrem que si possessim una placa a l'Equador terrestre com la que es veu en el dibuix, en cada un dels dos punts marcats al dibuix la radiació màxima serà

$$\begin{aligned}\text{Estiu : } &\rightarrow A \cos(-23,5) \cdot 1500 = 1376 \text{ W} \\ \text{Hivern : } &\rightarrow A \cos(23,5) \cdot 1500 = 1376 \text{ W}\end{aligned}$$

Si repetim el càlcul per a una placa situada a una latitud de 45° (que seria el cas de la placa B que hem comentat abans) tindriem

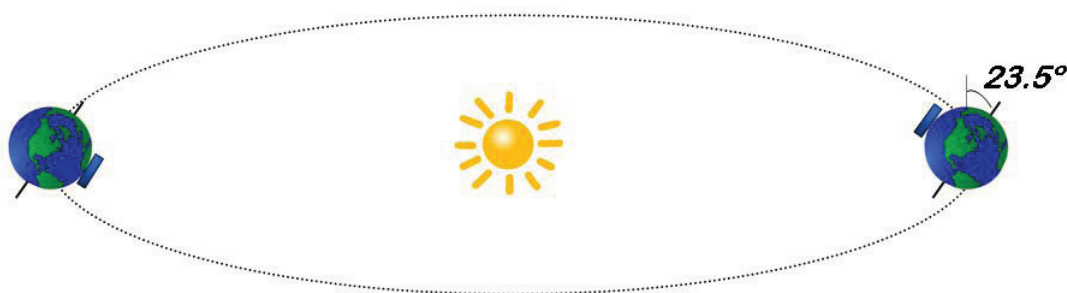


Figura 7.4: Influència de l'estacionalitat en el flux de radiació solar rebut per La Terra

$$\begin{aligned}\text{Estiu : } &\rightarrow A \cos(45 - 23,5) \cdot 1500 = 1396 \text{ W} \\ \text{Hivern : } &\rightarrow A \cos(45 + 23,5) \cdot 1500 = 549 \text{ W}\end{aligned}$$

En aquest segon cas, s'observa com la diferència entre estiu i hivern és realment important, i aquesta diferència anirà augmentant a mida que ens apropem als Pols terrestres. En resum, això ens permet mostrar com d'important és orientar bé una placa solar depenent de la posició del planeta on ens trobem, o de si preferim aprofitar al màxim l'energia durant l'estiu o l'hivern. Novament, l'ús de sistemes de seguiment motoritzats pot ser una bona opció en aquest sentit, tot i que a dia d'avui els seu ús és encara força reduït.

Efectes de l'atmosfera

Durant els càlculs anteriors en cap moment hem tingut en compte el paper que juguen els efectes meteorològics sobre la radiació solar incident a la superfície terrestre. Lògicament la nubositat té un efecte important en aquest sentit, i tot i que aquest és un efecte difícil de quantificar (ja que depen de la meteorologia local de cada zona del planeta) en general els efectes d'absorció i de reflexió en els núvols poden provocar que en realitat només arribi en promig al llarg de l'any entre el 30% i el 50% de la radiació que teòricament arribaria amb un cel sense núvols.

Per una altra banda, fins el moment hem parlat de la radiació solar en general. Però en realitat aquesta radiació conté molts tipus d'ones diferents (infrarojos, ultraviolat, microones, radiació visible...) algunes de les quals són més importants que altres. Aquest és un aspecte important a considerar, ja que generalment no és possible aprofitar l'energia de tots els tipus d'ones simultàniament, com explicarem més en detall en els propers apartats. La línia groga de la Figura 8.5 mostra l'espectre de radiació del Sol que arriba a les capes altes de la nostra atmosfera. Aquest espectre mostra la quantitat de radiació que arriba del Sol per a cada longitud d'ona que, com hem explicat a l'Apartat ??, determina el tipus de radiació i l'energia que aquesta conté. Comparant amb la Figura ??, es pot veure com el "pic" de l'espectre (zona de màxima radiació) correspon a la zona de l'ultraviolat i de la llum visible. Per tal de completar la informació, línia vermella mostra també l'espectre de la radiació solar que arriba a la superfície terrestre. Es pot veure que els valors de la radiació són més petits, ja que en travessar l'atmosfera una part de la radiació és absorbida. A més, es pot veure com hi ha freqüències particulars per les quals la radiació ha estat absorbida de manera molt important. Aquestes corresponen a les freqüències típiques que són capaces d'absorbir el vapor d'aigua, l'ozó... i altres gasos que poden trobar-se en quantitats apreciables a l'atmosfera.

