Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TITULACIÓN: INGENIERÍA INDUSTRIAL

AUTOR: GISELA QUERO SÁNCHEZ

TÍTULO DEL PFC: DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA EN UN EDIFICIO DE VIVIENDAS

DIRECTOR DEL PFC: DANIEL GARCÍA ALMIÑANA

CONVOCATORIA DE ENTREGA: ENERO 2011

-ANEXOS DE CÁLCULO-

ÍNDICE

1. ZONAS CLIMÁTICAS 3

2. TEMPERATURAS Y RADIACIONES 6

3. CÁLCULO DEL CONSUMO DE ACS 7

4. FRACCIÓN SOLAR MÍNIMA 9

5. SELECCIÓN DE CAPTADOR 10

6. CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR LA DISPOSICIÓN GEOMÉTRICA DE LOS COLECTORES 12

7. CÁLCULO DE LA DISTANCIA ENTRE CAPTADORES Y OBJETOS 16

8. CÁLCULO DE LA ENERGÍA APROVECHABLE 18

9. CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DEL COLECTOR 20

10. CÁLCULO DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN 23

11. DIMENSIONADO DE LAS TUBERÍAS DEL CIRCUITO PRIMARIO 26

12. CÁLCULO DE LA BOMBA DEL CIRCUITO PRIMARIO 29

13. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL FLUIDO CALOPORTADOR 31

14. DIMENSIONADO DEL VASO DE EXPANSIÓN 32

15. DIMENSIONADO DE LAS TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN DE ACS 34

15.1 BAJANTE 1 36

15.2 BAJANTES 2 Y 3 37

16. CÁLCULO DE LA BOMBA DE RECIRCULACIÓN 39

17. CÁLCULO DEL AHORRO DE COMBUSTIBLE 44

18. CÁLCULO DEL AHORRO DE EMISIONES 46

19. CÁLCULO DEL VAN Y EL TIR 47

1. ZONAS CLIMÁTICAS

Existen diferentes zonas climáticas dependiendo del factor que se desee calcular.

De esta manera, la primera zona climática hace referencia al cálculo de la carga térmica, ya que el CTE fija unos valores límite de transmitancia térmica para evitar descompensaciones entre la calidad térmica de diferentes espacios. Uno de los métodos que facilita el CTE, concretamente en el Apéndice D del Documento Básico HE, para estimar la zona climática en la que se enmarcaría un edificio es el que se describe a continuación.

La zona climática en la que se ubica la localidad objeto de interés se estima restando a su cota altimétrica la altitud de referencia de su capital de provincia.

Provincia	Capital	Altura de referencia (m)
Albacete	D3	677
Alicante	B4	7
Almería	A4	0
Ávila	E1	1054
Badajoz	C4	168
Barcelona	C2	1
Bilbao	C1	214
Burgos	E1	861
Cáceres	C4	385
Cádiz	A3	0

Desnivel entre la localidad y la capital de su provincia (m)				
≥200 <400	≥400 <600	≥600 <800	≥800 <1000	≥1000
D2	E1	E1	E1	E1
C3	C1	D1	D1	E1
B3	B3	C1	C1	D1
E1	E1	E1	E1	E1
C3	D1	D1	E1	E1
C1	D1	D1	E1	E1
D1	D1	E1	E1	E1
E1	E1	E1	E1	E1
D3	D1	E1	E1	E1
B3	B3	C1	C1	D1

Tabla 1: Determinación de las zonas climáticas. Fuente: CTE-HE.

Con el desnivel obtenido entre la localidad y su capital de provincia, a partir de la tabla 3 se estima la zona climática que le correspondería. Si la diferencia de altitud fuese inferior a 200 m o la localidad se encontrara a una altitud inferior a la de referencia, se tomará para dicha localidad, la misma zona climática que la que corresponde a la capital de provincia.

Por lo tanto, en el caso estudiado, para la capital Barcelona se obtiene la zona C2, y puesto que la resta de altitud es inferior a 200 m, se considerará que la zona climática de Rubí es la misma que la de Barcelona, es decir, **C2**.

La segunda zona hace referencia a la contribución solar mínima que debe tener la instalación para aplicaciones de ACS, en función de la zona climática y del caudal de agua diario se tiene una contribución solar dada.

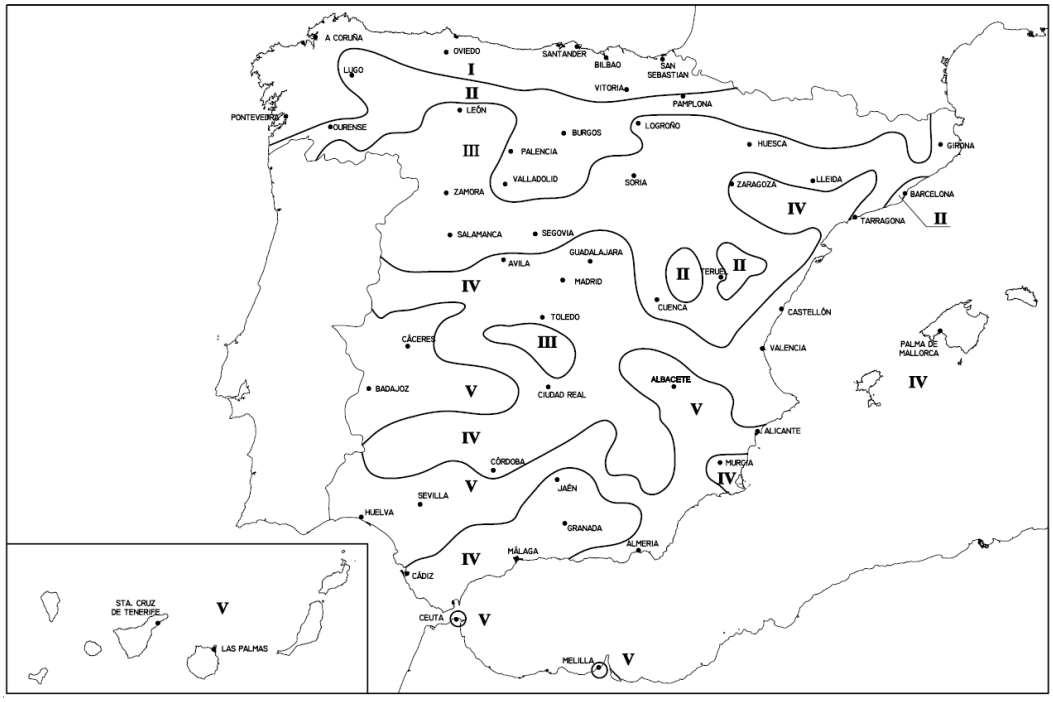

Figura 1: Mapa de zonas climáticas de España. (Fuente: CTE documento HE4).

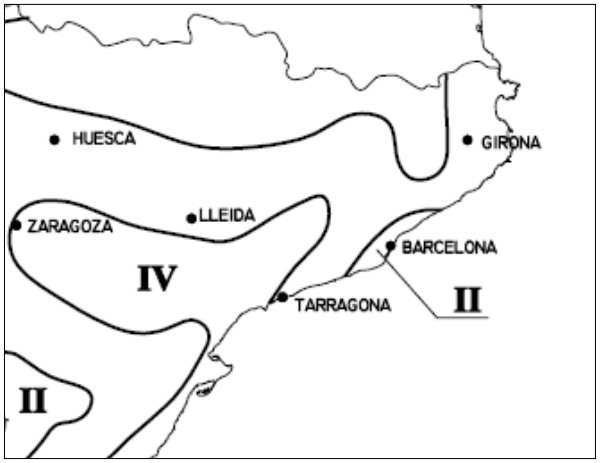

Figura 2: Detalle del mapa anterior en la zona estudiada. Fuente: CTE-HE4

Como se puede observar en el dibujo, para Rubí (Barcelona) se obtiene la **zona climática II**

Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Zona climática I	II	III	IV	V
50-5.000	30	30	50	60	70
5.000-6.000	30	30	55	65	70
6.000-7.000	30	35	61	70	70
7.000-8.000	30	45	63	70	70
8.000-9.000	30	52	65	70	70
9.000-10.000	30	55	70	70	70
10.000-12.500	30	65	70	70	70
12.500-15.000	30	70	70	70	70
15.000-17.500	35	70	70	70	70
17.500-20.000	45	70	70	70	70
> 20.000	52	70	70	70	70

Tabla 2: Fracción solar de ACS. Fuente: CTE

Una vez conocida la demanda de ACS y la zona a la que pertenece la localidad, mediante esta tabla se podrá conocer el valor de la contribución solar mínima.

