

PART I INTRODUCCIÓ A L'ENERGIA SOLAR

Tema 1.- Fonts d'energia

1.- Fonts d'energia no renovable

Es considera no renovable l'energia que està emmagatzemada en quantitats inicialment fixes en el subsòl. A mesura que es consumeix un recurs no renovable, aquest es va esgotant. Les reserves disponibles estan subjectes als factors tècnics i econòmics de la seva explotació, al descobriment de nous jaciments i al ritme d'extracció i consum.

a. Fonts d'energia fòssil

S'anomena energia fòssil la que s'obté de la combustió de certes substàncies que, segons la seva geologia, es van produir en el subsòl a partir de l'acumulació de grans quantitats de residus d'éssers vius, fa milions d'anys.

Petroli i els seus derivats: el petroli es una mescla d'una gran varietat d'hidrocarburs en fase líquida amb gran varietat d'impureses. Per destil·lació i altres processos, s'obtenen les diverses gasolines, el gas-oil, la turbosina, la tractolina, etc. A nivell mundial és un recurs escàs.

Gas natural: està compost principalment per metà i correspon a la fracció més lleugera dels hidrocarburs, per la qual es troba en forma de gas.

Carbó mineral: és principalment carboni, també d'origen fòssil, que es troba en grans jaciments al subsòl. És abundant a nivell mundial. La problemàtica ecològica que causa és més gran que les del petroli i els seus derivats.

b. Energia geotèrmica

L'energia geotèrmica consisteix en extreure calor del magma incandescent de la Terra, per mitjà de vapor. Mitjançant processos tèrmics, es possible generar electricitat, a les plantes nomenades geotermoelectriques. El magma es troba prop de la superfície terrestre a les zones amb gran activitat volcànica on és més explotable. En alguns casos el vapor o l'aigua calenta broten espontàniament. En altres, es necessari injectar aigua a pous i extreure-la com a vapor. No comporta combustió.

Part I Introducció a l'energia solar

c. Energia nuclear

L'energia nuclear s'obté de la modificació dels nuclis d'alguns àtoms, molt pesats o molt lleugers. En aquesta modificació, certa fracció de la seva massa es transforma en energia. L'alliberació d'energia nuclear, per tant, tampoc necessita combustió, però sí que produeix altres subproductes agressius al medi ambient.

Fissió. La fissió nuclear consisteix en la desintegració d'àtoms pesats, com certs isòtops de l'urani i el plutoni, per a obtenir àtoms més petits. Dins la fissió existeixen diverses variants. Aquesta és el mètode d'operació dels reactors nuclears comercials.

Fusió. La fusió nuclear consisteix a obtenir àtoms més grans, a partir de certs isòtops d'àtoms petits, com el triti. Teòricament aquesta seria una font d'energia abundant, degut a que existeix una certa fracció de triti en l'aigua dels oceans.

2.- Fonts d'energia renovable

S'anomena energia renovable la que, administrada de forma adequada, pot explotar-se il·limitadament, és a dir, la seva quantitat (a la Terra) no disminueix a mesura que s'aprofita. Per tenir un esquema de desenvolupament sostenible es indispensable que la majoria dels recursos, i particularment l'energia, siguin del tipus renovables.

La principal font d'energia renovable és el Sol. Com s'explicarà més endavant, el Sol envia a la Terra únicament energia radiant. Per altra banda, a l'atmosfera es converteix en una varietat d'efectes, alguns dels quals tenen importància com a recurs energètic, com és el cas de l'energia eòlica, l'energia de la biomassa i l'energia mareomotriu, que a continuació és descriuran breument.

a. Energia solar

L'energia solar està constituïda simplement per la porció de llum que emet el Sol i que és interceptada per la Terra. Hi ha varis mètodes d'aprofitament d'aquesta porció de llum.

Tèrmica. s'anomena tèrmica a l'energia solar de la qual el seu aprofitament s'aconsegueix per mitjà d'escalfament d'algun medi. La climatització de habitatges, calefacció, refrigeració, assecatge, etc., són aplicacions tèrmiques.

Fotovoltaïc: Es transforma la llum solar en electricitat. Aquesta conversió directa es realitza mitjançant unes substàncies especials dites semiconductors. La llum interacciona amb els electrons del semiconductor i provoca el moviment d'alguns d'ells; del lloc on surt l'electró apareix un forat amb càrrega positiva. Si es mou un electró

Part I Introducció a l'energia solar

pròxim al forat, l'ocuparà deixant un altre forat positiu. El moviment d'aquestes càrregues produeix corrent elèctrica que pot utilitzar-se com a font d'energia.

b. Energia eòlica

L'energia eòlica és l'energia que s'extreu del vent. Les aplicacions més comuns són: transport (velers), generació elèctrica i bombeig d'aigua. L'energia eòlica és derivada de l'energia solar, perquè una part dels moviments de l'aire atmosfèric és degut a l'escalfament causat pel So, també existeix un efecte de la rotació de la Terra i un altre de l'atracció gravitatoria de la Lluna i el Sol.

c. Energia de biomassa

L'energia solar captada per les plantes és transformada pel procés de la fotosíntesi en energia química que s'emmagatzema en els compostos que constitueixen la matèria de la qual els éssers vius estan formats. Aquesta matèria orgànica sintetitzada s'anomena biomassa. Així, es pot dir que la biomassa no és altra cosa que energia solar emmagatzemada en forma de vegetació.

Aplicacions: Les aplicacions més importants són: la producció i l'aplicació del biogàs, la producció de calor i energia per combustió directa, la producció de gas, oli i carbó per gasificació i piròlisi, la producció d'adobs, la producció de carburant i productes químics i finalment la producció de proteïnes.

d. Energia hidràulica

L'energia hidràulica és la que s'obté a partir de caigudes, artificials o naturals, d'aigua. Típicament es construeixen preses en els llocs amb una combinació de despesa anual d'aigua i condicions orogràfiques adequades. Estrictament, també es considera una forma derivada de l'energia solar, perquè el Sol proveu la força impulsora del cicle hidrològic. No obstant tradicionalment s'ha considerat com una forma d'energia a part.

e. Energia del mar

Energia Mareomotriu

En algunes regions de la costa es donen marees especialment altes i baixes. En aquest llocs s'ha proposat construir grans repeses costeres que permetrien generar energia elèctrica amb grans volums d'aigua, encara que amb petites diferències d'altura. És com l'energia hidràulica, però el seu origen és la força de gravetat del Sol i principalment de la Luna.

Part I Introducció a l'energia solar

Energia mareotèrmica

Els primers estudis sobre el mitjà són molt tranquil·litzadors ja que una central mareotèrmica de 100 MW produirà un refredament de les aigües superficials inferior a 1°C a 500 metres de la zona de basament, amb una pertorbació tèrmica de l'ordre de 0'3 °C en els 10 km² que rodejaria la central, a més s'ha calculat que el funcionament simultani de 100 grans centrals, només escalfaria 0'8 °C.

La utilització d'aquesta energia és fonamenta en el desnivell tèrmic existent entre la superfície dels mars i les capes profundes.

TEMA 2.- L'ENERGIA SOLAR

1. El Sol

La seva temperatura superficial és aproximadament de 600 °K però la temperatura a la zona interna s'estima a varis milions de graus. Com a conseqüència d'això el Sol no es comporta com un cos negre sinó que la seva radiació és el resultat de varies capes a diferents temperatures, les quals emeten i absorbeixen a diferents longituds d'ona. Però per a fer els càlculs necessaris considerarem el sol com un cos negre a una temperatura de 6000 °K

1.1 Angles entre la Terra i el Sol

La posició relativa d'un punt P respecte els raigs solars es pot calcular fàcilment si es coneix la latitud del punt, l'angle horari (h) i la declinació del Sol amb l'equador (d).

- Latitud: Distància angular que hi ha entre l'equador i el paral·lel situat sobre el punt P, per tant només variarà de 0° a 90°.
- L'angle horari: és el comprès entre la projecció al pla de l'equador i la recta que va des del punt P a l'equador. Variarà de 0 a 24.
- Declinació: angle format pels raigs solars i l'equador, pot estar situat pel Nord un màxim de 23° 27' i pel Sud amb un màxim de -23° 27'.

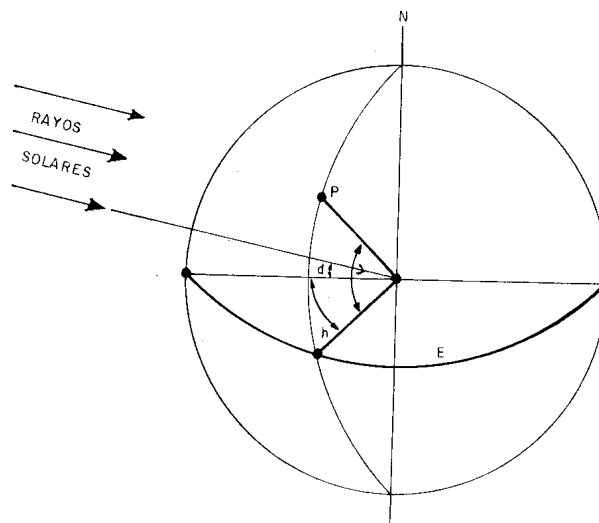


Figura 1.1 Angles que forma la llum solar amb un punt "P" situat a l'escorça terrestre

Part I Introducció a l'energia solar

Altres angles que s'utilitzen també en els càlculs relacionats amb la radiació solar són: azimut (α) altura (B) i cénit (θ)

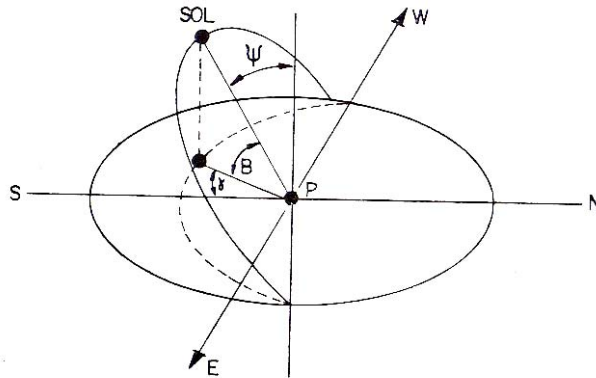


Figura 1.2. Altres angles solars.