7.2 Potencial energètic de l'energia solar

Aprofitant tots els raonaments de l'apartat anterior podríem ara fer una estimació del poder que té l'energia solar com a solució energètica per a la nostra societat. Si tenim en compte el valor de partida de 1500 W/m^2 i considerem que degut a la variació dia-nit aprofitem només el 25%, i degut als efectes meteorològics perdem un altra 50% (no tindrem en compte aquí pèrdues degudes a la inclinació de la placa o a la variació estiu-hivern perquè imaginarem que poguéssim evitar-les dissenyant adequadament la

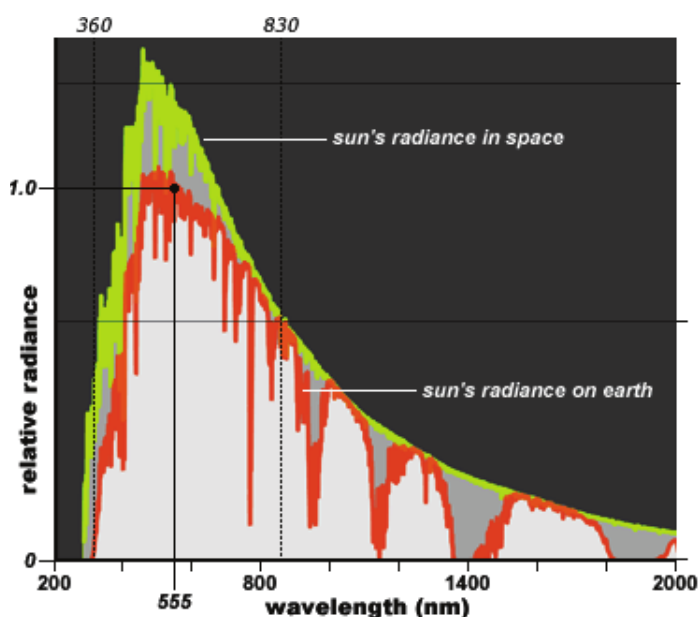


Figura 7.5: Irradiància (densitat de flux de radiació solar) que arriba a les capes altes de l'atmosfera (línia groga) i a la superfície terrestre (línia de vermella).

placa) aleshores ens queda un flux aprofitable de

$$1500 \cdot 0,25 \cdot 0,5 = 187 \text{W/m}^2. \quad (7.4)$$

La pregunta ara seria: quants metres quadrats de superfície hauríem d'aprofitar per tal de satisfer les necessitats energètiques mundials, que en termes de potència són d'uns 13 TW ($13 \cdot 10^{12}$ W)? Com que el càlcul anterior ens dóna la potència aprofitada per cada metre quadrat només hem de calcular

$$A = \frac{13 \cdot 10^{12}}{187} = 7 \cdot 10^{10} \text{m}^2 \quad (7.5)$$

Per fer-nos una idea de com de gran és aquesta superfície agafem com a referència la superfície de Catalunya (30.000 Km^2 o $3 \cdot 10^{10} \text{ m}^2$). Això vol dir que les necessitats energètiques actuals de tot el món equivalen a omplir de plaques solars un territori dues vegades major que Catalunya, tot i que això és suposant que les plaques tinguessin un rendiment del 100%. Considerant els rendiments de les plaques actuals (20%) l'àrea necessària seria cinc vegades major (de l'ordre de la superfície de tota Espanya, que és de $5 \cdot 10^{11} \text{ m}^2$). En qualsevol cas, sobre el paper l'energia solar representa una de les solucions al problema energètic mundial més viables des del punt de vista científic, tot i que comporta seriosos problemes pel que fa a l'emmagatzematge i la distribució d'aquesta energia.

7.3 Energia solar tèrmica

Les plaques solars tèrmiques funcionen aprofitant la calor que ens arriba a través de la radiació solar per tal d'escalfar un fluid que circula a través d'un circuit de canonades i serpentins (Figura 8.6. Aquesta calor normalment servirà per a escalfar un diposit d'aigua, en el cas que fem servir la placa solar per a l'abastiment d'aigua sanitària, o per a alimentar algun sistema de radiadors per calefacció. El principi d'absorció de calor a les plaques és molt similar al procés d'efecte hivernacle que té lloc a La Terra. La coberta externa de la placa està feta d'un material que deixa passar gran part de la radiació del Sol cap a l'interior, però que en canvi dificulta molt el pas cap a l'exterior de la radiació que emet la mateixa placa (recordem que qualsevol cos pel fet d'estar a una temperatura emet radiació tèrmica). Així la calor queda "atrapada" a dintre de la placa i el fluid que circula pel serpentí en el seu interior assoleix una temperatura més elevada.

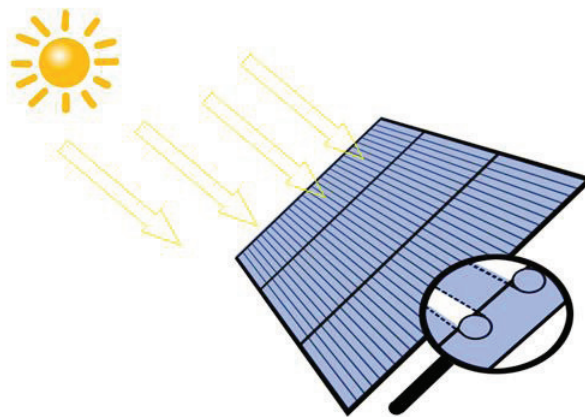


Figura 7.6: Esquema de l'estructura interior d'una placa solar tèrmica.