También se puede conocer la radiación solar global a partir de esta zona climática:

Zona climática	MJ/m^2	kWh/m^2
I	H < 13,7	H < 3,8
II	13,7 ≤ H < 15,1	3,8 ≤ H <4,2
III	15,1 ≤ H < 16,6	4,2 ≤ H < 4,6
IV	16,6 ≤ H < 18,0	4,6 ≤ H < 5,0
V	H ≥ 18,0	H ≥ 5,0

Tabla 3: Radiación solar global. Fuente: CTE

2. TEMPERATURAS Y RADIACIONES

En este apartado se muestran todas las temperaturas necesarias que hay que tener en cuenta en el proyecto, así como los diferentes datos relativos a la radiación.

	TEMPERATURAS (ºC)		RADIACIONES (kJ/m^2/día)	
MES	**T. agua red**	**T. amb**	**Rad. horiz.**	**Rad. inclin.**
Enero	12.0	9.40	6.196	11.060
Febrero	13.2	9.90	10.006	15.459
Marzo	14.4	12.30	13.606	17.104
Abril	15.6	14.60	18.170	18.780
Mayo	16.8	17.70	21.272	19.255
Junio	18.0	21.60	22.734	19.357
Julio	19.2	24.40	22.358	19.498
Agosto	18.0	24.20	18.966	17.382
Setiembre	16.8	21.70	15.196	17.528
Octubre	15.6	17.50	11.764	14.365
Noviembre	14.4	13.50	6.906	11.744
Diciembre	13.2	10.20	5.862	11.297
ANUAL	15.6	16.4	14.420	16.152

Tabla 4: Temperaturas y radiaciones. Fuente: [8]

3. CÁLCULO DEL CONSUMO DE ACS

En este apartado se llevará a cabo el cálculo del consumo de ACS del edificio de viviendas estudiado, siguiendo el método descrito en el Pliego de Condiciones desarrollado por IDAEN.

Puesto que para el estudio presente no se disponen de todos los datos de consumo, se utilizarán para el diseño los consumos unitarios expresados en la siguiente tabla, en la que se ha considerado una temperatura de referencia de 60 °C.

Criterio de consumo	*Litros/día*	
Viviendas unifamiliares	30	por persona
Viviendas multifamiliares	22	por persona
Hospitales y clínicas	55	por cama
Hoteles (4 estrellas)	70	por cama
Hoteles (3 estrellas)	55	por cama
Hoteles/Hostales (2 estrellas)	40	por cama
Campings	40	por emplazamiento
Hostales/Pensiones (1 estrella)	35	por cama
Residencias (ancianos, estudiantes, etc.)	55	por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	15	por servicio
Escuelas	3	por alumno
Cuarteles	20	por persona
Fábricas y talleres	15	por persona
Oficinas	3	por persona
Gimnasios	20 a 25	por usuario
Lavanderías	3 a 5	por kilo de ropa
Restaurantes	5 a 10	por comida
Cafeterías	1	por almuerzo

Tabla 5: Consumo unitario. Fuente IDAE.

El cálculo del número de personas por vivienda deberá hacerse utilizando los valores mínimos siguientes:

Nº de dormitorios	*Nº de personas*
1	1,5
2	3
3	4
4	6
5	7
6	8
7	9
8	9
Más de 8	Igual que el número de dormitorios

Tabla 6: Cálculo del número de personas por vivienda. Fuente: IDAE.

El número de dormitorios puede verse en el plano 2, *Plantas entresuelo, primera, segunda y cuarta.*

Nº de viviendas	Nº de dormitorios	Nº de personas	Total de personas
20	4	6	120
5	3	4	20
			TOTAL 140

Tabla 7: Cálculo de la estimación del total de personas viviendo en el edificio.

Como se puede observar, el número de personas en este bloque de edificios, según el CTE, sería de 140 personas, y por lo tanto, el consumo medio de ACS diario seria:

$$Q_{cons} = 22 \cdot 140 = \boxed{3080 \text{ litros de ACS/día a 60 ºC}}$$

4. FRACCIÓN SOLAR MÍNIMA

Según el CTE en el documento básico de HE 4, el método para el cálculo de la contribución solar mínima de ACS es el explicado en el anexo de cálculo *1.Zonas climáticas*.

A partir de la tabla 8, de la zona en la que se encuentra Rubí y de la demanda calculada, se obtiene una fracción solar mínima del **30%.**

$D_{día}$ = 3080 l/día

Zona climática: II

Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Zona climática I	II	III	IV	V
50-5.000	30	30	50	60	70

Tabla 8: Contribución solar mínima. Fuente CTE-HE4

Por otra parte, el Decreto de Ecoeficiencia de la Generalitat de Catalunya, fue creado como complemento del Código Técnico de la Edificación, intentado así reforzar ciertos parámetros para continuar el cambio social impulsado por los municipios y para diseñar y construir edificios desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental.

Demanda de ACS del edificio [l/día]	Zonas climáticas		
	II	III	IV
50 a 5000	40	50	60
5001 a 6000	40	55	65
6001 a 7000	40	65	70
7001 a 8000	45	65	70
8001 a 9000	55	65	70
9001 a 10000	55	70	70
10001 a 12500	65	70	70
>12500	70	70	70

Tabla 9: Contribución solar mínima en función del consumo según el Decreto de Ecoeficiencia. Fuente: Gencat

Este decreto sitúa a Barcelona en la zona III, por lo que se fijaría una fracción solar mínima del 50%

5. SELECCIÓN DE CAPTADOR

A continuación se muestra la tabla de propiedades de los diferentes captadores solares que se han considerado para este proyecto:

Modelo	Rendimiento	Pérdidas
AMCOR AM 2122	0,7200	4,5000
CALPAK 2001	0,7379	7,7690
CHROMAGEN CR-10 SN	0,6715	3,1410
CHROMAGEN CR-12 SN	0,7132	4,3960
CPC ML-2,0 TINOX	0,7400	4,5000
ECOSTAR ES	0,7600	3,2400
FERROLI ECOUNIT	0,7693	6,6585
FERROLI ECOUNIT PLUS	0,7600	4,5000
GIORDANO C8.8S	0,6881	6,3030
GREENONE FK 7300	0,7400	4,2000
INDOOR SUN CPC ML 3.0 TINOX	0,7500	3,5000
ISOFOTON GAROL I	0,7693	6,6585
ISOFOTON ISONOX II	0,7600	4,5000
KAPLAN K-1	0,7026	5,5315
KAYSUN CO 2000 EC	0,6990	4,1520
MADE 4.000-E	0,7978	6,1700
MADE 5000-S	0,6863	5,3820
MEGASUN STEEL 2.500	0,6347	6,2200
NORDSOL MOD. 1	0,7900	4,2000
PROMOSOL PMP V1/H2	0,7743	6,9440
REHAU WK REHAU SOLECT	0,7400	4,2000
ROCA PS	0,6700	4,4000
SAUNIER DUVAL SDS/8V/H/VHE/HHE	0,6881	6,3030
SOLAHART B	0,7800	3,6000
SOLAHART JD	0,7870	8,3700
SOLAHART L	0,7023	6,8350
SOLAHART M	0,7300	4,9000
SOLAHART OYSTER	0,6600	4,5000
SOLARFOCUS CPC	0,7410	3,3110
SOLARFOCUS CPC S1	0,7080	3,5520
SONNENKRAFT SK 500	0,7000	4,1000
STIEBEL ELTRON SOL 25 S	0,6900	4,5000
STRUZZI ST-40/400	0,6900	3,8000
TERMICOL T 105-SH	0,7000	4,5000
VIESSMANN VITOSOL-300F SV3A	**0,8330**	**3,6769**
WAGNER C20 AR (LB-AR/ 7,6 m2)	0,7600	3,2000
WAGNER C20 HTF (LB-HT/ 7,60 m2)	0,7400	3,0000
WAGNER LB 7,6 AR	0,8300	4,4000
WEISHAUPT WTS-F	0,7300	5,2000
WOLF TOPSON TX	0,7594	4,6190

Tabla 10: Rendimiento y pérdida de diferentes captadores. Fuente Gas Natural

Si se observa el *Plano 3: Cubierta del edificio*, se puede ver que el diseño de esta instalación estará condicionado por la limitación de espacio.