1.2 Constant Solar.

La combinació de tres factors: la distància Terra-Sol, el diàmetre solar i la temperatura del Sol determinen un flux lluminós i d'energia que incideix sobre la superfície de la Terra.

S'ha discutit molt sobre si el Sol emet un flux d'energia constant, o es tracte d'una estrella variable. Alguns estudis semblen indicar que la variació de l'emissió d'energia, per part del Sol, és menor al 1% al llarg del cicle solar, que dura 22 anys. En el camp de l'enginyeria l'emissió de l'energia en el Sol es pot considerar constant. El recurs energètic solar està més lligat a la superfície terrestre i a les variacions meteorològiques, que a les solars.

La radiació emesa pel sol, juntament amb les condicions geomètriques respecte de la Terra, donen per resultat, que l'atmosfera terrestre incideix una quantitat de radiació solar quasi constant, i per definició se l'anomena **constant solar** (G_{sc}).

Els valors poden variar però nosaltres usarem el valor acceptat per la NASA i per la ASTM.

$$G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$$

2. Naturalesa de l'energia solar

1.1 La radiació normal extraterrestre

Com ja hem esmentat, la radiació extraterrestre que incideix sobre la Terra està subjecta a les variacions geomètriques i a les condicions físiques del propi Sol

Per altre banda, l'òrbita que descriu la Terra al voltant del Sol no és circular, sinó quasi el·líptica. La petita excentricitat de l'òrbita fa que, al voltant del 4 de gener, quan la Terra es troba en el periheli (mínima distància al Sol) la radiació solar extraterrestre sigui màxima. Per altre banda, als voltants de l'1 de juliol, quan la Terra es troba en l'afeli (màxima distància al Sol) llavors la radiació solar extraterrestre és mínima.

L'equació que descriu el flux d'energia sobre un pla normal a la radiació solar extraterrestre, al llarg de l'any és:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \quad 2.1$$

on G_{on} és el flux de radiació extraterrestre, mig en un pla normal a la radiació, i n és el número de dia de l'any.

En l'equació anterior la normativa que utilitzem per els subíndex és la següent: el subíndex "sc" s'usa per a la constant solar (provinent de l'anglès "solar constant"); el subíndex "o" s'utilitza per a la radiació extraterrestre, és a dir, fora de l'atmosfera; i el subíndex "n" s'utilitza per a la radiació mesurada en un pla normal a la direcció de propagació de la radiació. D'aquesta manera el subíndex "on" s'utilitza per a la radiació extraterrestre observada en un pla normal a la radiació.

1.2 Distribució espectral de la radiació solar

El Sol emet radiació en tota la gamma de l'espectre electromagnètic, des dels raigs gamma, fins les ones de radio. Per la qual amb la finalitat de l'aprofitament de la seva energia, només és important l'anomenada radiació tèrmica, que inclou només la ultravioleta (UV), la visible i la infraroja (IR). Tots els cossos emeten certa quantitat de radiació en virtut de la seva temperatura. A major temperatura ocorren dos canvis en la radiació solar.

1. La intensitat de l'emissió és major, és a dir, un major número de watts per metre quadrat abandonen el cos.
2. El color o tipus de radiació canvia cap a una menor longitud d'ona, del IR al visible i al UV, a mesura que augmenta la temperatura.

Part I Introducció a l'energia solar

La fotosfera es troba a uns 6000 °K y per tant, emet un cert flux d'energia corresponent a la seva temperatura. La seva distribució espectral és com s'indica en la Figura 2.1. Aquesta figura mostra la irradiància espectral (energia per unitat de temps, en la unitat d'àrea, per unitat de longitud d'ona) en funció de la longitud d'ona. La línia contínua però irregular correspon a la irradiància observada, mesurada des de la Terra. La corba puntejada representa la irradiància espectral que tindria un cos negre (radiador ideal), que es troba a la temperatura de 5762 °K. Aquesta temperatura correspon a la que hauria de tenir un cos negre per tal de tenir al mateixa emissió d'energia que el Sol.

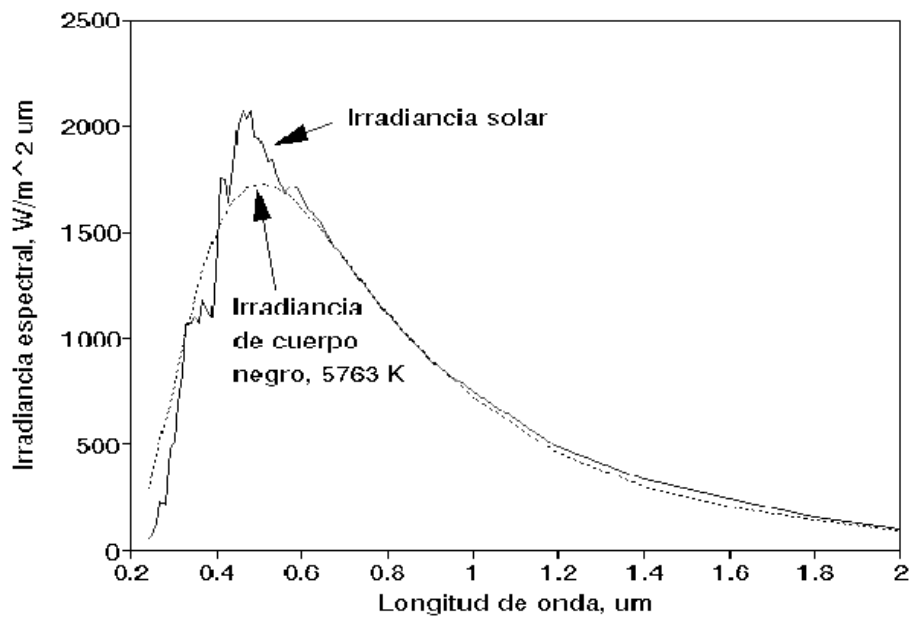


Figura 2.1 Gràfic de la irradiància solar en funció de la longitud d'ona de la radiació solar.

1.3 Variació del flux d'energia amb la distància

Quan es té una font lluminosa que emet en totes direccions, la intensitat lluminosa o flux d'energia varia inversament amb el quadrat de la distància a la font emissora.

$$Potencia_1 = 4 \pi r_1^2 G_1 \quad 2.2$$

On r_1 és el radi d'una esfera concèntrica amb la font lluminosa i molt major que el propi de la font lluminosa i G_1 és la intensitat lluminosa a la superfície de l'esfera amb radi r_1 .

3. Radiació solar

1.1 Tipus de radiació i les seves relacions geomètriques

La radiació solar pateix certes transformacions al incidir sobre l'atmosfera, de manera que és necessari emprar alguns conceptes específics per a les diverses radiacions. Les següents definicions ens ajudaran a entendre aquests conceptes.

Radiació directa. Es considera radiació directa aquella que procedeix directament del Sol, sense patir cap dispersió atmosfèrica. La radiació extraterrestre és radiació directa. Generalment s'utilitza el subíndex "b" per indicar radiació directa, pel termini emprat en anglès: beam (feix, raig).

Radiació difusa. És la que es rep del Sol, després d'ésser desviada per dispersió atmosfèrica. És radiació difusa la que es rep a través del núvols, així com la que prové del cel blau. De no haver-hi radiació difusa el cel seria negre, com succeeix de nit amb la Lluna. Es sol emprar el subíndex "d" per a la radiació difusa.

Radiació terrestre. Es considera radiació terrestre aquella que prové d'objectes terrestres, com per exemple, la que reflexa una paret blanca o un llac, etc..

Radiació total. És la suma de les radiacions directa, difusa i terrestre que es reben sobre una superfície. També es considerarà la **radiació global** a la radiació total incidida en una superfície horitzontal, en la qual no es tindrà en compte la radiació terrestre.

Per expressar la potència solar s'utilitza la irradiància. És la rapidesa d'incidència d'energia radiant sobre una superfície, per unitat d'àrea. Generalment s'empra el símbol G per a la irradiància, juntament amb els subíndex "o", "b" i "d" per a la irradiància extraterrestre, directa i difusa. La irradiància indica molt clarament que la radiació és un fenomen que transcorre en el temps. És energia que incideix instantàniament sobre una superfície.

