

*Procediment d'aplicació de
l'Ordenança Solar de Barcelona*

*Mètode de càlcul energètic
utilitzat al software*

Càlcul OST

1. Presentació

L'estimació de la producció energètica d'una instal·lació d'escalfament d'aigua amb energia solar és un procés en el qual intervenen múltiples factors.

Algunes d'aquestes variables defineixen les condicions meteorològiques de l'emplaçament (temperatures, radiació solar, ...), altres depenen de les necessitats energètiques de l'edifici (quantitat d'aigua consumida, perfil temporal del consum, temperatures de partida de l'aigua, temperatura desitjada de l'aigua calenta,...) i, finalment, altres consisteixen en la definició de la pròpia instal·lació (característiques dels materials utilitzats, cabals de circulació, tipus de regulació, esquema hidràulic,...)

Alguns autors i organismes han desenvolupat mètodes de càlcul simplificats que permeten estimar la producció energètica d'una instal·lació solar a partir d'un nombre molt reduït de variables.

El mètode **f-Chartés**, amb diferència, el mètode simplificat més conegut i emprat pel disseny d'instal·lacions solars.

Aquest mètode és el que utilitza el software CALCUL OST per calcular la superfície de captació i la contribució solar de les instal·lacions solars tèrmiques, d'acord amb les dades introduïdes per l'usuari.

El software s'ajusta a les indicacions de la *Modificació integral de l'Annex sobre captació solar tèrmica de l'Ordenança General de Medi Ambient Urbà* de la ciutat de Barcelona, (en endavant, *Ordenança Solar*), aprovada el 24 de febrer de 2006 i publicada al BOP de data 14 de març de 2006. Aquesta és la raó per la qual tots els paràmetres ambientals, les fraccions exigides, els paràmetres per al càlcul de la demanda, els valors que estableixen les polítiques d'exempcions i, en general, totes les dades utilitzades en el software CALCUL OST, són les recollides a l'esmentada Ordenança Solar de Barcelona.

En les pàgines següents es descriuen les operacions i les fonts de les dades utilitzades pel software, que no són altres que el mètode f-chart amb les correccions que explicarem i els paràmetres especificats a l'Ordenança Solar de Barcelona.

2. El càlcul de la demanda energètica de l'edifici

A l'apartat "Dades de la demanda", aquesta es calcula segons el tipus d'utilització de l'aigua.

2.1. Aigua calenta sanitària

Per a establir la demanda energètica per a Aigua Calenta Sanitària (ACS) es parteix del consum estimat d'aigua calenta en litres. Per tal de facilitar el càlcul, l'usuari no introdueix en el programa la demanda en termes d'energia sinó només les característiques d'ús de l'edifici. Els valors que ha d'introduir l'usuari poden ser: habitacions, persones, serveis, llits... depenent del tipus d'edifici.

Aquests valors determinaran una demanda basada en el consum d'ACS expressada en litres d'aigua a la temperatura de referència, que l'Ordenança Solar estableix en 60 °C. El consum d'ACS es calcula multiplicant la dada introduïda per l'usuari pel consum unitari especificat a l'ordenança per a cada cas.

Tipus d'ús	Consum unitari
Habitatges unifamiliars	30 l/persona i dia
Habitatges plurifamiliars	22 l/persona i dia
Hospitals i clíniques	55 l/llit i dia
Hotels ****	70 l/ llit i dia
Hotels ***	55 l/llit i dia
Hotels **	40 l/llit i dia
Hostals i pensions	35 l/llit i dia
Càmpings	40 l/emplaçament i dia
Residències geriàtriques	55 l/persona i dia
Vestuaris / Dutxes col·lectives	15 l/servei i dia
Escoles	3 l/alumne i dia
Casernes	20/persona i dia
Fàbriques i tallers	15/persona i dia
Oficines	3 l/persona i dia
Gimnasos	20 l/usuari i dia
Bugaderies	3 l/quilos roba i dia
Restaurants	5 l/àpat i dia
Cafeteries	1 l/dinar i dia

Així $Qd_i = Dades_i \cdot Consum_unitari_i$ (equació 1)

on

Qd_i és el consum diari d'ACS a la temperatura de referència (60 °C) per al tipus d'ús i . Les seves unitats són litres/dia

$Dades$ són les dades sol·licitades pel software per calcular la demanda per al tipus d'ús i . Les unitats són diferents segons el tipus d'us (persones, llits, emplaçaments, serveis, alumnes, usuaris, quilos de roba, àpats o dinars)

$Consum_unitari$ és el paràmetre que determina la quantitat d'aigua diària necessària per a cada unitat de les dades anteriors, segons el tipus d'ús. Es mesura en: litres/persona i dia, litres/llit i dia, litres/emplaçament i dia, litres/servei i dia, litres/alumne i dia, litres/usuari i dia, litres/quilo de roba i dia, litres/àpat i dia i, finalment, litres/dinar i dia.

i És el tipus d'ús. Pot ser habitatge unifamiliar, habitatge plurifamiliar, hospitals i clíniques, hotels ****,...

Cal tenir present que en el cas dels habitatges unifamiliars i plurifamiliars, la dada introduïda per l'usuari és el nombre d'habitacions. El software fa la conversió automàtica del nombre d'habitacions en persones que viuen a l'habitatge, d'acord amb les indicacions del punt 1.4 de l'Annex de l'Ordenança Solar:

Estudi o habitatge d'1 dormitori	1,5 persones
Habitatge de 2 dormitoris	3 persones
Habitatge de 3 dormitoris	4 persones
Habitatge de 4 dormitoris	6 persones
Habitatge de 5 dormitoris	7 persones
Habitatge de 6 dormitoris	8 persones
Habitatge de 7 dormitoris	9 persones

A partir de 8 dormitoris, les necessitats en valoraran com si es tractessin d'hostals.