Debido a este motivo, era necesario un captador solar con gran rendimiento y coeficiente de pérdidas mínimo, de manera que la superficie de captación también fuera mínima y por lo tanto se necesitaran menos captadores solares. Así mismo, en las especificaciones básicas de este proyecto se mencionaba que el rendimiento del colector escogido debía ser mayor a 0.8.

Por otra parte, se han optado por captadores solares planos por ser una tecnología de captación más sencilla, tanto en su instalación como en su mantenimiento.

6. CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR LA DISPOSICIÓN GEOMÉTRICA DE LOS COLECTORES

La disposición de los captadores en el campo de captación puede originar pérdidas que reducen el rendimiento de la instalación. Hay tres posibles tipos de pérdidas debidas a la colocación de los captadores, las pérdidas debidas a la orientación según la desviación respecto al Sur geográfico, las pérdidas debidas a la inclinación desviando la recepción ortogonal de la radiación solar, y las pérdidas derivadas de los obstáculos en el entorno que producen sombras.

Las condiciones relativas a las pérdidas se regulan en los párrafos del 8 al 12 del apartado *2.1-Contribución solar mínima*, de la Sección HE4, del DB HE del CTE. Así, el párrafo 8 dice que la orientación e inclinación del sistema generador y las posibles sombras sobre el mismo serán tales que las pérdidas sean inferiores a los límites de la tabla que se expone a continuación:

Tabla 2.4 Pérdidas límite

Caso	Orientación e inclinación	Sombras	Total
General	10 %	10 %	15 %
Superposición	20 %	15 %	30 %
Integración arquitectónica	40 %	20 %	50 %

Tabla 11: Pérdidas límites. Fuente CTE

El párrafo 9 explica que en dicha tabla se consideran tres casos:

- General.
- Superposición de módulos.
- Integración arquitectónica.

Se considera que existe integración arquitectónica cuando los módulos cumplen una doble función energética y arquitectónica y además sustituyen elementos constructivos convencionales o son elementos constituyentes de la composición arquitectónica. Se considera que existe superposición arquitectónica cuando la colocación de los captadores se realiza paralela a la envolvente del edificio, no aceptándose en este concepto la disposición horizontal con el fin de favorecer la auto limpieza de los módulos. Una regla fundamental a seguir para conseguir la integración o superposición de las instalaciones solares es la de mantener, dentro de lo posible, la alineación con los ejes principales de la edificación.

Para el cálculo de estas pérdidas se debe seguir el procedimiento establecido en los apartados 3.5 y 3.6 de la Sección HE4, del DB HE, del CTE.

Estas pérdidas se calcularán en función de:

a) Ángulo de inclinación, β, definido como el ángulo que forma la superficie de los captadores con el plano horizontal (figura 3-izquierda). Su valor es 0° para captadores horizontales y 90° para verticales.

b) Ángulo de azimut, α, definido como el ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del captador y el meridiano del lugar (figura 3-derecha). Valores típicos son 0° para captadores orientados al Sur, –90° para captadores orientados al Este y +90° para captadores orientados al Oeste.

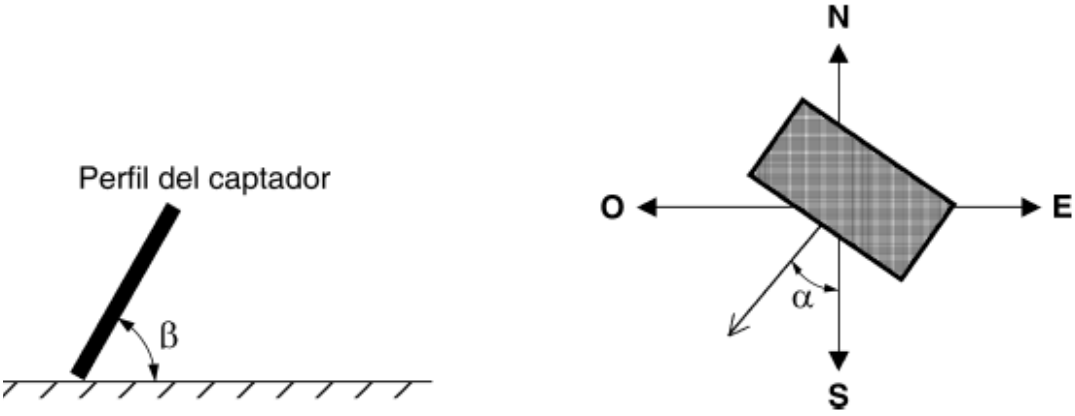

Figura 3: ángulos de orientación e inclinación de los módulos. Fuente: IDAE.

Habiendo determinado el ángulo de azimut del captador, se calcularán los límites de inclinación aceptables de acuerdo a las pérdidas máximas respecto a la inclinación óptima establecida. Para ello se utilizará la figura 4, válida para una la latitud (Φ) de 41°, de la siguiente forma:

- Conocido el azimut, se determina en la figura 4 los límites para la inclinación en el caso Φ = 41°. Para el caso general, las pérdidas máximas por este concepto son del 10 %, para superposición, del 20 % y para integración arquitectónica, del 40 %. Los puntos de intersección del límite de pérdidas con la recta de azimut nos proporcionan los valores de inclinación máxima y mínima.
- Si no hay intersección entre ambas, las pérdidas son superiores a las permitidas y la instalación estará fuera de los límites. Si ambas curvas se intersectan, se obtienen los valores para latitud Φ = 41° y se corrigen de acuerdo con lo que se cita a continuación.

Se corregirán los límites de inclinación aceptables en función de la diferencia entre la latitud del lugar en cuestión y la de 41 °, de acuerdo a las siguientes fórmulas:

Inclinación máxima = inclinación (Φ = 41°) – (41° – latitud);

Inclinación mínima = inclinación (Φ = 41°) – (41° – latitud); siendo 0° su valor mínimo.