Quan incideix la radiació sobre un pla, durant un temps determinat, pot parlar-se que ha incidit una certa quantitat d'energia. Aquesta quantitat d'energia, per unitat d'àrea, que incideix durant un període de temps determinat, rep el nom d'**irradiació**, J/m^2 , i no és altra que la integral de la irradiància durant el període que qüestió. Generalment s'utilitza el símbol "I" per la insolació per hora, i "H" s'utilitza per la insolació en el període d'un dia.

$$I = \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt \quad 3.1$$

Part I Introducció a l'energia solar

1.2 Càlcul de la irradiància directa sobre una superfície

Considerem per ara el càlcul de la radiació directa sobre una superfície. El flux d'energia sobre una superfície determinada depèn no només de la irradiància que existeixi, sinó també de la orientació que tingui la superfície en qüestió respecte de la direcció de propagació de la radiació. La irradiància serà màxima sobre el pla que estigui en posició normal a la direcció de propagació de la radiació. En canvi, serà mínima si el pla és paral·lel a la radiació. La intensitat de radiació sobre la superfície depèn doncs, de l'angle (θ) que formin la normal amb la superfície, respecte de la direcció de propagació de la radiació. Aquest angle (θ) es coneix amb el nom d'**angle d'incidència**. Llavors, la irradiància incident sobre una superfície serà:

$$G_T = G_n \cos \theta \quad \mathbf{3.2}$$

on G_T es refereix a la irradiància sobre un pla amb qualsevol inclinació i G_n es refereix a la irradiància mitja sobre un pla normal a la direcció de propagació de la radiació.

Si es coneix la irradiància normal (la constant solar G_{sc}) i es coneix l'angle α mitjançant l'equació anterior es pot calcular la irradiància sobre un pla amb qualsevol inclinació. Com el Sol descriu un moviment aparent al llarg del dia (d'orient a occident), i un altre de l'any (de sud a nord i viceversa), el valor de l'angle α varia amb la data i l'hora, a més de fer-ho amb la orientació del pla, la seva inclinació respecte de la horitzontal i la latitud geogràfica del lloc on es trobi el pla en qüestió. Utilitzarem la següent nomenclatura:

- φ (Phi): Simbolitza la latitud geogràfica, és a dir, la posició angular del lloc on es troba el pla en qüestió, respecte de l'equador terrestre, positiu a l'hemisferi nord. Pot variar de -90° a 90° .
- δ (delta): Declinació solar. És la posició angular del sol al migdia solar, respecte del pla de l'equador, positiu cap al nord. La declinació solar és zero el dia que comença la primavera i el dia que comença la tardor (equinoccis). La declinació màxima en el solstici d'estiu és de $23^\circ 27'$ i la mínima en el solstici d'hivern és de $-23^\circ 27'$. La declinació solar es pot calcular aproximadament mitjançant l'equació:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad \mathbf{3.3}$$

- β (beta): Pendent del pla sobre el qual incideix la radiació, és a dir, la seva inclinació respecte de la horitzontal. En l'interval $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$, la superfície mira cap amunt, mentre que l'interval $90^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$, la superfície mira cap avall. En un terrat horitzontal $\beta = 0^\circ$, mentre que per a una paret vertical $\beta = 90^\circ$.

Part I Introducció a l'energia solar

- γ (Gamma) Azimut: és l'angle que formen la normal amb la superfície, respecte del meridià local. El valor de zero es considera el sud, cap a l'est es consideren valors negatius i cap a l'oest positius.
- ω (omega) Angle horari. És el desplaçament angular de sol, al est o al oest del meridià local, degut a la rotació de la Terra a la velocitat angular de 15° per hora (360° en 24 hores). Negatiu pel matí i positiu per la tarda.

La següent equació relaciona l'angle θ amb el angles anteriors:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen} \delta \text{sen} \phi \cos \beta - \text{sen} \delta \cos \phi \text{sen} \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \text{sen} \phi \text{sen} \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \text{sen} \beta \text{sen} \gamma \text{sen} \omega \end{aligned} \quad \mathbf{3.4}$$

En la majoria de les aplicacions d'aquesta equació, la única variable al llarg del dia és l'angle horari. Tota la resta sol ésser constant en una data i lloc determinats. Degut a això l'equació té un gran número de constants.

Per a una superfície horitzontal, $\beta = 0$, el qual implica que $\sin \beta = 0$ mentre que $\cos \beta = 1$. En aquestes condicions, desapareixen el segon, quart i cinquè termes de l'equació anterior, amb el que s'obté:

$$\cos \theta_z = \text{sen} \delta \text{sen} \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad \mathbf{3.5}$$

On θ_z representa l'angle de la posició del Sol respecte la vertical (que és la normal al pla en qüestió), que es coneix amb el nom d'**angle zenital**. Com que δ i ϕ són constant en una data i lloc determinats l'equació és pot simplificar més:

$$\cos \theta_z = A + B \cos \omega \quad \mathbf{3.6}$$

on $A = \text{sen} \delta \text{sen} \phi$ i $B = \cos \delta \cos \phi$. Aquesta equació té varies aplicacions. Pot emprar-se per a calcular la irradiància en funció del temps, al llarg d'un dia, sobre un pla horitzontal. També es pot utilitzar per a calcular l'hora de sortida i posta del Sol, fent la següent consideració.

Al sortir el Sol, igual que al pondre's, l'angle zenital és de 90° . Per tant l'equació queda en la forma:

$$A + B \cos \omega_s = 0 \quad \mathbf{3.7}$$

que és un equació amb una sola incògnita, on ω_s és l'angle horari a la sortida i posta del sol (té dues solucions igual però amb signe contrari). Aillem la ω_s .

$$\omega_s = \cos^{-1} \left(-\frac{A}{B} \right) = \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) \quad \mathbf{3.8}$$

Part I Introducció a l'energia solar

Aquestes equacions són vàlides només de forma aproximada. No representen el mètode astronòmic per calcular la sortida i posta del Sol.

1.3 Conversió de l'hora civil a hora solar

La instal·lació es situarà a Catalunya, més concretament a Santpedor a la comarca del Bages; al ésser una zona per on passa el meridià de greenwich o meridià zero l'hora civil i l'hora solar haurien d'ésser les mateixes, però per aprofitar més les hores de sol i així aconseguir un millor aprofitament energètic tenim un petit desfasament de l'hora civil en front de l'hora solar, aquest és diferent a l'estiu de l'hivern. A l'estiu tenim un desfasament d'una hora positiva respecte l'hora solar, és a dir, l'hora civil va una hora avançada respecte l'hora solar. A l'hivern aquest desfasament es veu augmentat pel canvi horari que es realitza per un estalvi energètic, per tant a l'hivern hi haurà dues hores positives de desfasament sobre l'hora solar.

4. Estimació i medició de la radiació solar

4.1.- Càlcul de la radiació directa sobre una superfície horitzontal.

Un cas particularment interessant, pel càlcul de la radiació directa (irradiància i irradiació), és el que es refereix a una superfície horitzontal. Combinant les equacions 2.1 i 3.2, tindrem que la irradiància directa, sobre un pla horitzontal és:

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360 n}{365}\right) \right] \cos \theta_z \quad 4.1$$

on G_{sc} és la constant solar, n és el número de dia de l'any i θ_z és l'angle zenital. Combinant aquesta expressió amb la de cosinus de l'angle zenital, s'obté l'equació per la irradiància directa sobre un pla horitzontal, en qualsevol data (n , d), qualsevol lloc (y) i qualsevol hora (w).

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360 n}{365}\right) \right] (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad 4.2$$

Integrant aquesta equació, des de la sortida fins la posta del Sol, s'obté la irradiació al llarg d'un dia, H_o . Només és necessari calcular prèviament l'angle a la posta del Sol, w_s , com s'indica anteriorment (equació 3.1):

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360 n}{365}\right) \right] \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2 \pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right) \quad 4.3$$

Part I Introducció a l'energia solar

En aquesta equació, la irradiació H_0 està en J/m^2 . Per últim, una expressió per calcular la irradiació incident en un pla horitzontal, I_0 , des d'un temps inicial fins a un temps final, amb angles horaris w_1 i w_2 , respectivament, en J/m^2 , és:

$$I_o = \frac{12 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365} \right]$$

4.4

$$x \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2 \pi (\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \phi \sin \delta \right]$$

4.2.- Estimació de la radiació en un dia clar.

Fins ara només hem calculat la radiació extraterrestre. L'atmosfera exerceix un efecte de redistribució de la radiació que rep del Sol. Per exemple, en un dia molt clar, una part relativament petita es converteix en radiació difusa, mentre la major part es manté com a directa. La radiació difusa, en un dia clar, és la que prové del cel blau. En canvi, en un dia tapat, la redistribució de la radiació és molt més notable. Els núvols densos tenen una fracció d'energia reflexada molt alta, el qual fa que, en un dia densament tapat, una gran part de la radiació solar es reflexa a l'espai exterior. A més, l'energia que aconseguix passar a través dels núvols, és únicament radiació difusa.

És molt difícil desenvolupar models per percebre amb precisió la presència de núvols (posició, densitat, etc.). Existeixen models per predicció de dies promitg en certa data, però no per dates específiques.