En el cas dels locals ubicats en edificis d'habitatges plurifamiliars, l'ús dels quals es desconeixi, la dada introduïda per l'usuari és la superfície dels locals, expressat en m².

La demanda energètica diària en kWh d'aquests locals es calcula de la següent manera:

$$DE_i = 0,07.S_i \quad (\text{equació 2})$$

on

DE_i és la demanda d'energia diària corresponent a l'ACS consumida pels locals. Les seves unitats són kWh/dia

0,07 és la demanda energètica associada al consum d'ACS assignada a cada m² de local, segons el punt 1.2 de l'Annex de l'Ordenança Solar. Les seves unitats són kWh/m² i dia.

S_i és la superfície del local expressada en m².

Aquest càlcul és equivalent a considerar un consum d'ACS a una temperatura de 60°C de 1.378 l/dia per cada m² de local.

L'equació 2 es pot escriure en termes de demanda d'ACS per a locals com:

$$Q_i = 1,378.S_i \quad (\text{equació 2 bis})$$

on

Q_i és la demanda d'ACS a una temperatura de referència de 60°C dels locals. Les seves unitats són litres/dia.

1,378 és el consum d'ACS que l'Ordenança Solar assigna a cada m² de local d'ús no definit. Les seves unitats són l/(m².dia)

S_i és la superfície del local expressada en m².

El consum total diari d'ACS es calcula sumant els consums de cada tipus d'ús, inclosa la demanda dels locals l'ús dels quals es desconeix a priori. Així,

$$Q_{td} = \sum_i Qd_i \quad (\text{equació 3})$$

on

Q_{td} és el consum total diari d'ACS de l'edifici a la temperatura de referència (60°C). Les seves unitats són litres/dia

Qd_i és el consum diari d'ACS a la temperatura de referència (60 °C) per al tipus d'ús i . Les seves unitats són litres/dia

i És el tipus d'ús. Pot ser habitatge unifamiliar, habitatge plurifamiliar (inclosos els locals), hospitals i clíniques, hotels ****, ...

Com ja es veurà a l'apartat 2.4, el resultat obtingut amb aquesta equació és el que permet determinar el valor de la contribució solar mínima per a l'ACS.

Ara el software calcula la demanda mensual d'ACS a 60 °C per a cada mes de l'any, multiplicant la demanda diària pels dies de cada mes. Prèviament, s'ha

descomptat la demanda diària en l/dia corresponent als locals, valor que s'afegirà posteriorment quan es calculi la demanda mensual d'ACS en termes d'energia.

$$Qm_i = Qtd \cdot dies_i \quad (\text{equació 4})$$

on

Qm_i és el consum mensual d'ACS (sense locals) a la temperatura de referència (60°C) corresponent al mes i . Les seves unitats són litres/mes

Qd és el consum diari d'ACS (sense locals) a la temperatura de referència (60 °C). Les seves unitats són litres/dia

$dies_i$ és el nombre de dies del més i . Pot ser 28, 30 o 31, depenent del mes.

A continuació, el software calcula l'energia necessària per a escalfar la quantitat d'aigua calculada anteriorment Qm_i des de la temperatura de l'aigua de la xarxa fins a la temperatura de referència de 60 °C. A tal efecte, s'utilitzen els valors de temperatura de l'aigua freda de xarxa, indicades al punt 1.8 de l'Annex de l'Ordenança Solar.

Mes	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre	Annual
T_{AF} [°C]	10,27	10,72	12,39	14,15	16,63	19,39	20,91	22,44	21,53	19,07	14,95	11,7	16,18

Taula 1

La fórmula utilitzada és:

$$DE_{mes_i} = Qm_i \cdot (T_{ACS} - T_{AF_i}) \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} + 0,07 \cdot S_i \cdot dies_i \quad (\text{equació 5})$$

on

DE_{mes_i} és la demanda energètica mensual per escalfar l'aigua des de la temperatura de la xarxa fins a la temperatura de referència de 60°C per al mes i . Les seves unitats són kWh/mes.

Qm_i és el consum mensual d'ACS a la temperatura de referència (60°C) corresponent al mes i . Les seves unitats són litres/mes

T_{ACS} és la temperatura de referència de l'ACS (60°C).

T_{AF_i}	és la temperatura d'aigua freda de xarxa per al mes i . Les seves unitats són °C. Els seus valors per a la ciutat de Barcelona són els que es recullen a la taula 1.
$1,16 \cdot 10^{-3}$	és un factor de conversió expressat en kWh/kcal
$0,07 \cdot S_i$	és la demanda d'energia diària necessària corresponent a l'ACS consumida pels locals. Les seves unitats són kWh/dia (veure equació 2)
$dies_i$	és el nombre de dies del mes i . Pot ser 28, 30 o 31, segons el mes

2.2. Aigua calenta per a piscines i usos industrials

Per a aquestes instal·lacions, el software requereix que s'introdueixi la demanda energètica mensual expressada en kWh/mes. El càlcul d'aquests valors correspon al projectista.

2.3. Energia total anual requerida

En aquest punt ja es pot calcular la demanda total anual d'energia requerida. Aquesta energia és la suma de les energies calculades per a cada utilització.

$$DE_{ta} = DE_{tACS} + DE_{tpc} + DE_{tpd} + DE_{tui} \quad (\text{equació 6})$$

on

DE_{ta}	és l'energia total anual requerida. Les unitats són kWh/any.
DE_{tACS}	és l'energia total anual necessària per a la producció d'ACS. S'obté sumant els 12 valors de demanda mensual, calculats a partir de l'equació 5. Es mesura en kWh/any.
DE_{tpc}	és l'energia total anual necessària per escalfar l'aigua de les piscines cobertes climatitzades. S'obté sumant les demandes energètiques derivades de l'escalfament de l'aigua del vas de les piscines cobertes de l'edifici corresponents als 12 mesos de l'any.. Es mesura en kWh/any.
DE_{tpd}	és l'energia total anual necessària per escalfar l'aigua de les piscines descobertes climatitzades. S'obté sumant les demandes energètiques derivades de l'escalfament de l'aigua del vas de les piscines descobertes de l'edifici corresponents als 12 mesos de l'any. Es mesura en kWh/any.