En casos cerca del límite y como instrumento de verificación, se utilizará la siguiente fórmula:

Pérdidas (%) = $100 \times [1{,}2 \times 10^{-4} (\beta - \beta_{opt})^2 + 3{,}5 \times 10^{-5} \alpha^2]$ para $15° < \beta < 90°$

Pérdidas (%) = $100 \times [1{,}2 \times 10^{-4} (\beta - \beta_{opt})^2]$ para $\beta \leq 15°$

[NOTA: α, β se expresan en grados]

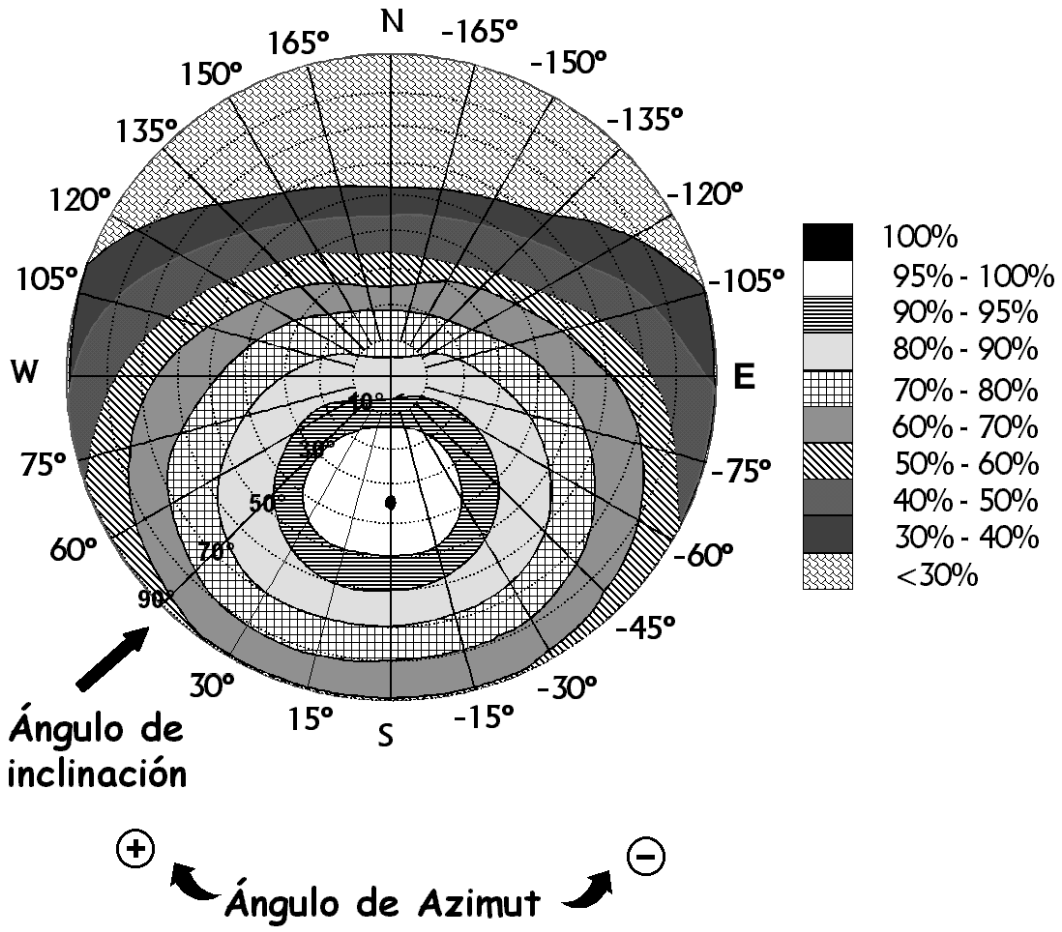

Figura 4: Porcentaje de energía respecto al máximo como consecuencia de las pérdidas por orientación e inclinación. Fuente IDAE.

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, para el caso estudiado, la latitud del edificio estudiado es de 41º 29' Norte, motivo por el cual la figura anterior, es válida para este cálculo.

Conocido el azimut, cuyo valor es 0°, es decir orientación sur, se determinan, en la figura 5, los límites para la inclinación para la latitud estudiada, caso de Φ = 41°. Los puntos de intersección del límite de pérdidas inferiores al 5% (borde exterior de la región 95% - 100%), máximo para el caso general, con la recta de azimut proporcionan los siguientes valores:

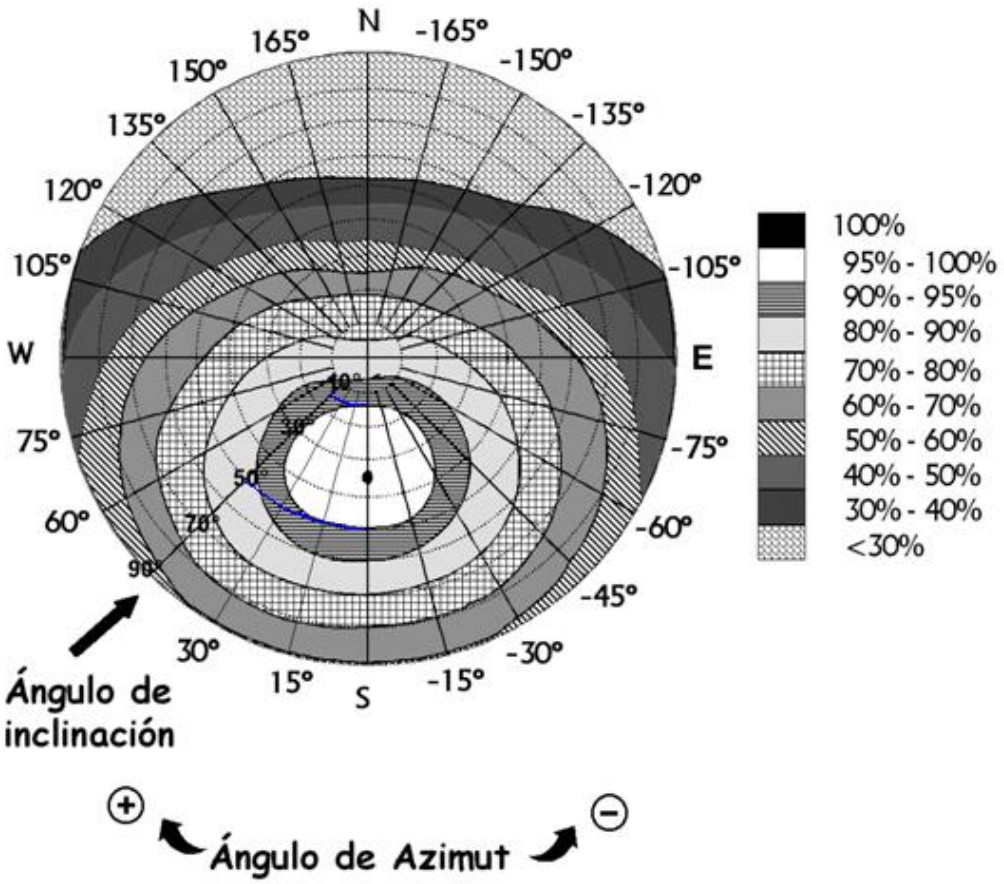

Figura 5: Resolución del caso estudiado

Inclinación máxima = 0°

Inclinación mínima = 3°

Así pues, esta instalación, de inclinación 41°, cumple los requisitos de pérdidas por orientación e inclinación, y por lo tanto a la hora de realizar los cálculos se despreciarán las pérdidas por inclinación.

7. CÁLCULO DE LA DISTANCIA ENTRE CAPTADORES Y OBJETOS

En instalaciones de utilización durante todo el año y para captadores instalados en el Plano Horizontal, como es la presente estudiada, el día más desfavorable es el 21 de diciembre, y la altura solar mínima al mediodía solar es:

$$H_{min} = 90º - latitud\ del\ lugar - 23{,}27'$$

La distancia mínima a considerar entre los captadores solares y un objeto de altura h será:

$$d_1 = \frac{h_{captador}}{tg(H_{min})}$$

Aunque este dato no es relevante en este estudio ya que, como se explicará en apartados posteriores, no hay ningún elemento que pueda proyectar sombra.

Finalmente, la distancia mínima a considerar entre filas de captadores será:

$$h_{captador} = L \cdot sen\beta$$

Por tanto,

$$d_1 = \frac{L \cdot sen\beta}{tg(H_{min})}$$

Siendo:

d_1: distancia entre filas.

L: longitud del captador

Esta distancia entre filas es la comprendida entre la parte posterior del captador (la proyección a la horizontal de la parte más elevada del captador), y el inicio de la fila siguiente.