En canvi, existeix una diversitat de models per estimar la radiació solar per a dies clars. Bàsicament, aquests models apliquen un factor de transmitància a la radiació extraterrestre. Així, les equacions per a la irradiància i irradiació en períodes curts, queden de la següent forma. Per la irradiància directa (sub b), normal a la superfície (sub n), en una atmosfera clara (sub c), es té G_{cnb} :

$$G_{cnb} = \tau_b G_{on} \quad \mathbf{4.5}$$

Per altre banda, per estimar la irradiància directa sobre una superfície horitzontal en una atmosfera clara, s'usa G_{cb} , donat per l'equació:

$$G_{cb} = \tau_b G_{on} \cos \theta_z = \tau_b G_o \quad \mathbf{4.6}$$

Per a períodes d'una hora (però no per a tot el dia), es possible també utilitzar el mateix factor de transmitància per estimar la irradiació en un dia clar:

$$I_{cb} = \tau_b I_{on} \cos \theta_z \quad \mathbf{4.7}$$

Part I Introducció a l'energia solar

Com es pot suposar, el problema consisteix en càlcul o la estimació de la transmitància atmosfèrica per la radiació directa, τ_b i per la difusa, τ_d . Existeixen varis models però nosaltres utilitzarem el que es coneix com "model de Hottel" (1976). Aquest model expressa la transmitància atmosfèrica, en funció de l'àngel zenital (major transmitància en direcció vertical, menor cap a l'horitzó), de l'altura sobre el nivell del mar (major transmitància a major altura) i del tipus de clima. El model de Hottel és de la forma:

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{-k/\cos\theta_z} \quad 4.8$$

on a_0 , a_1 i k són paràmetres ajustat empíricament. Pel càlcul d'aquestes quantitats, que arriba a ésser la correcció per altura i tipus de clima, s'usen les equacions:

$$a_0 = r_0 [0.4237 - 0.00821(6 - A)^2]$$

$$a_1 = r_1 [0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2] \quad 4.9$$

$$k = r_k [0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2]$$

on A és l'altura sobre el nivell del mar (km). Els valors de les diferents r estan a la taula (4.1), per diferents climes.

Llavors, el procediment per la utilització d'aquest model atmosfèric seria: donades la latitud geogràfica, la data i hora, es calcula el cosinus de l'angle zenital, segons l'exposat anteriorment.

Taula 4.1. Factors de correcció per alguns tipus de climes.

Tipus de clima	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Estiu, latitud mitja	0.97	0.99	1.02
Estiu, sub-àrtic	-0.99	0.99	1.01
Hivern, lat. mitja	1.03	1.01	1.00

Llavors,

- S'escull un tipus de clima de la taula.
- Sabent l'altura sobre el nivell del mar, substituir aquests valors en l'equació per a_0 , a_1 i k .
- Calcular la transmitància atmosfèrica a la radiació directa, segons el $\cos\theta_z$ calculat.
- Aplicar aquest valor a la irradiància directa, o a la irradiància directa en el període d'una hora.

Faltaria llavors estimar la irradiació (o irradiància en una hora) difusa, per tenir el model atmosfèric complet. La radiació difusa és més difícil de modelar amb precisió, però afortunadament és menor, des del punt de vista energètic. Generalment es suposa que la radiació difusa prové homogèniament de tot el cel, és a dir, no té una direcció

Part I Introducció a l'energia solar

preferencial. Per a una superfície horitzontal, la transmitància a la radiació difusa ve donada per:

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939 \tau_b \quad \mathbf{4.10}$$

Llavors, la transmitància a la radiació directa, obtinguda anteriorment, es substitueix en aquesta, per obtenir τ_d . La irradiància difusa vindrà donada per l'equació:

$$G_{cd} = \tau_d G_{on} \cos \theta_z \quad \mathbf{4.11}$$

o, per un interval d'una hora,

$$I_{cd} = \tau_d I_{on} \cos \theta_z = \tau_d I_o \quad \mathbf{4.12}$$

i la irradiació i irradiància total vindran donades per les equacions:

$$G_c = G_{cb} + G_{cd} \quad y \quad I_c = I_{cb} + I_{cd} \quad \mathbf{4.13}$$

4.3.- Medició de la radiació solar.

Per moltes aplicacions pràctiques, no només s'ha de calcular la radiació teòrica que incideix sobre un lloc o sobre un equip solar determinat. Es necessari fe les medicions, per tenir els valors efectius d'energia disponible o incident sobre un col·lector.

Existeixen varis mètodes per medir la radiació solar, ja sigui en forma d'irradiància o d'irradiació. El mètode més acceptat és l'ús d'un piranòmetre.

Un **piranòmetre**, es un instrument per medir la irradiació global (directa més difusa), usualment sobre una superfície horitzontal.

El tipus més comú de piranòmetres, consisteix en dos sensors de temperatura, un d'ells exposat a la radiació solar i ennegrit i l'altre, protegit de la radiació. Si els dos sensors es troben en condicions similars en tot, menys en el fet d'estar exposats a la radiació, hi haurà una diferència de temperatura entre ells. La hipòtesi de treball d'un piranòmetre, es que la irradiància és directament proporcional a la diferència de temperatura entre ambdós sensors. Per evitar soroll en les lectures, causat pel vent i altres factors meteorològics, el sensor exposat a la radiació (i algunes vegades també l'altre) solen estar protegits per un hemisferi de vidre. Aquest hemisferi, de característiques òptiques adequades, permet el pas de la radiació, però evita el refredament pel vent, el qual alteraria la lectura.

Es possible utilitzar piranòmetres per medir radiació directa i difusa per separat, de la següent forma. Es requereixen dos piranòmetres. Un d'ells s'instal·la horitzontalment i medeix radiació global. A l'altre se li posa una ombra que consisteix en una banda o un disc per obstruir la radiació directa. Llavors, aquest piranòmetre medirà només la radiació difús. La resta de la global menys la difús, dona com a resultat la directa.

Part I Introducció a l'energia solar

Un altre aparell per medir la radiació solar és el piroheliòmetre. El **piroheliòmetre** és un instrument que s'enfoca directament al Sol per medir exclusivament la radiació que en proveï dels seus voltants més propers. És a dir, és un instrument que medeix radiació directa. A diferència del piranòmetre, que se sol instal·lar fix, el piroheliòmetre pot contar amb un sistema de moviment de rellotgeria per seguir el Sol amb gran precisió.

La informació generada per una piranòmetre ha de ser registrada, ja sigui per un mètode gràfic o electrònic. Això permet llavors integrar les irradiàncies en períodes donats, per obtenir la irradiació corresponent.

La figura 4.1 mostra la pantalla d'un programa de còmput desenvolupat en el Grup Solar, que permet recuperar la lectura del piranòmetre, a més de permetre el càlcul de la irradiància en atmosfera clara i extraterrestre.

Quan la irradiància mesurada està molt per sota de la de atmosfera clara, és degut generalment a l'aparició de núvols (suposant que no es tracti de l'ombra d'un arbre, o d'un eclipsi). Per altre banda, ocasionalment pot succeir que la radiació mitja sigui major que la calculada amb el model d'atmosfera clara. Això pot succeir per varis motius:

- Perquè efectivament hi hagi una major irradiància que la calculada
- Perquè els núvols que rodegen el Sol produeixen un efecte de concentració de la radiació, exagerant la lectura.
- Per defecte de l'instrument, que no respongui adequadament a certes condicions meteorològiques.

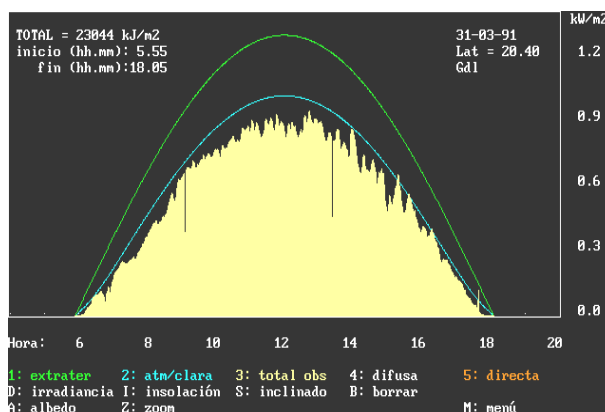


Figura 4.1 Pantalla del programa Datasol, que mostra la radiació mitja i calculada amb dos models.

5. Aprofitament de l'energia solar.

Es poden emprar dos sistemes diferents per a l'aprofitament de l'energia solar: el fototèrmic i el fotovoltaïc.

a. Fototèrmic

Part I Introducció a l'energia solar

b. Fotovoltaic

Aquest sistema utilitza la descripció dels raigs solars que diu que les radiacions solars es poden tractar com a partícules. Capta els fotons dels raigs solars mitjançant les cèl·lules fotovoltaïques.

Cèl·lules fotovoltaïques

Les plaques fotovoltaïques estan compostes per un nombre determinat de cèl·lules, el funcionament de les quals es basa en l'efecte que es produeix per la interacció de la llum amb un material susceptible de generar corrent elèctric. Aquest material, en un principi semiconductor sòlid, quan absorbeix un fotó genera en el seu interior un parell de portadors de corrent: un electró i un forat. Quan un electró absorbeix l'energia d'un fotó, aquest assoleix un nivell d'energia que el pot portar a la banda de conducció de l'àtom, on pot participar en la conducció elèctrica, amb la qual cosa deixa un "forat" en el seu lloc. Un electró que es troba proper a aquest forat pot moure's i ocupar el buit ocasionat. Aquest moviment constitueix el corrent elèctric. Els semiconductors construïts amb l'objectiu de generar corrent elèctric habitualment estan formats per dues capes entre les quals es crea un camp elèctric suficient com per separar les càrregues de signe diferent i permetre la generació de corrent quan reben radiació lluminosa. En el cas més habitual s'utilitza silici dopat (contaminat artificialment) per un element determinat, constitueix una capa de semiconductor anomenat n (amb càrrega negativa), o bé constitueix una capa anomenada p (amb excés de càrrega positiva) si està dopat amb un altre tipus d'element. La unió d'aquestes dues capes (unió p-n), proveïda dels contactes elèctrics adequats, fa possible l'aparició de corrent elèctric; quan hi ha una capa que és il·luminada (la n), aquesta forma una cèl·lula solar.