DE_{tui} és l'energia total anual necessària per escalfar l'aigua d'usos industrials. S'obté sumant la demanda energètica derivada dels usos industrials corresponent als 12 mesos de l'any. Es mesura en kWh/any.

Aquesta demanda energètica total anual es cobrirà en part a través de la instal·lació solar tèrmica i en part a través de l'energia de suport.

2.4. Contribució solar total mínima requerida

Cal determinar la contribució solar de cada d'utilització d'aigua. Per a les utilitzacions corresponents a piscines cobertes, piscines descobertes i usos industrials, la contribució solar indicada a l'Ordenança Solar és fixa,

Contribució per a piscines cobertes	→	30%
Contribució per a piscines descobertes	→	100%
Contribució per a usos industrials	→	20%

La contribució solar mínima requerida per a l'ACS s'obté a partir del resultat de l'equació 3 i dels valors de les taules següents:

1) L'energia de suport és electricitat mitjançant efecte Joule

Demanda diària total d'ACS, en litres	Contribució solar mínima en %
0 – 1.000	60
1.000 – 2.000	63
2.000 - 3000	66
3.000 – 4.000	69
> 4.000	70

Taula 2

2) L'energia de suport és una altra

Demanda diària total d'ACS, en litres	Contribució solar mínima en %
0 – 10.000	60
10.000 – 12.500	65
> 12.500	70

Taula 3

Una vegada conegudes les contribucions solars mínimes corresponents a cada utilització d'aigua, es pot calcular l'energia solar anual requerida per a cadascuna d'elles.

$$E_{sACS} = f_{ACS} \cdot DE_{tACS} \quad (\text{equació 7})$$

on

E_{sACS} és l'energia solar anual requerida per a la producció d'ACS. Les seves unitats són kWh/any

f_{ACS} és la contribució solar per a ACS estipulada a l'Ordenança Solar d'acord amb les taules 2 i 3.

DE_{tACS} és l'energia total anual necessària per a l'obtenció d'ACS. S'obté sumant les demandes energètiques derivades de la producció d'ACS corresponents als 12 mesos de l'any. Es mesura en kWh/any.

$$E_{spc} = f_{pc} \cdot DE_{tpc} \quad (\text{equació 8})$$

on

E_{spc} és l'energia solar anual requerida per a l'escalfament d'aigua de piscines cobertes climatitzades. Les seves unitats són kWh/any

f_{pc} és la contribució solar per a l'escalfament d'aigua de piscines cobertes climatitzades que l'Ordenança Solar estableix en un 30%.

DE_{tpc} és l'energia total anual necessària per a l'escalfament d'aigua de piscines cobertes climatitzades. S'obté sumant les demandes energètiques derivades de l'escalfament de l'aigua de les piscines cobertes climatitzades de l'edifici corresponents als 12 mesos de l'any. Es mesura en kWh/any.

$$E_{spd} = f_{pd} \cdot DE_{tpd} \quad (\text{equació 9})$$

on

E_{spd} és l'energia solar anual requerida per a l'escalfament d'aigua de piscines descobertes climatitzades. Les seves unitats són kWh/any

f_{pd} és la contribució solar per a l'escalfament d'aigua de piscines descobertes climatitzades que l'Ordenança Solar estableix en un 100%.

DE_{tpd} és l'energia total anual necessària per a l'escalfament d'aigua de piscines descobertes climatitzades. S'obté sumant

les demandes energètiques derivades de l'escalfament de l'aigua de les piscines descobertes climatitzades de l'edifici corresponents als 12 mesos de l'any. Es mesura en kWh/any.

$$E_{sui} = f_{ui} \cdot DE_{tui} \quad (\text{equació 10})$$

on

E_{sui} és l'energia solar anual requerida per a l'escalfament d'aigua per a usos industrials. Les seves unitats són kWh/any.

f_{ui} és la contribució solar per a l'escalfament d'aigua per a usos industrials que l'Ordenança estableix en un 20%.

DE_{tui} és l'energia total anual necessària per a l'escalfament d'aigua per a usos industrials. S'obté sumant demandes energètiques derivades del consum d'aigua per a usos industrials corresponents als 12 mesos de l'any. Les seves unitats són kWh/any.

Conegudes aquestes dades, ja es pot calcular la contribució solar total mínima.

$$F = \frac{E_{st}}{DE_{ta}} = \frac{E_{sac} + E_{spc} + E_{spd} + E_{sui}}{DE_{ta}} \quad (\text{equació 11})$$

on

F és la contribució solar anual de l'edifici

E_{st} és l'energia solar total requerida, en kWh/any.

DE_{ta} és l'energia total anual requerida, en kWh/any.

E_{sACS} és l'energia solar anual requerida per a la producció d'ACS, en kWh/any

E_{spc} és l'energia solar anual requerida per a l'escalfament de l'aigua de les piscines cobertes, en kWh/any

E_{spd} és l'energia solar anual requerida per a l'escalfament de l'aigua de les piscines descobertes, en kWh/any

E_{sui} és l'energia solar anual requerida per a l'escalfament d'aigua per a usos industrials, en kWh/any

Les dades corresponents a la contribució solar total, l'energia total anual i l'energia solar anual total es poden consultar en la pantalla "Càlculs de la demanda" del software.

3. Radiació solar

Una vegada definides l'orientació i la inclinació dels captadors, el software calcula la radiació solar mensual incident sobre els captadors. L'energia incident en la superfície de captació és funció de la inclinació i l'orientació dels captadors solars i es determina a partir de les dades disponibles de radiació solar i la superfície de captació, en m².