Si se quiere conocer la distancia entre el inicio de filas de captadores, a la anterior distancia hay que sumarle la correspondiente a la proyección sobre la horizontal del captador. Esta proyección se puede conocer mediante la expresión:

$$d_2 = L \cdot cos\beta$$

Luego la distancia ente el inicio de filas de captadores será:

$$d = \frac{L \cdot sen\beta}{tg(H_{min})} + d_2$$

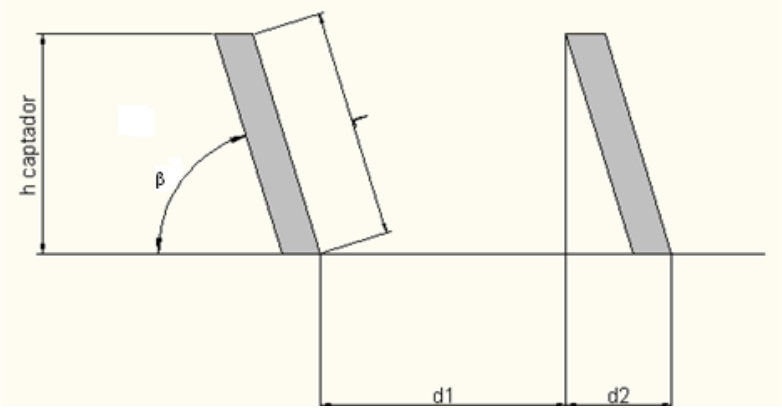

Figura 6: Esquema para el cálculo de la distancia de separación entre captadores. Fuente: [4]

Para el caso particular:

$$H_{min} = 90° - 41°\,29' - 23°\,27' = \underline{25°\,44'}$$

$$h_{captador} = L \cdot sen\beta = 2{,}38 \cdot sen(41) = \underline{1{,}56\ m}$$

$$d_1 = \frac{L \cdot sen\beta}{tg(H_{min})} = \frac{2{,}38 \cdot sen(41)}{tg(25{,}44)} = \underline{3{,}28\ m}$$

$$d_2 = L \cdot cos\beta = 2{,}38 \cdot \cos(41) = \underline{1{,}80\ m}$$

$$d = \frac{L \cdot sen\beta}{tg(H_{min})} + d_2 = 3{,}28 + 1{,}80 = \underline{5{,}08\ m}$$

Por otro lado, la primera fila de captadores deberá separase suficientemente de la fachada Sur del edificio, para así evitar la proyección de sombras del murete de protección que rodea la cubierta.

La distancia mínima de separación que debe dejarse entre el final del murete y el inicio de la primera fila de captadores puede calcularse del siguiente modo:

$$d = h \cdot k$$

Siendo:

h: la altura del murete

$$k = \frac{1}{\tan(67° - latitud)}$$

Latitud	36	37	38	39	40	41	42	43	44
k	1,66	1,73	1,80	1,88	1,96	2,05	2,14	2,25	2,36

Tabla 12: Valores de separación entre obstáculos y captadores. Fuente: [7].

Para la latitud de Barcelona (unos 41º) *k* es igual a 2.05. Teniendo en cuenta que la altura *h* del murete es de 0.5 m, la distancia *d* mínima es de 0.82 m

8. CÁLCULO DE LA ENERGÍA APROVECHABLE

A partir de los datos de radiación para superficies inclinadas a 41º, con ángulo acimut 0º, extraídos del *"Atlas de Radiació Solar a Catalunya"* (columnas A y B), se puede proceder a realizar los cálculos necesarios, contemplados en la tabla que se muestra a continuación.

- A: Radiación captada en un día medio del mes [kJ]/m^2·día]
- B: Radiación captada en un día medio del mes [kWh]/m^2·día]
- C: Corrección atmósfera [kWh]/m^2·día]
- D: Horas de sol útiles [h]

Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
De +25º a +45º (Hemisferio Norte)	8	9	9	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9	9	8	7,5

Tabla 13: Número medio de horas diarias de sol útiles para captadores orientados aproximadamente al ecuador e inclinados con ángulo igual a la latitud. Fuente: CENSOLAR.

- E: Corrección por histéresis [kWh]/m^2·día]
- F: Intensidad útil media por hora [W/m^2]

	A	B	C	D	E	F
Enero	11,1	3,07	3,01	8	2,83	353,77
Febrero	15,5	4,29	4,21	9	3,96	439,53
Marzo	17,1	4,75	4,66	9	4,38	486,30
Abril	18,8	5,22	5,11	9,5	4,81	505,85
Mayo	19,3	5,35	5,24	9,5	4,93	518,65
Junio	19,4	5,38	5,27	9,5	4,95	521,39
Julio	19,5	5,42	5,31	9,5	4,99	525,19
Agosto	17,4	4,83	4,73	9,5	4,45	468,20
Septiembre	17,5	4,87	4,77	9	4,49	472,13
Octubre	14,4	3,99	3,91	9	3,68	408,43
Noviembre	11,7	3,26	3,20	8	3,01	333,91
Diciembre	11,3	3,14	3,08	7,5	2,89	361,35
Anual	16,2	4,49	4,40			

Tabla 14: Cálculo de la energía aprovechable

En la columna C se muestra la radiación captada una vez aplicado un coeficiente corrector debido a la polución de la atmósfera correspondiente a una zona urbanizada con carreteras, ajustado empíricamente a 0,98.

El valor obtenido en esta columna corresponde al valor de la energía total teórica que se puede esperar, que incida en un día medio del mes considerado en cada m^2 de colector. Ahora bien, los sistemas térmicos de energía solar trabajan mediante un fluido que se pone en movimiento únicamente cuando la temperatura de la porción del mismo que se encuentra dentro de los colectores, supera un cierto valor. A primeras horas de la mañana o últimas de la tarde, cuando el Sol está muy bajo, aunque llega algo de energía a la superficie colectora, ésta puede no ser suficiente ni siquiera para compensar las pérdidas por radiación, convección y conducción que se producirían si el fluido caliente procedente de la porción del circuito primario dentro del acumulador, fuese obligado a circular a través de los colectores.

Habría entonces una pérdida neta desde el acumulador hacia el ambiente, a través del colector, cosa que, lógicamente, no es deseable. Es más eficaz que el sistema no funcione, es decir, que no haya circulación en el primario durante estas horas de menor radiación.

Por tanto, el control de la bomba de circulación, será efectuado mediante una Regulación Diferencial que garantice el funcionamiento de la bomba, únicamente en los momentos favorables, es decir no funcionará mientras que la Intensidad de la radiación solar incidente sea inferior que un determinado valor umbral – variable en función de la temperatura del agua en el acumulador, la temperatura ambiente y otros factores que influyen en las pérdidas del colector – no pudiendo existir entonces, ningún aprovechamiento de energía, ya que no se establecerá circulación en el colector. El efecto sería prácticamente el mismo, que la intensidad de radiación solar fuese nula.

Este fenómeno, conocido como histéresis, será reflejado en el rendimiento de la energía captada mediante la aplicación de un coeficiente corrector de 0,94 determinado empíricamente [CENSOLAR “Sistemas aprovechamiento térmico II, pag. 159] (Columna E)

El valor obtenido es dividido por el nº de horas solares para obtener la Intensidad de radiación media y útil (columna F).

Como valor final, el valor medio de radiación solar útil que reciben los captadores en un año es de:

$$\underline{I_T = 449.557\ W/m^2}$$

9. CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DEL COLECTOR

Para determinar el rendimiento de un captador solar se realizan ensayos bajo unas condiciones controladas de radiación solar, temperatura, etc.

Los resultados de estos ensayos determinan el comportamiento del captador solar. Este comportamiento mide la relación entre la energía útil y la recibida en el captador buscando un indicador de su rendimiento.

La expresión que determina el rendimiento de un captador solar es:

$$\eta = \frac{Energía\ captada}{Energía\ recibida} = \frac{Q}{S_C \cdot I_T}$$

Substituyendo en esta expresión el valor de *Q* que incluye el valor del factor eficacia (*Fr*):

$$Fr = \frac{S_C \cdot [I_T \cdot (\tau \cdot \alpha)_n - U_L \cdot (T_m - T_a)]}{S_C \cdot [I_T \cdot (\tau \cdot \alpha)_n - U_L \cdot (T_e - T_a)]}$$

$$\eta = \frac{S_C \cdot [Fr \cdot (\tau \cdot \alpha)_n \cdot I_T - Fr \cdot U_L \cdot (T_e - T_a)]}{S_C \cdot I_T}$$

Donde:

Q: energía útil del captador (W).