Una cèl·lula solar aïllada proporciona una potència reduïda. Per obtenir potències utilitzables per a aparells de mitjana potència cal unir un cert nombre de cèl·lules en sèrie, amb la qual cosa s'augmenta la tensió de corrent. La unitat bàsica de les instal·lacions fotovoltaïques és doncs la placa fotovoltaïca, que conté entre 20 i 40 cèl·lules solars. Posteriorment, aquestes plaques es connecten entres si en sèrie i/o en paral·lel per tal d'obtenir el voltatge desitjat.

Components bàsics d'una instal·lació solar fotovoltaïca

Per tal que una instal·lació solar fotovoltaïca funcioni correctament i tingui una elevada fiabilitat de subministrament i durabilitat ha d'estar construïda per un conjunt de components bàsics, on cadascun dels quals realitza el seu paper.

Part I Introducció a l'energia solar

- **Plaques fotovoltaïques:** Són l'element de generació elèctrica. Estan formades per un nombre variable de cèl·lules fotovoltaïques connectades en sèrie i/o en paral·lel per tal de produir una tensió nominal de 12 V, les quals van encapçalades entre una làmina plàstica per darrera i una coberta transparent per davant. Tot el conjunt va tancat amb una carcassa perifèrica metàl·lica amb la qual cosa queda un conjunt estanc protegit de la humitat.
- **Suports de les plaques:** L'estructura de suport té la missió de mantenir fixat el conjunt de plaques fotovoltaïques sobre una part de l'edifici o sobre el sòl, de permetre el canvi d'inclinació a que queden les plaques respecte l'horitzontal, de protegir les plaques etc.
- **Regulador:** La funció d'aquest aparell és protegir les bateries contra la sobrecàrrega i la descàrrega excessiva. En el primer cas, posa les plaques en curt circuit i talla el pas de corrent cap a les bateries. En el segon cas, o bé avisa al consumidor mitjançant una alarma, o en alguns models, talla el subministrament si el consum continua sense que hi hagi prou càrrega. També actuen com a indicadors de l'estat de càrrega de les bateries, de la intensitat del corrent de càrrega de les bateries i de consum, etc. Els reguladors més avançats tenen a més altres funcions. Seleccionen el tipus de càrrega i el voltatge que cal mantenir en funció de la temperatura, fan el seguiment del punt de màxima potència, etc. Un bon sistema de regulació no solament permet aprofitar al màxim l'energia subministrada per les plaques fotovoltaïques, sinó que, a més, és essencial per garantir una bona protecció i utilització de les bateries.
- **Bateries:** Com que la intensitat solar varia al llarg del dia i al llarg de l'any, i les necessitat no són paral·leles a aquestes fluctuacions, cal emmagatzemar l'energia elèctrica generada. Normalment s'utilitzen bateries elèctriques, ja que és el sistema més eficient i econòmic de què es disposa. Les instal·lacions fotovoltaïques utilitzen normalment bateries estacionàries que s'adapten millor al règim de càrrega i descàrrega característic d'una instal·lació fotovoltaïca. La vida activa de la bateria dependrà de la seva bona utilització i de la qualitat del sistema de regulació de càrrega i descàrrega. És important no descarregar excessivament les bateries i cal que periòdicament es faci una càrrega a fons. Per aquest motiu és important que el dimensionament plaques-bateria respecte del consum estigui ben fet. Un excés de capacitat d'emmagatzematge respecte del potencial de producció de les plaques pot significar que poques vegades s'arribi a fer la càrrega a fons, fet que aniria degradant la bateria. Així mateix, una capacitat de bateries molt petita equivaldria a córrer el risc de quedar-se sense electricitat quan fa uns dies seguits de mal temps. S'empren en

Part I Introducció a l'energia solar

general bateries estacionàries amb vasos independents de 2 V que connectats en sèrie ofereixen el voltatge de treball adequat (12, 24 i 48 V).

- **Ondulador:** La gran majoria d'electrodomèstics estan dissenyats per a treballar en les condicions normalitzades de subministrament: corrent altern sinusoide de 50 Hz i 220 V. Les instal·lacions amb sistemes autònoms que emmagatzemen energia elèctrica en bateries es troben davant del dilema de prescindir dels aparells que treballen a 220 V, o bé recórrer a un aparell transformador. Habitualment, la transformació del corrent continu a altern es realitza amb uns aparells electrònics anomenats onduldors o cicloconvertidors segons que produeixi una ona sinusoïdal o quadrada. Per a les instal·lacions fotovoltaïques en què cal cobrir el consum domèstic d'una casa, s'ha d'adaptar a l'ondulador una gran variació de la càrrega aplicada hi ha de tenir un màxim rendiment energètic per evitar pèrdues de l'energia generada.

TEMA 3.- ENERGIA SOLAR FOTOTÈRMICA

1. Introducció

La problemàtica energètica d'aquests últims anys ha estat l'abastament d'energia i recursos de combustibles fòssils.

2. Col·lectors solars

Els col·lectors solars tèrmics són dispositius capacitats per captar la radiació solar i comunicar-la a un fluid, per a el seu posterior aprofitament.

Els col·lectors solars es divideixen en dos grans grups:

- Col·lectors solars sense concentració: Els quals poden arribar a obtenir altes temperatures (arriben aproximadament a uns 70 °C) pel qual són emprats en les aplicacions de l'energia solar tèrmica a baixa temperatura.
- Col·lectors solars de concentració: Els quals fent us dels mètodes de concentració de l'òptica són capaços d'eleva la temperatura del fluid a més de 70 °C. Aquests s'apliquen en l'energia solar tèrmica de mitja i alta temperatura.

2.1. Col·lectors solars sense concentració

Aquests col·lectors es caracteritzen per no posseir mètodes de concentració, pel qual la relació entre la superfície del col·lector i la superfície d'absorció és pràcticament la unitat.

- Col·lector solar de placa plana: En general un col·lector de placa plana actua com un receptor que recull l'energia procedent del Sol i escalfa una placa, l'energia emmagatzemada a la placa és transfereix al fluid. Aquests col·lectors, en general posseeixen una coberta transparent de vidre o plàstic que aprofita l'efecte invernader. La seva aplicació és la producció d'aigua calenta sanitària, climatització de piscines i calefacció.

Part I Introducció a l'energia solar



- Col·lectors solars de cautxú: Col·lector format per una sèrie de tubs de cautxú, els quals exposats al Sol absorbeixen la radiació solar i la hi transmet al fluid que passa pel seu interior. La seva aplicació principal és la climatització de piscina degut als seu baix rendiment fora de l'època estiuenca.



- Col·lectors d'aire: Són col·lectors del tipus pla en el que la característica principal és tenir com a fluid caloportador l'aire. No tenen una temperatura màxima límit (els processos convectius tenen una menor influència en l'aire) i treballen millor en condicions de circulació normal, però en contraposició posseeixen una baixa capacitat calorífica i el procés de transferència de calor entre placa i fluid és dolent. La seva aplicació principal és la calefacció.
- Col·lectors de buit: Van dotats d'una doble coberta envoltant, hermèticament tancada, aïllada de l'interior i de l'exterior, i en la qual s'ha fet el buit. La seva finalitat és la de reduir les pèrdues per convecció. Són més cars, a més de perdre l'efecte del buit amb el pas del temps. La seva principal aplicació és la producció d'aigua calenta sanitària i climatització de piscines.

Part I Introducció a l'energia solar

- Tubs de calor: Posseeixen una simetria cilíndrica, formats per dos tubs concèntrics; un exterior i un interior pintat de negre o amb pintura selectiva. El fluid circula pel tub intern. La seva aplicació principal és la calefacció.



- Col·lectors cònics o esfèrics: La seva principal característica és que constitueixen simultàniament la unitat de captació i d'emmagatzematge. La seva superfície de captació és cònica o esfèrica amb una coberta de vidre de la mateixa geometria. Amb aquestes geometries s'aconsegueix que la superfície il·luminada al llarg del dia, en absència d'ombra, sigui constant; la seva instal·lació és senzilla, però presenta problemes d'estratificació de l'aigua i la superfície útil de captació és petita. La seva utilització principal és la producció d'aigua calenta sanitària.



Part I Introducció a l'energia solar

2.2. Col·lectors solars de concentració

Utilitzen sistemes especials amb la finalitat d'augmentar la intensitat de la radiació sobre la superfície absorbent i d'aquest mode aconseguir altes temperatures en el fluid caloportador. La principal complicació que presenta és la necessitat d'un sistema de seguiment per aconseguir que el col·lector estigui permanentment orientat en direcció al Sol.

-Concentradors cilíndrics: La seva superfície reflectora és la meitat d'un cilindre. La seva principal aplicació és la producció de vapor en una central tèrmica.



-Concentradors paraboloïdes: La seva superfície reflectora presenta una geometria de paraboloïde de revolució. La seva aplicació principal és la producció de vapor en una central tèrmica.



3. Col·lectors solars de placa plana

El col·lector de placa plana acostuma a integrar en el anomenats sistemes d'energia solar a baixa temperatura els quals es caracteritzen per emprar com a element receptor d'energia.