L'Atlas de Radiació Solar de Catalunya inclou dades mensuals de radiació solar sobre superfícies amb diferents inclinacions o orientacions. Les taules corresponents a la ciutat de Barcelona són les que es reproduïxen a continuació (MJ/m² dia).

Orientació: 0°													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Anual
0°	6,80	9,65	13,88	18,54	22,25	24,03	23,37	20,42	16,05	11,40	7,73	6,04	15,04
5°	7,70	10,56	14,72	19,15	22,58	24,21	23,63	20,93	16,85	12,32	8,66	6,94	15,71
10°	8,56	11,41	15,47	19,67	22,78	24,25	23,74	21,31	17,54	13,17	9,55	7,80	16,29
15°	9,37	12,19	16,14	20,07	22,84	24,13	23,70	21,59	18,13	13,95	10,38	8,61	16,78
20°	10,12	12,90	16,70	20,35	22,76	23,87	23,52	21,76	18,61	14,63	11,15	9,37	17,17
25°	10,81	13,52	17,17	20,51	22,60	23,48	23,24	21,80	18,98	15,23	11,85	10,07	17,46
30°	11,43	14,07	17,52	20,54	22,32	23,02	22,86	21,71	19,23	15,73	12,47	10,71	17,65
35°	11,97	14,52	17,77	20,45	21,90	22,43	22,34	21,48	19,36	16,13	13,01	11,28	17,73
40°	12,44	14,88	17,91	20,23	21,35	21,70	21,69	21,12	19,37	16,43	13,47	11,77	17,71
45°	12,83	15,15	17,94	19,89	20,67	20,84	20,90	20,63	19,26	16,63	13,85	12,19	17,58
50°	13,14	15,32	17,86	19,43	19,87	19,86	20,00	20,02	19,03	16,72	14,13	12,53	17,33
55°	13,36	15,40	17,67	18,85	18,95	18,77	18,97	19,29	18,68	16,71	14,32	12,78	16,98
60°	13,49	15,37	17,36	18,16	17,92	17,60	17,84	18,44	18,22	16,59	14,42	12,95	16,53
65°	13,53	15,25	16,95	17,36	16,83	16,41	16,71	17,48	17,65	16,36	14,42	13,04	16,00
70°	13,49	15,03	16,44	16,46	15,70	15,14	15,48	16,43	16,97	16,03	14,33	13,03	15,38
75°	13,35	14,72	15,83	15,47	14,48	13,78	14,18	15,35	16,19	15,60	14,14	12,94	14,67
80°	13,13	14,31	15,12	14,41	13,18	12,36	12,80	14,17	15,31	15,08	13,86	12,77	13,87
85°	12,82	13,81	14,32	13,29	11,82	10,93	11,35	12,93	14,34	14,45	13,50	12,51	13,00
90°	12,43	13,23	13,44	12,11	10,41	9,57	9,99	11,62	13,30	13,74	13,04	12,16	12,08

Taula 4

Orientació: 30°													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Anual
0°	6,80	9,65	13,88	18,54	22,25	24,03	23,37	20,42	16,05	11,40	7,73	6,04	15,04
5°	7,58	10,44	14,61	19,09	22,54	24,19	23,59	20,86	16,74	12,20	8,54	6,82	15,62
10°	8,32	11,17	15,25	19,55	22,70	24,20	23,67	21,24	17,33	12,93	9,30	7,56	16,12
15°	9,01	11,83	15,83	19,89	22,80	24,11	23,67	21,50	17,82	13,58	10,01	8,25	16,55
20°	9,64	12,42	16,32	20,11	22,75	23,92	23,55	21,62	18,23	14,15	10,66	8,90	16,88
25°	10,22	12,93	16,71	20,24	22,57	23,58	23,28	21,62	18,54	14,63	11,24	9,49	17,11
30°	10,73	13,37	17,00	20,28	22,31	23,13	22,91	21,55	18,74	15,02	11,75	10,02	17,25
35°	11,18	13,72	17,18	20,19	21,94	22,61	22,46	21,35	18,82	15,32	12,19	10,49	17,30
40°	11,55	13,99	17,26	19,98	21,44	21,95	21,87	21,02	18,79	15,52	12,55	10,89	17,25
45°	11,85	14,17	17,24	19,65	20,81	21,17	21,15	20,56	18,64	15,63	12,83	11,21	17,09
50°	12,08	14,26	17,10	19,22	20,10	20,31	20,35	20,01	18,39	15,64	13,03	11,47	16,84
55°	12,22	14,26	16,90	18,73	19,33	19,39	19,50	19,39	18,07	15,56	13,14	11,65	16,52
60°	12,29	14,18	16,60	18,12	18,44	18,36	18,53	18,66	17,63	15,39	13,17	11,76	16,10
65°	12,28	14,02	16,20	17,41	17,45	17,23	17,45	17,82	17,10	15,14	13,11	11,79	15,59
70°	12,19	13,76	15,69	16,59	16,40	16,10	16,35	16,87	16,45	14,78	12,98	11,74	15,00
75°	12,01	13,43	15,10	15,70	15,34	14,92	15,21	15,90	15,72	14,34	12,76	11,61	14,34
80°	11,77	13,00	14,41	14,79	14,20	13,67	14,00	14,88	14,88	13,80	12,46	11,41	13,61
85°	11,44	12,50	13,64	13,80	12,99	12,45	12,77	13,77	14,03	13,19	12,08	11,13	12,82
90°	11,04	11,93	12,84	12,74	11,86	11,23	11,58	12,61	13,11	12,49	11,62	10,79	11,98