Si ens centrem en el procés d'absorció de calor a la placa, tenim que en funció de la quantitat de fluid que passi pel serpentí per unitat de temps la calor absorbida serà major o menor. Si el fluid circula massa de pressa no tindrà temps a escalfar-se, mentre que si ho fa molt a poc a poc el fluid es quedarà molta estona a la placa i arribarà un punt que ja pràcticament no pujarà més de temperatura, amb la qual cosa perdem eficiència. La calor d'escalfament del fluid ha de seguir l'equació ??:

$$E = mc\Delta T \quad (7.6)$$

on ΔT és la diferència de temperatures aconseguida en l'escalfar una massa m d'un fluid amb calor específic c . Si calculem l'energia cedida per unitat de temps tenim

$$\frac{E}{t} = \frac{m}{t} c \Delta T \quad (7.7)$$

i així introduïm el cabal màssic m/t (massa de fluid que passa pel serpentí per unitat de temps). Per exemple, imaginem que la placa pot cedir-li al fluid 1000 J de calor cada segon. Suposant que el fluid sigui aigua ($c = 4180 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$) i considerant que passen pel serpentí 10 grams d'aigua per segon obtenim un salt de temperatures de

$$\Delta T = \frac{\frac{E}{t}}{\frac{m}{t} c} = \frac{1000}{0,01 \cdot 4180} = 20\text{K} \quad (7.8)$$

Hem de tenir present que en general existirà un valor de m/t òptim pel sistema. Si el fluid circula massa de pressa (m/t gran) no té temps a escalfar-se i per tant la diferència de temperatures aconseguida serà petita. Però si va massa a poc a poc arribarà un punt en què l'aigua s'escalfarà fins a una temperatura propera a la de l'interior de la placa; aleshores aquesta ja no podrà escalfar-la més i l'eficiència del sistema es reduirà.

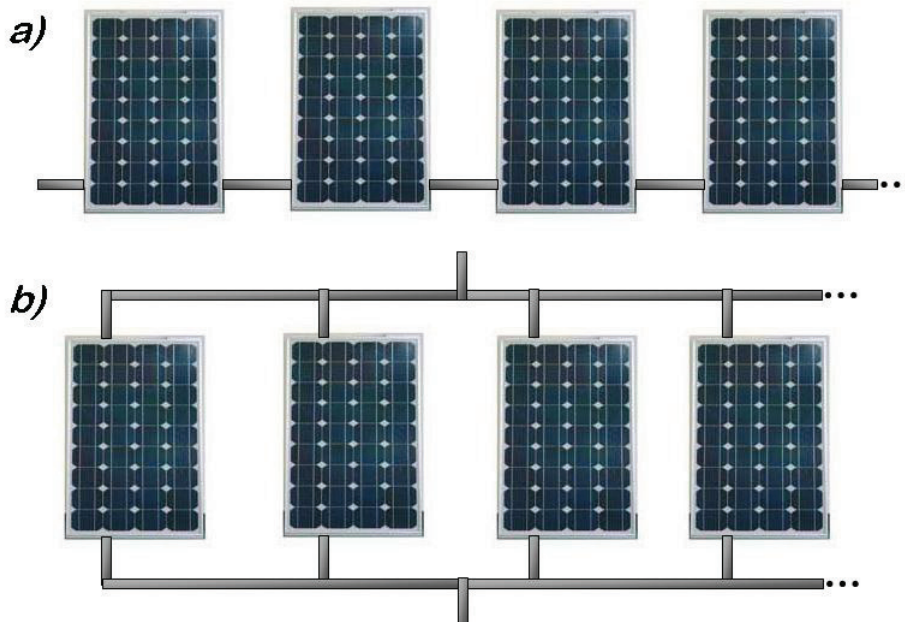


Figura 7.7: Esquema de configuració d'un grup de plaques solaris en sèrie (a) i en paral·lel (b).

Aquesta discussió ens pot permetre entendre la diferència que existeix entre una instal·lació de plaques solaris tèrmiques en sèrie o en paral·lel (Fi-

gura 8.7). El sistema amb plaques en sèrie permet que l'aigua passi dues vegades per la placa, amb la qual cosa s'escalfa més, però l'energia d'escalfament que obtindrem a la segona (tercera, quarta...) placa serà menor, ja que l'aigua ja hi entra a alta temperatura. En canvi, si col·loquem les plaques en paral·lel podem escalfar més quantitat d'aigua a la vegada, amb la qual cosa aprofitem més quantitat d'energia (major eficiència). Per aquest motiu s'acostuma a fer servir a la pràctica sempre sistemes de plaques en paral·lel, excepte en aplicacions concretes que requereixen temperatures molt elevades.