Elements d'un col·lector solar de placa plana

Per fer una bona elecció del tipus de col·lector s'han de conèixer les característiques dels elements que el constitueixen. Dita informació és útil per a poder avaluar la qualitat dels col·lectors i saber escollir el més adequat per la instal·lació a realitzar depenent de les condicions climatològiques a les que estarà sotmès; la finalitat de la instal·lació i al pressupost del que es disposa.

El col·lector de placa plana el componen quatre element principalment: la coberta transparent, la placa captadora, l'aïllant i la carcassa.

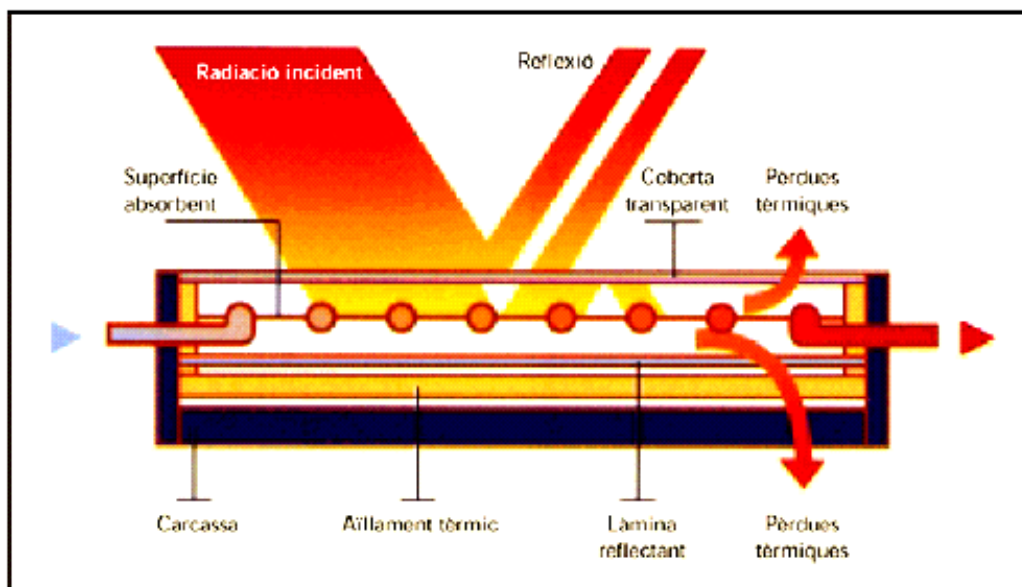


Figura 3.1 Esquema d'un col·lector solar de placa plana

3.1. Coberta transparent:

És l'encarregada de produir l'efecte invernader, reduir les pèrdues per convecció i assegurar l'estanqueïtat del col·lector a l'aigua i a l'aire en unió amb la carcassa i les juntes.

L'efecte invernader aconseguit per la coberta consisteix en que una part de la radiació que ha traspassat la coberta i arriba a la placa captadora, és reflexada cap a la coberta transparent amb una longitud d'ona per a la qual aquesta és opaca, amb el que s'aconsegueix retenir la radiació a l'interior. Aquest efecte ens defineix les característiques de la coberta:

Part I Introducció a l'energia solar

- Alt coeficient de transmissió de la radiació solar en la banda de 0.3 a 3 μm , el qual ha de conservar-se al llarg dels anys.
- Baix coeficient de transmissió per a les ones amb longitud alta, superior a 3 μm .
- Baix coeficient de conductivitat tèrmica, que dificulti el pas de calor des de la superfície inferior cap a l'exterior, minimitzant així les pèrdues.
- Degut a la característica anterior la cara interior de la coberta estarà més calenta que l'exterior, i per tant es dilatarà més, existint el risc de ruptura o deformació, pel qual la coberta transparent ha de tenir un coeficient de dilatació petit.
- Alt coeficient de reflexió per la longitud d'ona alta de la radiació emesa per la placa captadora, perquè aquesta retorni a la placa.

Es pot emprar una doble coberta o augmentar l'espessor de la coberta transparent per tractar de minimitzar les pèrdues per convecció, però aquestes solucions augmenten les pèrdues per absorció del flux solar incident. En general es pot dir que la doble coberta és més interessant quan més baixa sigui la temperatura exterior i més fort sigui el vent.

Els principals materials utilitzats són:

- Vidre: són transparents a la radiació d'ona inferior a 3 μm i opacs a les radiacions superiors. Existeixen nombroses varietats de vidre que es distingeixen per la seva composició química, les seves característiques mecàniques i òptiques. S'han d'escollir el vidres recuits o temperats, ja que milloren les seves propietats mecàniques sense alterar les òptiques.
- Materials plàstics: Es presenten amb la forma de pel·lícules flexibles d'algunes dècimes de mil·límetres d'espessor, o de placa rígida d'alguns mil·límetres. Les seves característiques principals són: baixa densitat, mala conductivitat tèrmica, coeficient de dilatació lineal important, mala resistència a temperatures elevades, i pateixen deteriorament físic i inestabilitat química sota l'acció dels elements exteriors.

Tractaments especials de la coberta:

- Tractament anti-reflexant sobre la superfície exterior per a disminuir les pèrdues per reflexió dels raigs solars incidents.
- Tractament sobre la superfície interior per a que reflexi les radiacions de gran longitud d'ona i no impedeixi el pas de la radiació de longitud curta.

El problema d'aquests tractaments és l'encariment dels col·lectors solars.

3.2. Placa captadora:

Té per missió absorbir de la manera més eficient possible la radiació solar i transformar-la en energia tèrmica utilitzables mitjançant la seva transferència al fluid caloportador.

Existeixen diferent models, essent els més usuals:

- Dues plaques metàl·liques separades uns mil·límetres entre les quals circula el fluid caloportador.
- Placa metàl·lica sobre la qual estan soldats o embotits els tubs pels quals circula el fluid caloportador. En lloc d'una placa metàl·lica es pot dotar d'unes aletes d'alumini als tubs de coure.

Part I Introducció a l'energia solar

- Dues làmines de metall unides a gran pressió excepte en els llocs que formen el circuit del fluid caloportador, els quals han estat abombades mitjançant insuflació d'aire.
- Plaques de plàstics, usades exclusivament en climatització de piscines.

La cara de la placa captadora que s'exposa al Sol he d'estar protegida dels raigs solars per mitjà de:

- Pintura de color negre o fosc que absorbeix la radiació solar. Presenta l'inconvenient de tenir un coeficient d'emissió sensiblement igual al d'absorció, pel que no és recomanable per altes temperatures.
- Superfícies selectives. Posseeix un coeficient d'absorció de radiació solar alt i un baix coeficient d'emissió. No existeixen materials simples que tinguin aquesta propietat, per això s'aconsegueix mitjançant superposició de capes o tractaments especial de la superfície.

Característiques de la placa captadora:

- Tractaments de la superfície: Les pintures són més econòmiques que els tractaments selectius però s'espantllen abans.
- Pèrdues de càrrega: Si la instal·lació ha de funcionar per mitjà de termosifó aquestes no poden ser superiors a 3 mm de columna d'aigua per 1 m² de col·lector, per a que la circulació sigui l'adequada i no es produeixin grans salts tèrmics.
- Corrosió interna: No es pot mesclar coure i acre, per evitar la corrosió d'aquest últim.
- Inèrcia tèrmica de la placa captadora: Quantitat de calor necessària per elevar la temperatura de la placa i del fluid caloportador en un temps determinat. La inèrcia tèrmica depèn per tant del volum de fluid que pugui contenir, pel que interessa reduir-lo al mínim per a millorar el funcionament del pannell.
- Homogeneïtat de la circulació del fluid caloportador per la placa, amb la finalitat que el fluid tingui un repartiment de temperatures equilibrat. Això és vital pels pannells amb doble capa, en els que el disseny del circuit del fluid és d'elevada importància pel rendiment del pannell.
- Transmissió de el calor: En els pannells amb doble placa la transmissió de calor és directa, no ocorrent el mateix pels que posseeixen els tubs soldats o embotits. En aquests últim cas la transferència de calor dependrà de: la separació, diàmetre i espessor dels tubs; el rendiment i règim del líquid; i de la bona execució de les soldadures o dels acoblaments a pressió.
- Entrades i sortides del fluid en la placa: Procurar que les pèrdues de càrrega en aquests llocs sigui baixes i que les soldadures no estiguin forçades per impedir possibles fugues.
- Ponts tèrmics: Cellar bé les entrades i sortides per evitar pèrdues importants degut a la creació de ponts tèrmics entre la placa i els elements no aïllats.
- Resistència a la pressió: ha de ser capaç de suportar la pressió de la red. En cas que es pannells s'instal·lin amb un circuit primari aïllat de la red s'ha de preveure un augment de pressió degut a:
 - L'espontània connexió de la placa a la red, degut a la pèrdua de càrrega.
 - L'obstrucció del circuit primari degut a incrustacions o per taps de gel.

Part I Introducció a l'energia solar

Pel que s'ha de dotar a la instal·lació dels elements necessaris que evitin la producció de sobrepressions.

3.3. Aïllament:

La placa captadora està protegida en la seva part posterior i lateral per mitjà d'un aïllament per evitar pèrdues tèrmiques cap a l'exterior.

Les característiques d'aquests aïllants ha de ser:

- Resistir altes temperatures sense deteriorar-se, molts cops s'aconsegueix col·locant entre la placa i l'aïllant una capa reflectant, que impedeixi que l'aïllant rebi directament la radiació.
- Desprendre pocs vapors al descomposar-se per el calor i en cas d'ocórrer que no s'adhereixi a la coberta.
- No degradar-se per l'envelliment o altres fenòmens a la temperatura habitual de treball.
- Suportar la humitat que es pot produir en l'interior dels panells sense perdre les seves qualitats.