Taula 5

Orientació: 60°													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Anual
0°	6,80	9,65	13,88	18,54	22,25	24,03	23,37	20,42	16,05	11,40	7,73	6,04	15,04
5°	7,25	10,11	14,30	18,89	22,41	24,12	23,49	20,69	16,45	11,86	8,19	6,51	15,38
10°	7,69	10,50	14,69	19,14	22,50	24,06	23,51	20,91	16,76	12,25	8,64	6,95	15,66
15°	8,09	10,86	15,01	19,31	22,50	23,97	23,46	21,00	17,05	12,58	9,05	7,35	15,88
20°	8,44	11,19	15,24	19,43	22,39	23,74	23,27	21,06	17,23	12,86	9,41	7,70	16,02
25°	8,74	11,45	15,42	19,44	22,23	23,46	23,06	21,00	17,30	13,10	9,71	8,01	16,10
30°	8,99	11,64	15,54	19,36	21,94	23,07	22,71	20,82	17,37	13,25	9,96	8,28	16,10
35°	9,21	11,76	15,57	19,24	21,59	22,56	22,28	20,63	17,33	13,33	10,16	8,52	16,04
40°	9,39	11,84	15,51	19,00	21,18	22,05	21,81	20,33	17,19	13,33	10,32	8,71	15,91
45°	9,51	11,87	15,40	18,66	20,64	21,41	21,20	19,90	16,96	13,31	10,43	8,85	15,70
50°	9,57	11,84	15,24	18,30	20,03	20,67	20,53	19,44	16,72	13,22	10,47	8,93	15,43
55°	9,57	11,73	14,98	17,85	19,40	19,94	19,84	18,91	16,38	13,05	10,44	8,96	15,10
60°	9,51	11,55	14,64	17,31	18,66	19,09	19,03	18,28	15,95	12,80	10,35	8,93	14,69
65°	9,39	11,31	14,22	16,66	17,83	18,17	18,14	17,54	15,42	12,47	10,20	8,85	14,20
70°	9,22	11,02	13,79	16,05	17,04	17,29	17,30	16,85	14,90	12,11	9,99	8,71	13,70
75°	9,03	10,71	13,30	15,35	16,16	16,32	16,37	16,06	14,31	11,72	9,77	8,54	13,15
80°	8,78	10,33	12,73	14,57	15,19	15,29	15,35	15,18	13,64	11,26	9,49	8,33	12,52
85°	8,49	9,90	12,10	13,75	14,30	14,35	14,44	14,32	12,89	10,74	9,15	8,07	11,88
90°	8,14	9,41	11,42	12,97	13,36	13,33	13,45	13,45	12,17	10,16	8,75	7,77	11,21

Taula 6

Orientació: 90°													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Annual
0°	6,80	9,65	13,88	18,54	22,25	24,03	23,37	20,42	16,05	11,40	7,73	6,04	15,04
5°	6,82	9,65	13,89	18,59	22,24	24,02	23,36	20,43	16,05	11,40	7,74	6,08	15,05
10°	6,84	9,63	13,89	18,54	22,16	23,87	23,24	20,39	16,00	11,34	7,76	6,09	15,00
15°	6,82	9,60	13,81	18,45	21,99	23,67	23,05	20,24	15,90	11,27	7,74	6,11	14,91
20°	6,84	9,52	13,73	18,29	21,73	23,34	22,74	20,08	15,74	11,17	7,74	6,12	14,78
25°	6,83	9,46	13,59	18,06	21,42	22,97	22,41	19,80	15,58	11,03	7,72	6,11	14,61
30°	6,78	9,37	13,41	17,82	21,01	22,49	21,95	19,52	15,33	10,91	7,65	6,10	14,39
35°	6,76	9,23	13,25	17,48	20,60	21,99	21,50	19,14	15,09	10,74	7,61	6,09	14,15
40°	6,72	9,11	13,01	17,17	20,07	21,41	20,94	18,73	14,80	10,52	7,55	6,05	13,86
45°	6,63	8,97	12,74	16,77	19,57	20,77	20,36	18,30	14,43	10,35	7,45	5,98	13,55
50°	6,52	8,78	12,49	16,31	18,97	20,12	19,73	17,76	14,11	10,11	7,31	5,92	13,20
55°	6,44	8,55	12,17	15,89	18,33	19,35	19,01	17,26	13,73	9,82	7,20	5,85	12,82
60°	6,33	8,37	11,78	15,38	17,70	18,67	18,36	16,70	13,27	9,55	7,07	5,76	12,43
65°	6,18	8,14	11,45	14,80	16,98	17,88	17,60	16,04	12,82	9,27	6,90	5,63	11,99
70°	6,00	7,87	11,07	14,29	16,27	17,05	16,82	15,45	12,38	8,95	6,70	5,47	11,54
75°	5,79	7,56	10,63	13,71	15,56	16,28	16,07	14,80	11,86	8,57	6,46	5,29	11,07
80°	5,62	7,26	10,14	13,06	14,76	15,42	15,24	14,08	11,29	8,19	6,25	5,15	10,55
85°	5,42	6,97	9,73	12,46	14,00	14,58	14,42	13,40	10,79	7,85	6,02	4,97	10,07
90°	5,20	6,65	9,27	11,84	13,26	13,77	13,64	12,72	10,26	7,47	5,77	4,78	9,57

Taula 7

Normalment, els valors de la inclinació i l'orientació dels captadors no coincidirà amb els valors especificats a les taules 4, 5, 6 i 7. Per aquesta raó el software s'ha programat de manera que resolgui aquest problema.

Pel que fa la inclinació, s'ajusta al valor més pròxim de la taula. El rang d'ajust de la inclinació és de $\pm 2,5^\circ$. Per exemple una inclinació de 51° , que està en el l'interval semiobert $[47,5^\circ - 52,5^\circ)$, s'ajustarà a 50° .

Pel que fa l'orientació, atès que la taula dóna salts d'angle de 30° en 30° , s'ha dissenyat el software per que faci interpolacions.