Finalment centrem-nos en l'energia que arribarà al diposit d'aigua calenta on l'energia aconseguida va emmagatzemant-se. Aquesta energia emmagatzemada correspondrà a l'energia d'escalfament de l'aigua del diposit, i per tant novament podem fer servir l'equació $E = mc\Delta T$. Imaginem que tenim un diposit de 120 litres d'aigua (que correspon a la caldera d'una casa més aviat gran) i el volem escalfar des de la temperatura ambient (20°C) fins a la temperatura típica a què es fa servir l'aigua sanitària (60°C). Com que sabem que cada litre d'aigua correspon a una massa de 1 Kg tenim que l'energia necessària per a fer això és

$$E = 120 \cdot 4180 \cdot 40 = 2,01 \cdot 10^7 \text{ J} \quad (7.9)$$

La pregunta aleshores seria: quantes plaques solars necessitem per a produir aquest escalfament en un temps concret (per exemple en 6 hores)? Per a calcular això hem de saber l'energia de la radiació solar incident, tenint en compte tot el que hem explicat en els apartats anteriors d'aquest capítol. Suposem que la placa no la tenim perfectament encarada al Sol, sinó que hi ha un angle de desviació de 20° (per a fer més senzill el càlcul no tindrem en compte que a mida que passen les hores aquest valor aniria variant). A més, podem imaginar que, tot i fer el procés de dia, pot haver núbols al cel de manera que només arriba a la nostra placa el 50% de la radiació màxima (que recordem són 1500 W/m^2). Finalment, imaginarem que entre les pèrdues a la placa i les pèrdues en el procés de transport només el 30% de l'energia rebuda a la placa arriba realment al diposit (que és un valor força realista). Unint tot això tenim que el ritme al qual l'energia és rebuda al diposit és

$$P = 1500 \cdot A \cdot \cos 20 \cdot 0,5 \cdot 0,3 = 211,4 \text{ W} \quad (7.10)$$

i per tant l'energia acumulada en 6 hores és

$$E = P\Delta t = 211,4 \text{ A} \cdot 6 \cdot 3600 = 4,57 \text{ A} \cdot 10^6 \text{ J} \quad (7.11)$$

Ara, igualant aquesta energia amb la que necessitem per a escalfar el diposit s'obté l'àrea de les plaques:

$$A = \frac{2,01 \cdot 10^7}{4,57 \cdot 10^6} = 4,4\text{m}^2 \quad (7.12)$$

Això vol dir que necessitaríem una superfície de placa solar de poc més de 2×2 metres per a aconseguir-ho.

7.4 Energia solar fotovoltaica

Les plaques solars fotovoltaïques fan servir la radiació solar per a generar directament un corrent elèctric, a diferència de les plaques tèrmiques que com hem explicat aprofiten l'energia en forma de calor. Tot i que per entendre el funcionament d'una placa fotovoltaïca són necessaris uns conceptes i coneixements força avançats, aquí intentarem presentar una versió força simplificada del procés per tal d'entendre com la transformació de l'energia té lloc.

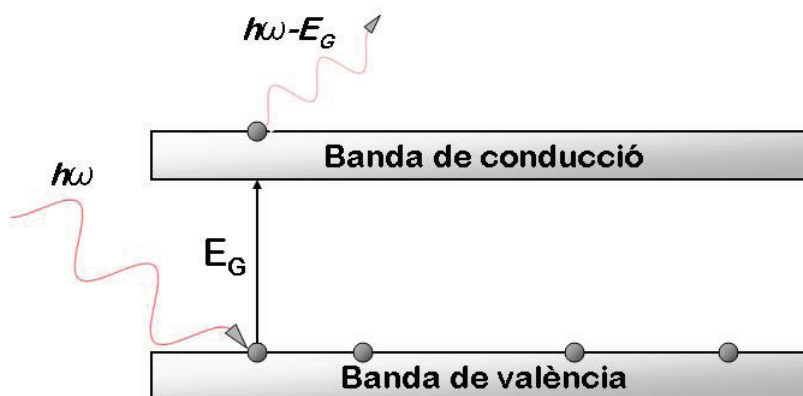


Figura 7.8: Esquema.