Sc: superficie de captación (m^2).

$Fr\cdot(\tau \cdot\alpha)_n$: término que se identifica con la ordenada en el origen de una recta (adimensional).

$Fr\cdot U_L$: término que se identifica con la pendiente de una recta ($W/m^2\cdot K$).

I_T: radiación incidente total sobre el captador, por unidad de superficie (W/m^2).

T_m: temperatura media de la placa absorbente.

T_e: temperatura del fluido caloportador a la entrada del captador.

T_a: temperatura ambiente

Si se considera un caudal constante, y suponiendo también constantes $(\tau \cdot\alpha)_n$ y U_L, esta curva se asemeja a la ecuación de una recta: y = b – mx, por lo que la ecuación de rendimiento de un captador solar será:

$$\eta = Fr \cdot (\tau \cdot \alpha)_n - \frac{Fr \cdot U_L \cdot (T_e - T_a)]}{I_T}$$

Siendo:

$Fr\cdot(\tau \cdot\alpha)_n$: coeficiente óptico.

$Fr\cdot U_L$: coeficiente de pérdidas.

El análisis de esta curva indica que el comportamiento de los captadores solares será mejor:

- Cuanto mayor sea su coeficiente óptico (ordenada en el origen).
- Cuanto menor sea su coeficiente de pérdidas (pendiente)

Para el caso estudiado en este proyecto, es decir para el colector Viessmann modelo Vitosol 300F - SV3A (véase *Anexo II.1: Captador Solar* y *Anexo II.2: Homologación del captador solar*):

- Factor de eficiencia: 0.833
- Coeficiente global de pérdida: [W/m^2·K]: 3.6769
- Curva de rendimiento: $\eta = 0{,}833 - 3{,}6769 \cdot \frac{T_e - T_a}{I_T}$
  - T_e: Temperatura de entrada del fluido al colector
  - T_a: Temperatura media ambiente
  - I_T: Radiación en [W/m^2]

A fin de observar todas las variables incidentes en un sistema de captación solar, la ecuación de rendimiento debe ser afectada en su ordenada en el origen, factor que determina la radiación captada por el colector, por dos coeficientes correctores atribuibles a:

1) A que el rendimiento teórico determinado por el constructor del colector, es obtenido en base a un ensayo de exposición a radiación solar perpendicular a su superficie. Es por ello que la ecuación de rendimiento debe ser afectada por un coeficiente reductor equivalente al efecto de la variación angular de la radiación solar sobre la superficie colectora a lo largo del día.
2) Y al efecto de envejecimiento y suciedad de la cubierta transparente afecta decisivamente al comportamiento de este a lo largo de su vida útil.

El efecto compuesto de ambos fenómenos puede ser valorado en una reducción del 6% en la radiación captada por el colector [CENSOLAR "Sistemas aprovechamiento térmico II, Pág. 160].

Por este motivo, la ecuación de la curva de rendimiento, que dará los resultados de la columna C, finalmente queda de la siguiente forma:

$$\eta = 0{,}94 \cdot 0{,}833 - 3{,}6769 \cdot \frac{T_e - T_a}{I_T}$$

A efectos prácticos, la temperatura T_e se tomará como la temperatura a la que se demanda la carga energética, por lo tanto, 60 ºC.

Finalmente los resultados obtenidos son:

- A: Intensidad útil media por hora [W/m^2] (columna F de la tabla 14).
- B: Temperatura ambiente (ºC).

- C: Rendimiento del colector
- D: Energía útil [kWh/m^2·día] (columna E de la tabla 14).
- E: Aportación solar diaria por m^2 de captador [kWh/m^2·día] (multiplicando C x D).

	A	B	C	D	E
Enero	353,8	9,4	0,257	2,83	0,73
Febrero	439,5	9,9	0,364	3,96	1,44
Marzo	486,3	12,3	0,422	4,38	1,85
Abril	505,9	14,6	0,453	4,81	2,18
Mayo	518,6	17,7	0,483	4,93	2,38
Junio	521,4	21,6	0,512	4,95	2,54
Julio	525,2	24,4	0,534	4,99	2,66
Agosto	468,2	24,2	0,502	4,45	2,23
Septiembre	472,1	21,7	0,485	4,49	2,17
Octubre	408,4	17,5	0,400	3,68	1,47
Noviembre	333,9	13,5	0,271	3,01	0,81
Diciembre	361,3	10,2	0,276	2,89	0,80

Tabla 15: Cálculo del rendimiento del colector

10. CÁLCULO DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN

En los cálculos presentados hasta el momento las variables observadas tenían una relación directa con la superficie de captación, ignorando el rendimiento que pudiera presentar el resto de elementos participantes en el sistema.

Como la valoración del resto de elementos precisa de un pre-dimensionamiento de la superficie de captación, se ha continuado el cálculo, estimando un rendimiento energético del resto de equipos de un 85%, es decir unas pérdidas energéticas de un 15% atribuibles a las pérdidas en la acumulación, en la distribución y en el intercambiador entre primario y secundario (columna D de la tabla 16).

- A: Demanda de energía total mensual [MJ] (tabla 3 del apartado *9.7-Demanda energética de ACS* del documento Memoria)
- B: Fracción solar aportada por la instalación solar (60%) (obtenida multiplicando la columna A por 0,60).
- C: Aportación solar diaria del colector [kWh/m^2·día] (columna E de la tabla 15).
- D: Calor útil mensual en el punto de consumo [kWh/m^2·mes] (obtenida multiplicando la columna C por 0,85).
- E: Número de días que tiene el mes.
- F: Total del calor aportado [kWh/m^2·mes] (obtenida multiplicando la columna D por los días que tiene el mes).
- G: Total del calor aportado por los captadores [kWh/mes] (se obtiene de multiplicar la columna F por la superficie de captación calculada).
- H: % de la cobertura sobre la demanda [%]

	A	B	C	D	E	F	G	H
Enero	19157	3192,82	0,73	0,62	31	19,2	1211,6	22,8
Febrero	16870	2811,74	1,44	1,22	28	34,3	2165,1	46,2
Marzo	18200	3033,28	1,85	1,57	31	48,7	3078,2	60,9
Abril	17151	2858,42	2,18	1,85	30	55,5	3508,2	73,6
Mayo	17243	2873,75	2,38	2,02	31	62,7	3963,9	82,8
Junio	16223	2703,76	2,54	2,16	30	64,7	4088,5	90,7
Julio	16285	2714,21	2,66	2,26	31	70,2	4434,7	98,0
Agosto	16762	2793,63	2,23	1,90	31	58,8	3717,1	79,8
Septiembre	16687	2781,09	2,17	1,85	30	55,4	3503,6	75,6
Octubre	17719	2953,17	1,47	1,25	31	38,8	2450,9	49,8
Noviembre	17610	2935,05	0,81	0,69	30	20,8	1312,2	26,8
Diciembre	18676	3112,70	0,80	0,68	31	21,0	1329,9	25,6
	208582	34763,63				550,1		**61,1**

Tabla 16: Cálculo inicial de la superficie de captación y de la cobertura de la instalación

Para establecer la superficie de captación necesaria para abastecer el 60% de la demanda energética, se divide la suma de la columna B entre la suma de la columna F.