Donat un angle α d'orientació dels captadors, es comprova quines són les orientacions immediatament superior i inferior especificades a les taules, anomenades α_1 i α_2 . Per un mes i determinat, el valor de la radiació incident per a les inclinacions α_1 i α_2 seran R_{i1} i R_{i2} respectivament. El valor de la radiació incident R per a l'angle α s'obté aplicant la fórmula

$$R_i = R_{i1} + \frac{(R_{i2} - R_{i1})}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot (\alpha - \alpha_1) \quad (\text{equació 12})$$

on

R_i	és la radiació incident sobre el captador per a un angle α . Les seves unitats són les mateixes que les de R_{i1}, R_{i2}
R_{i1}	és la radiació incident sobre el captador per a un angle α_1 , en MJ/(m ² .dia).
R_{i2}	és la radiació incident sobre el captador per a un angle α_2 , en MJ/(m ² .dia).
α	és el valor absolut de l'angle d'orientació del captador respecte de la direcció Sud. Es mesura en °
α_1	és l'angle d'orientació immediatament inferior a α , recollit a les taules de radiació. Es mesura en °
α_2	és l'angle d'orientació immediatament superior a α , recollit a les taules de radiació. Es mesura en °. Observis que la diferència ($\alpha_2 - \alpha_1$) sempre serà 30°, tret que l'orientació α sigui 0°, 30°, 60° o 90°

És important remarcar que cal transformar les unitats d'energia a kWh, utilitzant l'equivalència 1kWh = 3,6 MJ.

4. Aproximació de la corba de rendiment dels captadors a una recta

L'Ordenança Solar estableix la necessitat d'especificar els paràmetres de la corba de rendiment dels captadors. L'expressió de la corba de rendiment és la proposada a la norma UNE EN 12975-2:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot x - a_2 \cdot x^2 \quad (\text{equació 13})$$

on

η	és el rendiment del captador. És adimensional.
η_0	és el factor òptic. És adimensional.
a_1	és el coeficient lineal de pèrdues tèrmiques. Les seves unitats són W/(m ² .K).
a_2	és el coeficient quadràtic de pèrdues tèrmiques. Les seves unitats són W/(m ² .K ²).
x	és la variable independent. La seva expressió és

$$x = \frac{(T_m - T_{AMB})}{I}$$

on

T_m és la temperatura mitjana del captador en K,
 T_{AMB} és la temperatura ambient exterior en K,
 I és la intensitat de la radiació solar incident en el pla del captador en W/m². Les unitats de x són K.m²/W.

El mètode f-chart, però, concep la corba de rendiment dels captadors com una recta del tipus

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \cdot x \quad (\text{equació 14})$$

on

η	és el rendiment del captador. És adimensional.
$F_R(\tau\alpha)_n$	és el factor d'eficiència òptica. És adimensional.
$F_R U_L$	és el coeficient global de pèrdues. Les seves unitats són $W/(m^2 \cdot K)$.
x	és la variable independent, és funció de la temperatura. La seva expressió és
	$x = \frac{(T_e - T_{AMB})}{I} \text{ on}$
	T_e és la temperatura d'entrada al captador en K,
	T_{AMB} és la temperatura exterior en K,
	I és la intensitat de la radiació solar incident en el pla del captador en W/m^2 . Les unitats de x són $K \cdot m^2/W$.

Es pot veure que el mètode f-chart utilitza únicament els paràmetres $F_R(\tau\alpha)_n$ i $F_R U_L$.

Per resoldre aquesta dificultat, el software calcula 20 punts de la corba de rendiment en la seva forma quadràtica, és a dir, utilitzant els paràmetres η_0 , a_1 i a_2 de l'expressió proposada a la norma UNE EN 12975-2, i busca l'ajust a una recta pel mètode dels mínims quadrats, fent una regressió lineal, el que ens proporcionarà els valors de $F_R(\tau\alpha)_n$ i $F_R U_L$.

Els 20 punts s'escullen prenent com a valors de x els primers múltiples del valor 0,00625 resultant d'agafar la vintèsima part de:

$$\frac{(T_e - T_{AMB})}{I} = \frac{100}{800}$$

que representa el terme independent de la recta.

Una vegada obtinguts els valors de $F_R(\tau\alpha)_n$ i $F_R U_L$, ja podem aplicar el mètode f-chart.

5. Càlcul del paràmetre D_1

Conegudes les necessitats energètiques de l'edifici, la radiació mensual incident en la superfície dels captadors i les característiques dels captadors, podem aplicar el mètode f-chart.

Bàsicament, el mètode consisteix en la determinació de la contribució solar o percentatge de la demanda energètica que cobreix el sistema solar a partir de dos paràmetres adimensionals D_1 y D_2 aplicant la següent expressió:

$$f = 1,029.D_1 - 0,065.D_2 - 0,245.D_1^2 + 0,0018.D_2^2 + 0,0215.D_1^3 \quad (\text{equació 15})$$

El procediment de càlcul que utilitza el software per a la determinació de la superfície de captació solar necessària per cobrir una determinada demanda energètica és el següent:

- Elecció d'una superfície de captadors solars S_c i d'un volum d'acumulació V inicials
- Càlcul del paràmetre D_1
- Càlcul del paràmetre D_2
- Càlcul de la contribució energètica aportada pel sistema solar f per cada mes de l'any
- Càlcul de la producció solar de cada mes de l'any, del total anual i de la contribució energètica anual F
- Repetir els càlculs amb diferents valors de superfície de captació solar i de volum d'acumulació, si és necessari, fins assolir la contribució requerida.

El paràmetre D_1 expressa la relació entre l'energia absorbida pels captadors EA_{mes} i la demanda energètica mensual considerada DE_{mes} .

$$D_{1_i} = \frac{EA_{mes_i}}{DE_{mes_i}} \quad (\text{equació 16})$$

on

D_{1_i} és el valor de D_1 per al mes i . És adimensional
 EA_{mes_i} és l'energia absorbida pels captadors en el mes i . Les seves unitats són kWh/mes.