Primer de tot, cal saber que les plaques solars actualment estan fetes d'uns materials anomenats semiconductors, que tenen unes propietats elèctriques força particulars. L'energia que prové de la radiació solar es pot suposar que està agrupada en paquets o partícules anomenades fotons; l'energia d'un fotó és (Equació ??)

$$E = h\nu \quad (7.13)$$

on h és la constant de Planck i ν és la freqüència del fotó. Quan un fotó arriba a la superfície del semiconductor la seva energia es transfereix a

algun dels electrons del material; si l'energia rebuda és prou gran, l'electró pot passar del seu estat habitual (estat fonamental) a un altre estat de major energia (estat excitat). En els semiconductors existeix el que s'anomena la banda de valència (on es troben els electrons de l'estat fonamental) i la banda de conducció (on es troben els electrons excitats), i per poder passar d'una banda a l'altra els electrons han de rebre del fotó una energia mínima E_G (Figura 8.8). Si l'energia del fotó és menor que E_G no es produirà l'excitació; si l'energia és major aleshores l'electró passarà a la banda de conducció i l'energia sobrant ($h\omega - E_G$) s'anirà perdent per diferents processos de radiació i de dissipació en el material.

En realitat existeixen molts altres materials (fonamentalment metalls) on la transició de l'estat fonamental a l'estat excitat dels electrons té lloc degut a l'energia aportada pels fotons, cosa que en condicions adequades pot donar lloc a un corrent elèctric (aquest procés és l'efecte fotoelèctric que hem estudiat a l'Apartat ??). El problema és que en aquests casos els electrons tornen de manera espontània a l'estat fonamental de manera molt ràpida, cosa que fa el corrent elèctric que s'hi pugui generar a la pràctica sigui molt petit. En canvi, l'existència d'un "salt" entre la banda de valència i de conducció en els semiconductors fa que els electrons es puguin mantenir en l'estat excitat un temps molt més llarg (de l'ordre de centèsimes o mil·lèsimes de segon) que és suficient com per que aquest electró pugui ser aprofitat per a generar un corrent elèctric elevat.

Suposem per exemple que l'energia de separació entre la banda de valència i de conducció és de $E_G = 1,1$ eV, que correspon al cas d'un dels semiconductors més habituals, el silici. L'electron-Volt és una unitat d'energia que correspon, en el Sistema Internacional, a $1,6 \cdot 10^{-19}$ J. Quina és la freqüència mínima que ha de tenir un fotó per tal de fer saltar un electró del silici fins a la banda de conducció? Per a calcular-ho hem de suposar que l'energia del fotó coincideix just amb E_G i, per tant,

$$\nu = \frac{E_G}{h} = \frac{1,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,6 \cdot 10^{-34}} = 2,7 \cdot 10^{14} \text{ Hz.} \quad (7.14)$$

Amb això, i recordant les propietats d'una ona (Apartat ??), podem calcular quina és la longitud d'ona corresponent del fotó

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,7 \cdot 10^{14}} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1100 \text{ nm,} \quad (7.15)$$

on c és la velocitat de l'ona (en aquest cas, la velocitat de la llum). Per tant, tots aquells fotons amb freqüència superior a $2,7 \cdot 10^{14}$ Hz (o, el que

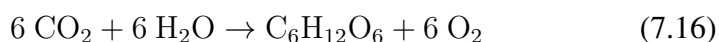
és el mateix, amb longitud d'ona inferior a 1100 nm) donaran lloc a excitacions electròniques en el silici. Si observem l'espectre de la radiació solar (Figura 8.5) veurem que, aproximadament, el 50% dels fotons procedents del Sol compleixen aquest requisit. Això vol dir que el rendiment d'una placa solar fotovoltaica composta de silici com a màxim pot ser del 50%, això suposant que tota l'energia dels fotons fos transformada en energia elèctrica. A la pràctica els rendiments reals d'aquestes plaques es troben actualment prop del 20%.

7.5 Fotosíntesi

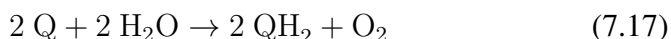
Com hem dit anteriorment, gairebé totes les fonts d'energia provenen de forma directa o indirecta de l'energia solar. No ens ha d'extranyar doncs que les plantes hagin desenvolupat mecanismes per aprofitar aquesta energia directament. A aquest procés l'anomenem fotosíntesi.

Com que en aquest capítol estem parlant dels mecanismes i de l'eficiència de generació d'energia a partir de la radiació solar, pot resultar il·lustratiu entendre com alguns éssers vius han resolt aquest problema al llarg de milions d'anys d'evolució. A més, avui en dia existeixen línies de recerca a tot el món enfocades a intentar reproduir de manera artificial els processos fotosintètics de les plantes com a possible alternativa energètica de futur.