Els materials més utilitzats són la fibra de vidre, l'escuma rígida de poliuretà i el poliestirè expandit.

Qualsevol que sigui el material escollit ha de tenir un coeficient de dilatació compatible amb el dels altres components del pannel solar.

3.4. Carcassa:

És l'encarregada de protegir i suportar els elements que constitueixen el col·lector solar, a més de servir d'enllaç amb l'edifici per mitjà dels suports.

Ha de complir els següents requisits:

- Rigidesa i resistència estructural que asseguri l'estabilitat. És de suma importància ja que ha de resistir la pressió del vent .
- Resistència dels elements de fixació: mecànica pels esforços a transmetre i químic per suportar la corrosió.
- Resistència a l'intempèrie: Als efectes corrosius de l'atmosfera i a la inestabilitat química deguda a les inclemències del temps.
- Aireació de l'interior del col·lector per evitar la condensació de l'aigua en l'interior del col·lector. Es realitza per mitjà de dues tècniques:
 - Buit a l'interior del col·lector quan aquest està fred, per a que la carcassa no estigui sotmesa a una pressió molt alta quan l'aire interior s'esclafa.
 - Practicar uns orificis a la carcassa per permetre l'aireació del col·lector així com l'evacuació de la condensació. Els orificis es localitzen a la part posterior per evitar l'entrada de l'aigua de pluja i la pèrdua d'aire calent de l'interior del col·lector.
- Evitar tota geometria que permeti l'acumulació d'aigua gel o neu en l'exterior del col·lector.

Part I Introducció a l'energia solar

- Facilitar el desmuntatge de la coberta per poder tenir fàcil accés a la placa captadora.

Funcionament:

Si s'exposa un col·lector al Sol sense circulació de fluid en el seu interior, la temperatura de la placa captadora o absorbidora anirà augmentant progressivament.

Dita placa anirà emmagatzemant el calor al mateix temps que tindrà unes pèrdues degudes als fenòmens de conducció, convecció i radiació, les quals augment amb la temperatura.

Arriba un moment en que les pèrdues s'equiparen a l'energia que rep la placa del Sol i la temperatura s'estabilitza arribant a la denominada temperatura d'equilibri estàtica, que depèn de les condicions exteriors a les que estigui sotmesa la placa (com més fred sigui l'ambient i més vent faci més baixa serà aquesta).

Si ara es fa circular un fluid pel col·lector, aquest rep el calor de la placa captadora i anirà augmentant la temperatura, pel contrari la temperatura de la placa disminuirà.

Mantenint la circulació del fluid estacionari o constant, arribarà un moment en que s'arribi a una nova temperatura d'equilibri dinàmica, la qual és sempre inferior a l'estàtica.

La màxima temperatura que un col·lector instal·lat pot arribar és la temperatura d'equilibri estàtica, que és necessària conèixer per dues raons:

- Serà la temperatura que instal·lació solar arribarà quan estigui parada.
- La temperatura màxima teòrica d'utilització serà sempre inferior a la temperatura d'equilibri estàtic.

4. Acumuladors de calor

Com que no hi ha concentració, els panells solars poden produir energia inclòs quan hi hagi núvols o l'energia solar resulti difusa, ja que l'energia solar existeix tots els dies més o menys intensa.

Per altre banda tenim que la calefacció de locals i l'aigua calenta sanitària necessiten un nivell baix d'energia; com a conseqüent els problemes d'emmagatzematge són lleus.

- Emmagatzament diari: Són indispensables inclòs quan es preveu un ajut de calefacció en forma d'energia elèctrica o combustible fòssil. Si són limitades les inversions corresponents són raonables. Representa als volts de 16 hores de funcionament a plena potència, el que equival a una superfície de captació igual a 3 vegades la superfície estrictament necessària per al funcionament immediat i continu dels panells.
- Emmagatzament estacional: Per a calefacció i aigua calenta sanitària mitjançant panells solars és sempre discutible. La solució depèn del clima, disponibilitat a altres fonts d'energia i altres paràmetres.

Part I Introducció a l'energia solar

Característiques dels acumuladors de calor

Els panells solars subministren directament l'energia en forma tèrmica, aquesta constitueix la forma més immediata i simple d'emmagatzament, que elimina els problemes de conversió.

D'aquesta manera resulta possible utilitzar les dues formes de calor: calor latent i calor sensible.

La utilització de la calor latent presenta evidents avantatges sobre l'ús exclusiu de la calor sensible:

- La introducció i l'extracció del calor s'efectuen pràcticament a la mateixa temperatura. El que permet un rendiment termodinàmic i capacitat de producció constants.
- La capacitat d'emmagatzament per unitat de pes i sobretot de volum pot ser netament superior.

En la instal·lació que ens pertoca tindrem en compte un emmagatzament diari per a poder gaudir de calefacció i aigua calenta encara que el cel estic ennuvolat, sempre tenint en compte que durant l'hivern la calefacció i l'aigua calenta es necessiten durant les hores de foscor que sol ésser des de les cinc de la tarda, en ple hivern (utilitzem l'hivern perquè és l'estació que més es necessita la instal·lació), fins als voltants de les onze de la nit, que és quan se sol apagar la calefacció, segons els afectats. Per tant en l'estudi partirem d'un augment de l'emmagatzament d'aproximadament 16 hores de funcionament a plena potència. No tindrem en compte un emmagatzament estacional perquè resultaria molt costós i amb un rendiment molt baix.

L'acumulador hauria de presentar les característiques següents:

- Tenir una capa aïllant tèrmica que presenti un coeficient global de pas de calor molt baix.
- Permetre disposar del mateix acumulador per a calefacció i aigua calenta. L'aigua calenta s'escalfaria amb contacte indirecte ("al bany maria") amb l'aigua per a la calefacció.
- Tenir una o més entrades d'aigua de la red a la part superior del dipòsit, on hi hauria d'haver l'acumulador d'aigua calenta sanitària.
- L'entrada d'aigua freda per a la calefacció hauria d'entrar per la part inferior de l'intercanviador.
- Tenir un intercanviador que permeti obtenir unes temperatures de sortida d'aigua calenta sanitària entre 45 i 60 °C.

5. Intercanviadors de calor

- Existeixen una gran varietat d'equips de transferència de calor o intercanviadors de calor. Dins l'amplia gamma existent podríem establir els següents tipus generals d'acord amb la forma constructiva.
- Intercanviadors multitubulars.
- Intercanviadors tubulars.
- Intercanviadors de plaques paral·leles.
- Escalfament extern
- Equips de transferència de calor per contacte directe.
- Transferència de calor entre superfícies exteses.
- Equips especials.

5.1. Intercanviadors multitubulars

La gran avantatge d'aquest tipus d'equips és la seva gran versatilitat, emprant diferent: longitud de tubs, número de tubs en sèrie, número de tubs en paral·lel, diàmetre de tubs, modificació del flux extern. En resum, la calor canviada i la pèrdua de càrrega pot acomodar-se fàcilment a les necessitats bàsiques del procés.

Existeixen dos tipus fonamentals d'intercanviadors multitubulars:

5.1.1. Intercanviadors de carcassa i tubs

La seva versatilitat és elevada, i molts dels problemes que es presenten en transferència de calor poden resoldre's amb ells molt millor que amb qualsevol altre equip.

Existeixen una sèrie de consideracions que haurà de tenir en compte el dissenyador:

- a. Els coeficients globals de transferència de calor són freqüentment més baixos que en els altres tipus d'equips i com a conseqüència la superfície de transmissió necessària serà major.

El fluid que circula pels tubs pot circular en un sol pas (contracorrent pura) o varis (sempre en número parell). En aquest últim cas l'eficiència baixaria al haver-se de multiplicar la diferència de temperatura per un número menor a la unitat. Variant el número de passos pel tubs, diàmetre i longitud del mateix es pot arribar a obtenir el màxim coeficient de pel·lícula compatible amb la pèrdua de càrrega màxima permesa pel procés, amb les úniques limitacions de màxima longitud i mínim diàmetre.

Part I Introducció a l'energia solar

- b. Els intercanviadors de carcassa i tubs poden dissenyar-se amb plaques tubulars fixes, cap flotant i tubs en "U".
- c. Per a fluids molt viscosos o gasos per la carcassa, solen emprar-se actualment tubs amb aletes exteriors del tipus "LOW-FINS". Amb això s'aconsegueix una considerable reducció de les dimensions de l'intercanviador.

5.1.2. Intercanviadors de tubs en espiral

- a. Un primer tipus consisteix en un o més serpentins enrotllats en espiral, tancants en una envoltent. És adequat per l'escalfament o refredament de fluids viscosos quant la quantitat de calor a transferir no sigui molt elevada. Presenta l'avantatge de que la seva expansió tèrmica diferencial s'acomoda ràpidament. El seu principal inconvenient, és l'impossibilitat de netejar interiorment els tubs. El seu treball està limitat per superfícies de l'ordre de 350 ft² màxim i pressions de l'ordre de 40 kg/cm².
- b. En segon tipus, consisteix en serpentins enrotllats en espiral a l'interior d'una columna. Pot emprar-se per escalfar líquids. Les mides solen ésser des d'1 a 1000 ft², el límit de pressió és fins a 17 atm.
- c. Existeix un tercer tipus que cobreix la possibilitat de molta més superfície. consisteix en una complexa disposició de serpentins dins d'una carcassa comú. Han estat desenvolupats especialment per grans superfícies en serveis criogènics fora de la gamma coberta pels intercanviadors del tipus "plate-fin". S'han construït alguns de fins a 150.000 ft² de superfície.