DE_{mes_i} es la demanda energètica de l'edifici corresponent al mes i .
 Les seves unitats són kWh/mes

A l'expressió anterior, l'energia absorbida pels captadors, EA_{mes_i} , es pot calcular mitjançant la fórmula següent

$$EA_{mes_i} = S_C \cdot F'_R(\tau\alpha) \cdot R_{mes_i} \quad (\text{equació 17})$$

on:

EA_{mes_i} és l'energia solar absorbida pels captadors en el mes i . Les seves unitats són kWh/mes.

S_C

és la superfície dels captadors solars expressada en m^2 .

R_{mes_i}

és l'energia solar incident sobre la superfície dels captadors en el mes i . Les seves unitats són $kWh/(m^2 \cdot mes)$.

$F'_R(\tau\alpha)$

és un factor adimensional, que es calcula amb la següent expressió:

$$F'_R(\tau\alpha)_n = F_R(\tau\alpha) \cdot \left[\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \right] \cdot \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) \quad (\text{equació 18})$$

on:

$F_R(\tau\alpha)_n$

és el *Factor d'eficiència òptica* del captador. Aquest factor és característic del captador solar i s'obté a partir dels coeficients de la corba de rendiment, mitjançant la regressió lineal descrita anteriorment.

$\left[\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \right]$

és l'anomenat *Modificador de l'angle d'incidència*. Per a captadors amb una coberta de vidre, es pot acceptar un valor de 0,96. El software utilitza aquest valor per al càlculs.

$\frac{F'_R}{F_R}$

és l'anomenat *Factor de correcció del conjunt captador-bescanviador*. En general, es pot acceptar un valor de 0,95. El software utilitza aquest valor per al càlculs.

Utilitzant aquestes fórmules, el software calcula dotze valors de D_1 , un per a cada mes.

6. Càlcul del paràmetre D_2

El paràmetre D_2 expressa la relació entre l'energia perduda pel captador EP_{mes} i la demanda energètica mensual de l'edifici DE_{mes} :

$$D_{2_i} = \frac{EP_{mes_i}}{DE_{mes_i}} \quad (\text{equació 19})$$

on

D_{2_i}

és el valor de D_2 per al mes i . És adimensional

EP_{mes_i} és l'energia perduda pels captadors en el mes i . Les seves unitats són kWh/mes.

DE_{mes_i} És la demanda energètica de l'edifici corresponent al mes i . Les seves unitats són kWh/mes

Les pèrdues del captador es calculen amb l'expressió següent:

$$EP_{mes_i} = S_C \cdot F'_R U_L \cdot (100 - T_{AMB_i}) \cdot \Delta t_i \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (\text{equació 20})$$

on

EP_{mes_i} és l'energia solar perduda pels captadors en el mes i . Les seves unitats són kWh/mes.

S_C és la superfície dels captadors solars expressada en m^2 . En els càlculs automàtics recurrents, el software pren com a valor inicial de S_C la superfície d'un únic captador.

$F'_R U_L$ És un factor que es calcula mitjançant l'expressió següent:

$$F'_R U_L = \frac{F_R U_L \cdot \left(\frac{F'_R}{F_R} \right)}{1000} \quad (\text{equació 21})$$

on:

$F_R U_L$ és el *coeficient global de pèrdues* del captador. S'expressa en $W/m^2 \cdot K$. Aquest factor és característic del captador solar i s'obté a partir dels coeficients de la corba de rendiment, mitjançant la regressió lineal descrita anteriorment.

$\frac{F'_R}{F_R}$ és l'anomenat *Factor de correcció del conjunt captador-bescanviador*. En general, es pot acceptar un valor de 0,95. El software utilitza aquest valor per als càlculs.

T_{AMB_i} és la temperatura mitjana mensual de l'ambient del mes i , en $^{\circ}C$. En el cas de la ciutat de Barcelona, les temperatures són les següents:

Mes	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre	Anual
T_{AF} [°C]	8,8	9,5	11,1	12,8	16,0	19,7	22,9	23,0	21,0	17,1	12,5	9,6	15,4

Taula 8

Δt_i és el període de temps considerat. S'expressa en hores. En aquest cas, atès que el càlcul és mensual, representa el nombre d'hores del mes i .

K_1 S'anomena *factor de correcció per emmagatzematge* i es pot calcular mitjançant l'expressió següent:

$$K = \left[\frac{V}{75 \cdot S_c} \right]^{-0,25} = \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{V}{75 \cdot S_c}}} \quad (\text{equació 22})$$

on

V és el volum d'acumulació solar. S'expressa en litres. El software fixa el volum d'acumulació solar de manera que compleixi la condició.

$$50 < \frac{V}{S_c} < 100 \quad (\text{equació 23})$$

Per als càlculs recurrents, el software utilitza com a volum d'acumulació el valor $V = 75 \cdot S_c$

$K_{2,i}$ és el factor de correcció per a instal·lacions de producció d'ACS corresponent al mes i , i es calcula mitjançant l'expressió següent:

$$K_{2,i} = \frac{11,6 + 1,18T_{ACS_m} + 3,86T_{AF_i} - 2,32T_{AMB_i}}{100 - T_{AMB_i}} \quad (\text{equació 24})$$

on

T_{AMB_i} és la temperatura mitjana mensual de l'ambient en °C per al mes i .

T_{ACS_m} és la temperatura mínima de consum acceptable. S'expressa en °C. El software la fixa en 45°C.

T_{AF_i} és la temperatura d'aigua freda de xarxa. S'expressa en °C. Les temperatures d'aigua freda de xarxa fixades per l'Ordenança Solar estan recollides a la taula 1.

Utilitzant aquestes fórmules, el software calcula dotze valors de D_2 , un per a cada mes.