El procés de la fotosíntesi dóna lloc de forma neta a la següent transformació:



A la pràctica, però, aquest procés té lloc a través de molts passos intermitjos que, entre d'altres coses, impliquen la síntesi de mol·lècules d'ATP. En general, en el procés de la fotosíntesi s'acostuma a diferenciar la fase lumínica (que involucra processos que requereixen la participació de radiació solar) i la fase fosca (que no requereix la presència de llum solar). A la fase lumínica intervien els anomenats fotosistema I i fotosistema II. En primer lloc el fotosistema II permet la generació d'oxigen a partir d'aigua mitjançant la reacció



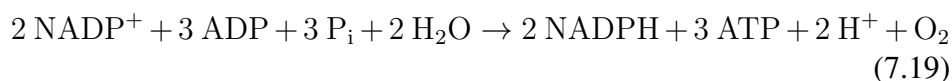
En aquesta reacció, Q representa un compost anomenat plastoquinona que és reduït a plastoquinol (QH_2). Aquesta reacció química requereix una energia de l'ordre d'uns 60 KJ/mol (depèn de l'estat d'agregació), energia que s'ha d'aconseguir a través dels fotons de la radiació solar. Com que

les molècules encarregades d'absorbir els fotons (clorofil·la) només són capaces d'absorbir llum amb longitud d'ona d'uns 680 nm, podem veure que l'energia obtinguda d'un mol de fotons absorbits amb aquesta longitud d'ona és

$$E = N_A h \nu = N_A h \frac{c}{\lambda} = 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 6,6 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{680 \cdot 10^{-9}} = 175 \text{ KJ} \quad (7.18)$$

on N_A representa el nombre d'Avogadro. En conseqüència l'energia del fotó és suficient per a arribar als 60 KJ/mol i poder realitzar el procés.

A continuació, el plastoquinol QH_2 torna de forma espontània a la forma Q i tenen lloc una sèrie de reaccions de reducció i oxidació en cadena entre els fotosistemes I i II, algunes de les quals requereixen l'aport energètic d'altres fotons. De tot aquest procés, que no detallem aquí donada la seva complexitat, en surt que a la fase lumínica de la fotosíntesi la reacció global que hi té lloc és



En conjunt, aquesta transformació requereix l'aport energètic de 8 fotons (4 d'ells amb longitud d'ona de 680 nm i 4 d'ells de 700 nm). Per tant, l'energia dels fotons utilitzada en total per a generar 3 mols de ATPs és de

$$E = N_A h c \left(\frac{4}{\nu_1} + \frac{4}{\nu_2} \right) = 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \left(\frac{4}{680 \cdot 10^{-9}} + \frac{4}{700 \cdot 10^{-9}} \right) = 1381 \text{ KJ} \quad (7.20)$$

Finalment, la fase fosca de la fotosíntesi té lloc a través de l'anomenat Cicle de Calvin, pel qual l'ATP dona lloc a la glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) com a producte final de la fotosíntesi. Aquesta etapa, però, presenta certes diferències depenent del tipus de plantes que es consideri. En les anomenades plantes C_3 són necessàries 18 molècules d'ATP per a generar una de glucosa, mentre que en les plantes C_4 se'n necessiten 30 molècules d'ATP. En termes energètics, això vol dir que per a generar un mol de molècules de $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (això correspon a una massa de 180 grams de glucosa) la planta necessita agafar 24.858 KJ d'energia dels fotons en el cas de plantes C_3 , i 41.430 KJ en el cas de plantes C_4 . A efectes comparatius, es pot comprovar que aquests valors són força semblants a l'energia que podem obtenir, per exemple, de cremar un kilo de carbó (17.000 KJ) o un litre de benzina (40.000 KJ).

Finalment, podem intentar analitzar el procés de la fotosíntesi en termes de rendiment energètic. Per dur a terme la reacció de combustió $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$

en teoria fan falta 2.880 KJ d'energia per cada mol de glucosa. A través de la fotosíntesi veiem que les plantes porten a terme aquest mateix procés però necessiten absorbir molta més energia. Per tant, el rendiment del procés és, per les plantes C_3 ,

$$\frac{2.880}{24.858} = 0.12 \quad (7.21)$$

i per les plantes C_4 el càlcul dona 0.07. és a dir, els rendiments es troben al voltant del 10%.

Per altra banda, hem de tenir en compte el fet que les plantes no aprofiten tota la radiació del Sol, sinó que com hem dit només absorbeixen fotons d'unes longituds d'ona força concretes (properes a 680 nm i 700 nm). Si un compara les energies totals procedents de la radiació solar amb l'energia final obtinguda de la fotosíntesi (energia que es pot aconseguir en cremar tota la glucosa obtinguda) es troba que el rendiment energètic de la fotosíntesi està proper al 1% (tot i que aquest valor pot augmentar fins al 7% en funció del tipus de planta i de les condicions ambientals).

La fotosíntesi i els combustibles fòssils

Donat que hem parlat en aquest apartat dels aspectes energètics de la fotosíntesi, és important remarcar que tots els combustibles fòssils que fem servir en la nostra societat actual (carbó, petroli...) són d'origen vegetal, i per tant són bàsicament un subproducte derivat del procés de fotosíntesi que les plantes han anat realitzant al llarg de milions d'anys. De fet, a partir d'aquesta idea és possible fer una estimació de quina quantitat de combustibles fòssils és previsible que existeixi al nostre planeta.