Así pues, la superficie total de captadores necesarios es:

$$S_{Total\ Captación} = 63{,}194\ m^2$$

Y por lo tanto, el número de captadores necesarios es:

$$N_{captadores} = \frac{Superficie\ total\ de\ captación}{Superficie\ útil\ de\ captador} = \frac{63{,}194}{2{,}32} = 27{,}239$$

Los valores obtenidos de cobertura de la demanda (columna H), se ajustan a lo establecido en la reglamentación, ya que en ningún mes se supera el 100% de cobertura. Con las tasas de todos los meses se obtiene un valor final de cobertura de un 61.058%, según la siguiente ecuación:

$$\eta_{captación} = \frac{\sum_1^{12} A}{\sum_1^{12} D_{100\%}} \cdot 100$$

Donde

A: aportación energética mensual del sistema solar [kWh/mes]

$D_{100\%}$: Demanda energética mensual [kWh/mes]

Estos valores se ajustarán, dado que es necesario obtener un número entero de captadores, para asegurar una instalación hidráulica equilibrada, donde todas las ramas o filas de captadores presenten el mismo número de ellos.

Estos parámetros han determinado el diseño de la instalación con 28 captadores Vitosol 300F, de una superficie individual de 2,32 m^2 (64,96 m^2 de superficie colectiva) distribuidos en 4 ramas de igual nº de captadores, 7 por rama, resultando una cobertura anual del 62,764%. De esta forma y con una inclinación de 41º se obtiene la máxima cobertura anual.

	A	B	C	D	E	F	G	H
Enero	19157	3192,82	0,73	0,62	31	19,2	1245,5	23,4
Febrero	16870	2811,74	1,44	1,22	28	34,3	2225,6	47,5
Marzo	18200	3033,28	1,85	1,57	31	48,7	3164,2	62,6
Abril	17151	2858,42	2,18	1,85	30	55,5	3606,2	75,7
Mayo	17243	2873,75	2,38	2,02	31	62,7	4074,7	85,1
Junio	16223	2703,76	2,54	2,16	30	64,7	4202,7	93,3
Julio	16285	2714,21	2,66	2,26	31	70,2	4558,6	100,8
Agosto	16762	2793,63	2,23	1,90	31	58,8	3820,9	82,1
Septiembre	16687	2781,09	2,17	1,85	30	55,4	3601,5	77,7
Octubre	17719	2953,17	1,47	1,25	31	38,8	2519,4	51,2
Noviembre	17610	2935,05	0,81	0,69	30	20,8	1348,9	27,6
Diciembre	18676	3112,70	0,80	0,68	31	21,0	1367,1	26,4
	208582	34763,63				550,1		**62,8**

Tabla 17: Cálculo final de la superficie de captación y de la cobertura de la instalación.

11. DIMENSIONADO DE LAS TUBERÍAS DEL CIRCUITO PRIMARIO

El diámetro de las tuberías también se establece considerando que la velocidad del fluido que lo recorre, no supere la velocidad marcada en el CTE. La velocidad máxima recomendada con la que tiene que circular el líquido es de unos 1,3 m/s si lo hace de forma continua (circuito primario) y de 2,5 m/s si lo hace en intervalos (circuito secundario o de consumo).

La velocidad media del fluido es una variable a fijar por el calculista de la instalación, pero la experiencia en instalaciones existentes, permite prefijar un rango de velocidades, que no es conveniente superar para evitar riesgos colaterales a la circulación del fluido por la conducción.

Para determinar la velocidad de un fluido que circula por una tubería, conocidos su diámetro y su caudal se utiliza la siguiente expresión:

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}$$

Siendo:

v: velocidad del fluido [m/s]

Q: caudal [m^3/s]

D: diámetro interior de la tubería [m]

Utilizando unidades más habituales y simplificando la fórmula, se puede obtener la expresión siguiente:

$$v = 0{,}354 \cdot \frac{Q}{D^2}$$

Siendo:

v: velocidad del fluido [m/s]

Q: caudal [l/h]

D: diámetro interior de la tubería [mm]

Por otro lado, para dimensionar las tuberías también es necesario considerar las pérdidas de presión por rozamiento o pérdidas de caga lineales, las cules dependen del diámetro de la tubería, de su rugosidad, de las características del fluido que lo recorre y de su velocidad.

Existen tablas y numerosas expresiones que expresan pérdidas de carga lineales en funcion del material a emplear.

Para el presente estudio se ha obtado por la expresión obtenida a partir de la fórmula de *Flamant*, que sirve para el caso de tuberías de cobre de paredes lisas por las que circula agua caliente sin aditivos:

$$Pdc_{unitaria} = 378 \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$$

Donde:

$Pdc_{unitaria}$: pérdidad e carga por metro lineal de tubería [mm.c.a/m].

Q: caudal por la tubería [l/h].

D: Diámetro interior de la tubería [mm].

Puesto que el fluido caloportador en realidad no es agua, sino un fluido mecla de agua y anticongelante a base de glicol, se debe tener en cueta la mayor viscosidad de la mezcla, por lo que el resultado de aplicar la fórmula anterior se ha de multiplicar por 1,3.

Se adjunta a continuación una tabla de caudales de agua aproximados admisibles para los diferentes diámetros de tubería de cobre, suponiendo una pérdida de carga máxima de 40 mm.c.a.

Diámetro nominal [mm]	Diámetro Interior [mm]	Caudal [litros/hora]
18	16	Hasta 500
22	20	Hasta 950
8	26	Hasta 1900
35	33	Hasta 3600
42	40	Hasta 6200
54	51,6	Hasta 12000

Tabla 18: Tabla de selección de tuberías para agua sin aditivos. Fuente: [7].

El diámetro de tubería seleccionado será aquel que proporcione una velocidad y una pérdida de carga inferior a la máxima admisible o recomendable.

En la figura que se muestra a continuación se puede ver la disposición de los captadores en la cubierta así como el recorrido de las tuberías por la cubierta. (véase planos *4. Distribución de los captadores en la cubierta, 5. Dimensionado de las tuberías del circuito primario* y *6. Detalle de las tuberías del circuito primario*).

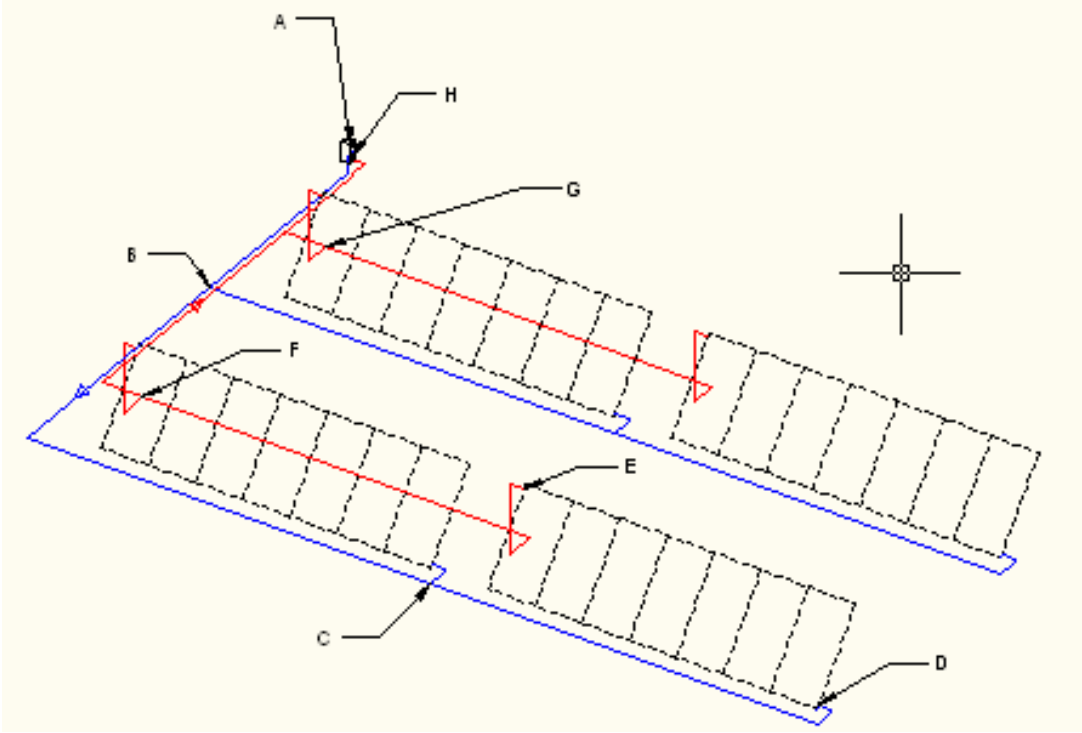

Figura 7: Distribución de las tuberías del circuito primario.