7. Càlcul de la contribució energètica mensual aportada pel sistema solar - f

Una vegada coneguts els valors mensuals dels paràmetres D_1 i D_2 , es pot calcular la contribució solar mensual a partir de l'equació 15:

$$f_i = 1,029.D_1 - 0,065.D_2 - 0,245.D_1^2 + 0,0018.D_2^2 + 0,0215.D_1^3$$

8. Contribució solar mensual i anual

La producció energètica mensual de la instal·lació solar ES_{mes} es calcula amb l'expressió següent:

$$ES_{mes_i} = f_i \cdot DE_{mes_i} \quad (\text{equació 25})$$

on

ES_{mes_i} és l'energia solar mensual aportada durant el mes i . Les seves unitats són kWh/mes

f_i és la contribució solar del mes i . No té unitats. És un tant per 1, però es sol expressar en %

DE_{mes_i} és la demanda energètica del mes i . S'expressa en kWh/mes

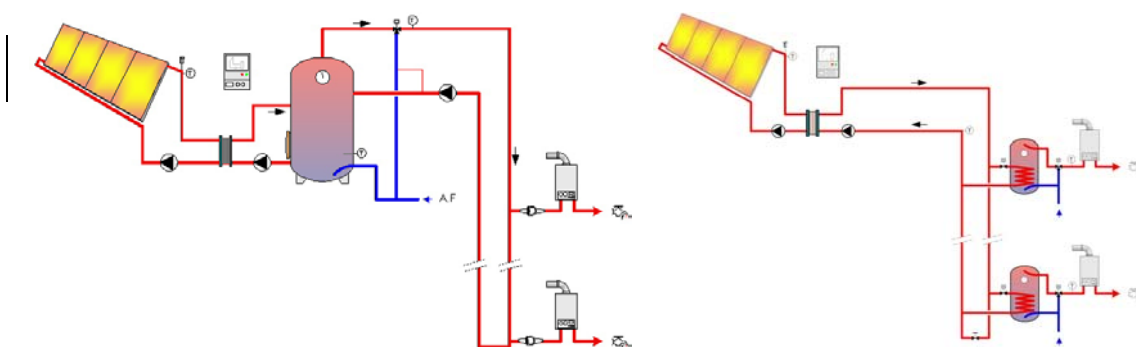
La contribució solar anual F és la relació entre la suma de la producció solar dels 12 mesos de l'any i la demanda energètica anual.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} ES_{mes_i}}{\sum_{i=1}^{12} DE_{mes_i}}$$

9. Pèrdues per acumulació i distribució

En alguns esquemes d'instal·lacions solars de producció d'ACS, les pèrdues energètiques en els circuits de distribució i en els dipòsits d'acumulació que formen part de la instal·lació solar poden arribar a ser importants.

El software incorpora una correcció dels càlculs realitzats amb el mètode f-chart quan s'utilitza un dels dos esquemes indicats a continuació en sistemes de producció d'ACS en edificis plurifamiliars, que consisteix en la multiplicació de la contribució solar obtinguda per 0,86.



Així, si la contribució solar mínima exigida en l'Ordenança Solar per a edifici plurifamiliar és del 60% i s'utilitza un dels dos esquemes indicats, la instal·lació solar s'haurà de dissenyar per arribar a una contribució solar anual del 69,8 % ($0,60 / 0,86 = 0,698$), calculada amb el mètode f-chart.

10. Càlculs recorrents

Quan l'usuari especifica un nombre de captadors, les seves característiques, les dades d'orientació, les d'inclinació i un volum d'acumulació, el software realitza el càlcul seguint el procediment explicat en les pàgines precedents. D'aquests càlculs en resulta una contribució solar que complirà o no les exigències de l'Ordenança Solar.

El software, però, independentment de la superfície proposa per l'usuari, també realitza un càlcul per proposar una superfície mínima de captadors i un volum d'acumulació que compleixi les especificacions de l'Ordenança Solar.

Aquest càlcul es dur a terme utilitzant un sistema de recurrència. Per a això, es parteix dels valors de les característiques dels captadors i , com a condicions inicials, es fan les suposicions següents:

- 1) La instal·lació només té un captador; per tant la superfície total de captació S_c és la superfície unitària del captador.
- 2) El volum d'acumulació és sempre $V = 75 \cdot S_c$

Amb aquests paràmetres es realitza la primera iteració del càlcul, el que ens permet conèixer la contribució solar corresponent F .

Si la contribució solar és menor que l'exigida, es guarda la S_c com a cota mínima $S_{C_{\min}}$ i es defineix una nova S_c seguint el criteri:

- 1) Si hi ha una cota màxima, la nova S_c serà $S_c = \frac{S_{C_{\min}} + S_{C_{\max}}}{2}$
- 2) Si encara no hi ha cota màxima, la nova S_c serà el doble de la que s'ha utilitzat en la iteració anterior.

Si la contribució solar és major que l'exigida, es guarda la S_c com a cota màxima $S_{C_{\max}}$ i es defineix una nova S_c seguint el criteri:

- 1) Si hi ha una cota mínima, la nova S_c serà $S_c = \frac{S_{C_{\min}} + S_{C_{\max}}}{2}$
- 2) Si encara no hi ha cota mínima, la nova S_c serà la meitat de la que s'ha utilitzat en la iteració anterior.

Es duu a terme una nova iteració amb els nous valors de S_c , $S_{C_{\min}}$ i/o $S_{C_{\max}}$ i modificant convenientment el valor del volum d'acumulació.

Es fan tantes iteracions com sigui necessari fins assolir que la contribució solar calculada sigui igual a l'exigida per l'Ordenança Solar.

Per últim, amb la superfície obtinguda mitjançant aquest sistema recurrent, es calcula el nombre de captadors necessaris, ajustant-lo al valor enter per excés.