Comencem per observar que de la fotosíntesi en resulten glucosa i oxigen. Per tant, sabent quant oxigen hi ha a la nostra atmosfera i suposant que tot aquest oxigen ha sorgit de la fotosíntesi podem estimar també la quantitat de glucosa produïda, i d'aquí en calcularem el carboni emmagatzemat al planeta. Sabem que la pressió atmosfèrica és, a nivell del mar, aproximadament 10^5 Pa. Això vol dir que la superfície de La Terra rep una força, deguda a aquesta pressió, de

$$F = PA = P [4\pi R_T^2] = 10^5 [4\pi (6,37 \cdot 10^6)^2] = 5,1 \cdot 10^{19} \text{ N} \quad (7.22)$$

on A i R_T són la superfície i el radi de La Terra, respectivament. Aquesta força, per altra banda, és deguda al pes de l'aire atmosfèric. Per tant, la massa total d'aire a l'atmosfera ha de ser

$$m = \frac{F}{g} = 5,2 \cdot 10^{18} \text{ Kg} \quad (7.23)$$

i com que sabem que aproximadament l'aire està format per oxigen en un 20%, obtenim que la massa d'oxigen atmosfèric és d'uns 10^{18} Kg.

Finalment, repassant les relacions estequiomètriques de la reacció



deduïm que 1 mol d'oxigen (32 grams O_2) correspon a un mol de carboni (12 grams de C). Per tant, el resultat final és que la massa total de carboni previsiblement generada al llarg de la història a través de la fotosíntesi ha estat

$$10^{18} \frac{12}{32} = 3,7 \cdot 10^{17} \text{Kg} \quad (7.25)$$

D'acord amb aquest càlcul, la quantitat de carboni disponible al planeta seria força més gran que la massa total de reserves de combustibles fòssils que la humanitat ha estat capaç de trobar fins el moment, que és d'uns 10^{16} Kg (40 vegades més petit que el resultat del càlcul anterior). Això dóna peu a pensar que encara queden forces reserves per descobrir, tot i que no està gens clar si la localització i la forma d'aquestes reserves seran les adients com per a permetre el seu aprofitament.

7.6 Exercicis

- a) El projecte DESERTEC preveu aprofitar l'energia solar incident en la regió desèrtica del Sahara. Es preveu implantar una xarxa de centrals solars que pugui abastir gran part de la demanda sud-europea i nord-africana. Europa té un consum mitjà de 40 MWh per càpita i any i una població d'uns 500 milions d'habitants. Calcula
 - i. Quina potència mitjana necessitaríem per abastir aquest conjunt de població?
 - ii. Quants panells solars situats al Sahara (latitud 25°) per obtenir aquesta potència en el punt de màxima insolació?
 - iii. Quants en necessitaríem per obtenir aquesta potència mitjana considerant el cicle dia nit?
- b) Volem preparar una casa perquè escalfi l'aigua de la dutxa i així reduir-ne el consum elèctric. A l'habitatge viuran quatre persones que es dutxen diàriament amb 100 litres d'aigua a 35°C . A l'hivern, l'aigua entra a la casa a una temperatura de 5°C i a l'estiu a 15°C . Calcula:

- i. Quanta energia necessitem cada dia per tal d'escalfar tota l'aigua fins a la temperatura desitjada a l'hivern i a l'estiu.
 - ii. Si considerem l'energia solar que arriba a la teulada de la casa, quanta energia podrà rebre durant l'hivern i durant l'estiu si considerem una insolació de 8 i 16 hores respectivament?
 - iii. Quants metres quadrats de plaques solars hauriem de tenir per garantir que tota l'aigua s'escalfi durant l'hivern, i durant l'estiu
 - iv. Si per motius d'inversió optéssim per les plaques que asseguren l'aigua calenta a l'estiu i durant l'hivern utilitzem un aport addicional d'energia elèctrica per acabar d'escalfar l'aigua, en quant de temps acabariem pagant la diferència en concepte d'energia elèctrica?
- c) A Catalunya es generen al voltant de 2 milions de m^3 de biomassa a l'any en forma de fusta en els seus boscos. Aquests tenen una extensió total de 1.300.000 ha. Considerant que la fusta té una densitat d'aproximadament 0.9 g/cm^3 i que el 30% del seu pes és aigua. Calcula:
- i. El total de matèria orgànica seca que es genera en un any.
 - ii. Si tota aquesta matèria fós glucosa, quanta energia s'ha necessitat per fer créixer tota aquesta fusta?
 - iii. Quants fotons de 680 nm (els utilitzat en la fotosíntesi) tenen tota aquesta energia?
 - iv. La quantitat d'energia solar que ha caigut en els boscos de Catalunya durant tot l'any considerant una inclinació de 45° i una insolació mitjana de 12 h al dia.
 - v. Si aquesta fusta ha crescut en els boscos de Catalunya, quin ha estat el rendiment de les plantes considerant-les una màquina de convertir energia solar en fusta?
- d) En l'Apartat 8.5 hem fet una estimació de les reserves de combustibles fòssils a La Terra. Allà hem partit de la hipòtesi que tot l'oxigen que han generat els vegetals al llarg de la història de La Terra s'ha quedat a l'atmosfera. No obstant, podria ser que una part d'aquest oxigen hagués anat a parar a altres processos. Això faria que la nostra estimació encara sigui curta.