5.2. Intercanviadors tubulars

Aquests tipus d'equip no és molt freqüent, no obstant quant es requereixen superfícies petites de transferència de calor o en certs processos, el seu us és molt convenient. Es distingeixen tres tipus fonamentals:

5.2.1. Intercanviadors de doble tub

Consisteix en un tub (recte o en "U") pel que circula un dels fluids i un altre de concèntric amb l'anterior pel que circula l'altre fluid. La transferència de calor s'efectua en contracorrent pura. Poden disposar de varis d'aquests elements en sèrie o serie-paral·lel. Per a superfícies petites resulta un equip econòmic.

5.2.2. Refredadors de trombó

Part I Introducció a l'energia solar

Consisteixen en varis tubs en "U" connectats en sèrie i un sobre l'altre. L'aigua cau des de sobre per un col·lector convenientment foradat i recollint-se en un col·lector inferior. Els coeficients de transferència de calor són inferiors als que s'obtenen en el doble tub, no obstant la seva construcció és més econòmica.

5.2.3. Serpents en recipients

S'empren freqüentment per l'escalfament per l'escalfament de líquids emmagatzemats o l'escalfament del líquid de fons en columnes de destil·lació. Consisteixen en un tub disposat de forma variable (en espiral o en "U") introduït en el tanc i pel qual circula el fluid caloportador. El tub pot ésser llis o amb aletes. La transferència de calor al líquid emmagatzemat es realitza per convecció lliure.

5.3. Intercanviadors de plaques paral·leles

Els intercanviadors de plaques paral·leles s'empren en ocasions com alternativa als de carcassa i tubs. Generalment s'obtenen coeficients globals de pas de calor superiors als de carcassa i tubs. La seva principal limitació és la pressió i temperatura màxima d'operació. La seva principal avantatge és la facilitat de neteja. Se'n distingeixen dos tipus fonamentals:

5.3.1. Intercanviadors de plaques rectes

És l'equip conegut com a intercanviador de plaques. Consisteix en un conjunt de plaques rectes paral·leles acoblades les unes amb les altres mitjançant juntes generalment de materials elastòmers. Les plaques porten uns canals estampats, que serveixen per comunicar una major turbulència al fluid. Tot el conjunt està unit mitjançant un bastidor. La pressió d'exercici està limitada entre 4 i 16 atmosferes, en casos excepcionals podria arribar fins a 21 atmosferes.

La temperatura de treball està limitada pel material de les juntes. Per sota de 130 °C existeix una gran quantitat d'elastòmers que poden resistir-la. Per a temperatures superiors, el cost de les juntes pot ésser suficientment elevat com per a justificar l'ús d'un altre equip.

La principal avantatge d'aquests equips és la seva facilitat per desmuntar-lo, permetent així la seva neteja. Com a conseqüència dels seu fàcil desmuntatge, poden afegir-se-li amb facilitat més plaques augmentant així la superfície de transferència de calor per a una possible ampliació del servei.

La vida útil de les juntes és limitada. Els dos enemics principals dels elastòmers són la temperatura i els dissolvents. Quant la temperatura és moderada es preveuen uns tres anys de vida o potser més si els fluids no són dissolvents. És desitjable, en ordre

Part I Introducció a l'energia solar

de facilitar el manteniment, restringir els tipus de juntes al menor número possible preferentment a un tipus per cada tipus de placa emprada i a ésser possible emprar per a totes les plaques el mateix tipus de juntes.

5.3.2. Intercanviador de plaques en espiral

Consisteix en dues plaques enrotllades conjuntament, amb monyons soldats a elles per preveure un espaiat uniforme. El mitjà d'escalfament flueix normalment del centre a la perifèria i el de refredament en sentit invers.

Es construeixen en l'actualitat equips d'aquest tipus, de fins a 1500 ft². Les pressions d'operació estan limitades a 10 kg/cm² com a màxim. Els límits de temperatura són superiors als equips de plaques rectes, poden arribar fins als 400 °C. Els coeficients globals de pas de calor són inferiors als que s'obtenen en els equips de plaques rectes.

5.4. Escalfament extern

L'aportació de calor a través de les parets d'un recipient o una canonada és un problema que es presenta freqüentment al efectuar un disseny bàsic de procés.

Existeixen dos tipus bàsics de solucions:

5.4.1. Superfícies integrals

La superfície de transferència és una part integral del procés principal de la planta. L'exemple més significatiu d'aquest tipus de solució, és el d'un recipient o canonada "enchaquetados". A través de dit "enchaquetamiento" s'injecta vapor que escalfa el fluid del procés. Una altra possible solució seria l'ús d'un mitjà serpenti.

5.4.2. Superfícies no integrals

La superfície de transferència no es part integrals del procés principal de la planta.

L'exemple més significatiu és el traçat de canonades amb vapor o amb resistències elèctriques. Mitjançant aquest sistema no es poden transmetre altes quantitats de calor. És una solució més cara que l'anterior.

5.5. Equips de transferència de calor per contacte directe.

La transferència de calor sense superfície de contacte ofereix potencialment una considerable economia degut a l'absència del cost de la superfície de transferència de calor. Els equips emprats més freqüents són:

Part I Introducció a l'energia solar

5.5.1. Torres de refredament

Consisteix en una estructura metàl·lica o de formigó on en els seu interior existeix un replè de plàstic en forma de graelles o plaques ondulades.

S'usa per refredar l'aigua que anteriorment ha estat utilitzada per refredar un fluid del procés. Aquesta aigua entra a la torre per la part superior distribuint-se en la mateixa mitjançant canals o canonades de distribució.

L'aigua cau al replè després de xocar amb uns platets de soldadura. En sentit contrari a la direcció de l'aigua flueix l'aire aspirat (tir induït) o impulsat per ventiladors (tir forçat). Per torres de major mida es dissenyen torres de tir creuat, en que l'aire entra lateralment a la torre.

Durant el procés de refredament de l'aigua, part d'aquesta es perd per evaporació i arrossegament ($\approx 2\%$), pel que la reposició d'aquesta aigua perduda ha de resultar un factor més per l'avaluació del cost.

Actualment, per capacitats de refredament molt elevades (centrals tèrmiques i nuclears) s'empren torres de secció hiperbòlica de gran altura i sense ventiladors (tir natural).

5.5.2. Escalfadors d'injecció

Hi ha un gran nombre d'ocasions en que l'escalfament del fluid del procés pot fer-se mitjançant la injecció directa de vapor d'aigua. Dit vapor d'aigua es condensa en presència del fluid del procés comunicant-li calor. Com és lògic suposar, el condensat és irrecuperable.

5.6. Transferència de calor entre superfícies esteses

Molt freqüentment es solen emprar les superfícies esteses (aletes) com a mitjà d'incrementar la transferència de calor. Generalment aquestes aletes es situen a l'exterior de tubs, mentre que a l'interior, la superfície roman inalterable. És lògic suposar per tant, que les aletes tindran un efecte significatiu quan el coeficient de pas de calor del costat al que estan unides sigui bastant inferior als del altre costat ja que l'eficiència de l'aleta decreix que s'incrementa el coeficient de pas de calor entre aleta i fluid.

Els casos més significatius són:

5.6.1. Aerorrefrigerants

Amb el nom d'aerorrefrigerants s'entenen aquells equips en els que el fluid del procés es refreda o condensa a l'interior de tubs i emprant com fluid refrigerant l'aire.

Part I Introducció a l'energia solar

Els tubs estan aletats i disposats en forma parel·lela. L'aire circula per l'exterior dels tubs en flux creuat impulsat (tir forçat) o aspirat (tir induït) per ventiladors.

5.6.2. Tubs amb aletes "low fins"

Més que un nou tipus d'equips, és l'ús d'aquests tipus de tubs en els intercanviadors de carcassa i tubs i inclòs en aerorrefrigerants.

Aquests tipus de tubs es poden utilitzar quant el coeficient de pas de calor a l'exterior dels tubs és considerablement inferior a l'interior.

5.6.3. Escalfadors de tancs

Molts fluids emmagatzemats en tancs, requereixen romandre a una certa temperatura.

És necessari preveure l'addició constant de calor per compensar les pèrdues a través de les parets del tanc. Aquests serpentins estan formats per una sèrie de tubs en "U" proveïts d'aletes longitudinals. Com a fluid d'escalfament pot emprar-se: vapor d'aigua, oli calent, aigua calenta, etc.

5.6.4. Intercanviadors de plaques aletades

S'empen fonamentalment en serveis criogènics o construïts generalment en alumini.

Consisteixen en un conjunt de canals formats per plaques paral·leles. Els fluids circulen per canals contigus. Amb l'objectiu d'incrementar la turbulència, de cada fluid, els canals posseeixen unes corrugacions ondulades i perforades que uneixen dues plaques contigües entre si.

5.7. Equips especials.

Al marge de tot l'indicat anteriorment, existeixen equips que per les peculiars característiques del fluid que empen exigeixen o permeten l'ús de materials especials, així podem parlar d'intercanviadors construïts amb grafit per àcid sulfúric per exemple, o intercanviadors construïts amb plàstic.