- i. Si suposem que només el 60% de l'oxigen de la fotosíntesi es manté a l'atmosfera, calculeu quantes tones de combustibles fòssils pot contenir encara el nostre planeta.
 - ii. Si les dades actuals (any 2008) diuen que la nostra societat crema uns $1,5 \cdot 10^{13}$ Kg de combustibles fòssils a l'any, quants anys de reserves tenim en teoria? I si suposem que només un 1% de les reserves és realment extraïble?
- e) Els biocombustibles són una altra manera d'aprofitar l'energia de la fotosíntesi per a usos humans. Alguns dels biocombustibles més comuns són l'etanol de blat de moro, l'etanol de canya de sucre o l'oli de palma.
- i. D'una plantació típica de canya de sucre es poden obtenir 0,9 l/m² d'etanol cada any. Si el seu poder calorífic és de 31.500 KJ/l determineu els Watts per metre quadrat que se n'obté.
 - ii. Comparant amb l'energia solar incident per metre quadrat (fent el promig al llarg del dia segons l'apartat 8.1) trobeu el rendiment que se n'obté dels biocombustibles.
- f) La planta PS10 (veure fotografia), situada a poc quilòmetres de Sevilla, representa una de les primeres plantes del món d'energia solar *concentrada*. La idea és reflectir l'energia solar en miralls i reconduir-la cap a un mateix punt (torre), des d'on l'energia és aprofitada de forma més senzilla i eficient perquè s'evita el transport de l'energia des de cada placa per separat.
- i. Si la placa conté 624 miralls, cadascun de 120 m², calculeu la potència solar que pot arribar a concentrar la torre, sabent que els miralls són mòbils per tal de poder-los encarar tots al Sol.
 - ii. Si la potència solar que és capaç de concentrar la planta és de 25 MW deduiu el rendiment energètic del mecanisme de concentració, i l'energia produïda en un dia clar en què tenim 10 hores de sol. L'energia concentrada a la torre es fa servir per a escalfar uns tancs d'aigua que es mantenen a 50 atmosferes de pressió i a una temperatura de 285⁰C. L'avantatge d'augmentar tant la pressió de l'aigua és que la podem escalfar fins a altes temperatures sense que vaporitzi, i així podem emmagatzemar més energia en forma líquida.
 - iii. Calculeu quants litres caldrien per emmagatzemar l'energia generada en un dia a la central, si ho féssim escalfant l'aigua

en condicions normals des de 20° (temperatura ambient) fins a 100°C .

- iv. Calculeu quants litres necessitem si podem sobreescalfar l'aigua fins a 285°C (suposem tota l'estona que la calor específica és 4180 J/KgK , tot i que en realitat aquest valor augmenta quan pugen la temperatura i la pressió).
- g) Un altre forma d'energia solar concentrada consisteix en fer servir plàstics o altres materials que actuïn com a lupa i focalitzin l'energia solar en petites plaques solars fotovoltaïques sofisticades. Les plaques solars fotovoltaïques més comunes tenen un rendiment energètic proper al 10% i tenen un preu d'aproximadament 3.000 euros/m^2 . Recentment alguns laboratoris han arribat a desenvolupar plaques anomenades de *triple unió* molt eficients (rendiment proper al 40%), però són encara molt cares (1 milió d'euros per metre quadrat).
- i. Suposant que el preu del material concentrador sigui menyspreable, calculeu la potència elèctrica per metre quadrat que podríem generar aconseguint concentrar l'energia solar de 100 m^2 sobre una placa solar de *triple unió*.
 - ii. Feu un gràfic on es mostri el preu per metre quadrat de placa que s'obtidria en funció del poder concentrador (definit com àrea real dividit entre àrea de la placa). En quin moment el preu per metre quadrat supera el de les plaques convencionals?
 - iii. Les plaques de *triple unió* s'anomenen així perquè incorporen tres semiconductors diferents, cadascun dels quals treballa amb llum de freqüències diferents. Si el salt d'energia entre la banda de valència i la de conducció dels tres semiconductors és $1,43\text{ eV}$ (arseniur de gali), $0,66\text{ eV}$ (germani) i $1,85\text{ eV}$ (fosfit d'indi i gali). Calculeu les freqüències típiques dels fotons que absorbeixen cadascun dels tres semiconductors i proveu el rang de freqüències de l'espectre solar (Figura XX) que cobreixen.