Así pues, los resultados obtenidos se pueden ver en la siguiente tabla:

TRAMO	Q [l/h]	DN [mm]	D [mm]	v [m/s]	$Pdc_{unitaria}$ [mmca/m] (agua)	$Pdc_{unitaria}$ [mmca/m] (tyfocor)
AB	2598,4	42	40	0,521	6,963	9,052
BC	1299,2	35	33	0,422	6,509	8,461
CD	649,6	28	26	0,340	6,005	7,806
EF	649,6	28	26	0,340	6,005	7,806
FG	1229,2	35	33	0,400	5,907	7,680
GH	2598,4	42	40	0,575	8,779	11,413

Tabla 19: Cálculo del diámetro de cada tramo de tubería.

12. CÁLCULO DE LA BOMBA DEL CIRCUITO PRIMARIO

La bomba del circuito primario debe elegirse a partir de las condiciones nominales de trabajo, definidas por el caudal de circulación y la pérdida de carga total del circuito. El caudal de circulación se ha calculado en el apartado anterior, y la pérdida de carga del circuito se determina fundamentalmente por:

- Las pérdidas de carga correspondientes al tramo más desfavorable de tuberías.
- La pérdida de carga producida por el intercambiador de calor, ya sea externo o incorporado al acumulador.
- La pérdida de carga de los colectores solares.

$$H = Pdc_{tuberías} + Pdc_{intercambiador} + Pdc_{captadores}$$

Las pérdidas de carga en los intercambiadores de calor y en los colectores es información que deben suministrar los fabricantes de estos componentes.

Además de las pérdidas de carga lineales producidas por los tramos rectos de tuberías, deben calcularse las pérdidas de carga singulares, debidas a cambios de dirección, derivaciones o elementos hidráulicos existentes en la canalización.

Una vez conocidos estos dos valores, Q y H, se podrá seleccionar una bomba cuya característica debe estar por encima del punto de funcionamiento de diseño.

Una forma sencilla de estimar las pérdidas de carga singulares consiste en establecer una longitud equivalente de tubería que produce la misma pérdida de carga que el elemento en cuestión. En la siguiente tabla se muestran las equivalencias de las singularidades más frecuentes:

	Diámetro nominal de la tuberia					
	18	22	28	35	42	54
Curva de 45°	0,34	0,43	0,47	0,56	0,7	0,85
Codo de 90°	0,5	0,63	0,76	1,01	1,32	1,71
Curva de 90°	0,33	0,45	0,6	0,84	0,96	1,27
Reducción	0,3	0,5	0,65	0,85	1	1,3
T	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
T	2,5	3	3,6	4,1	4,6	5
T	1,68	1,8	1,92	2,4	3	3,6
Válvula antirretorno de clapeta	0,5	0,77	1,05	1,61	2,1	2,66

Tabla 20: Longitud equivalente de tubería (en m) para pérdidas de carga singulares. Fuente: Gas Natural.

De esta manera se obtiene:

TRAMO	DN [mm]	Pdc unit. [mmca/m]	L [m]	Singularidades	L_{sing} [m]	L_{total} [m]	Pdc [mca]
AB	42	16,865	4,6	3 curvas 90º 1válvula A/R	4,98	9,58	0,087
BC	35	12,503	14,3	1 curva 90º 1T	1,24	15,54	0,131
CD	28	11,535	9,7	3 curvas 90º 1T	2,10	11,80	0,092
EF	28	11,535	11,1	3 curvas 90º	1,80	12,90	0,101
FG	35	12,503	6,0	1 curva 90º 1T	1,24	7,24	0,056
GH	42	16,865	2,6	3 curvas 90º 1T	3,38	5,98	0,068
							Pdc total 0,535

Tabla 21: Determinación de la pérdida de carga del tramo más desfavorable de las tuberías del circuito primario.

Pdc unit: pérdida de carga por metro lineal de tubería [mm.c.a/m] (calculada en la tabla 19).

L: longitud del tramo de tubería [m].

L_{sing}: longitud equivalente de las singularidades del tramo [mm].

L_{total}: longitud total a considerar [m] → $L_{total} = L + L_{sing}$

Pdc: pérdidas de carga del tramo [m.c.a] → $Pdc = (Pdc_{unit} \cdot L_{total}) / 1000$

Así pues,

- Pérdidas de carga en las tuberías = 0.535 m.c.a
- Pérdida de carga en el intercambiador = 1.2 m.c.a (proporcionada por el fabricante, *Anexo III: Intercambiador de calor*).
- Pérdida de carga en los captadores: la pérdida de carga total de los colectores conectados en paralelo es igual a la pérdida individual = 0.15 m.c.a (proporcionada por el fabricante, *Anexo II.1: Captador Solar*).

$$H = Pdc_{tuberías} + Pdc_{intercambiador} + Pdc_{captadores}$$

$$H = 0{,}535 + 1{,}2 + 0{,}15 = 1{,}885\ m.c.a$$

Por lo tanto, la selección de la bomba del circuito primario se ha realizado de modo que su curva característica contenga aproximadamente el punto de trabajo definido por una altura manométrica igual a la pérdida de carga del circuito H = 1,885 m.c.a y un caudal mínimo de 2598,4 litros/h.

13. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL FLUIDO CALOPORTADOR

Volumen de fluido en los captadores:

Tal y como se puede ver en el catálogo del *Anexo II.1: Captador Solar*, la capacidad volumétrica del captador Vitosol 300F es de 1.83 litros.

Así pues, el volumen total en los captadores de la instalación estudiada será de:

$$V_{captadores} = 1{,}83\ {}^{l}/_{captador} \cdot 28\ captadores = \underline{51{,}24\ l}$$

Volumen de fluido en el intercambiador:

La capacidad volumétrica del intercambiador de calor Vitotrans 100 modelo 3003 489, es de 1.14 litros en el circuito primario (véase *Anexo III: Intercambiador de calor*).

$$V_{intercambiador} = \underline{1{,}14l}$$

Volumen de fluido en las tuberías:

A partir de la ecuación que se muestra a continuación, es posible calcular el volumen de cada tramo de tuberías:

$$V_{tubería} = Longitud \cdot Sección = L \cdot \frac{\pi \cdot D_i^2}{4}$$

En el *Plano 6. Detalle de las tuberías del circuito primario*, pueden verse los diferentes tramos de tuberías con sus correspondientes medidas que se han utilizado para elaborar la siguiente tabla:

DN [m]	Diámetro int. [m]	Longitud [m]	Sección [m^2]	Capacidad [litros]
0,042	0,04	7,2	0,00125664	9,048
0,035	0,033	30,4	0,00085530	26,001
0,028	0,026	41,4	0,00053093	21,980
				57,029

Tabla 22: Cálculo de la capacidad volumétrica de las tuberías.

$$V_{tuberías} = \underline{57{,}029\ litros}$$

Volumen total de fluido en el circuito primario:

$$V_{total\ de\ fluido} = V_{captadores} + V_{intercambiador} + V_{tuberías} = \boxed{109{,}409\ l}$$

14. DIMENSIONADO DEL VASO DE EXPANSIÓN

El dimensionado del vaso de expansión se efectuará siguiendo las indicaciones de la instrucción UNE 100.155.

Para la determinación de su tamaño se requiere calcular previamente el volumen de fluido caloportador contenido en el circuito primario de captación (véase el apartado anterior, anexo de cálculo *13.Cálculo del volumen del fluido caloportador*). Este valor es de 109,409 litros.

Así pues, el tamaño del vaso de expansión cerrado se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$V_{vaso} = V \cdot \varepsilon \cdot \frac{P_f}{P_f - P_i}$$

Siendo:

V_{vaso}: volumen del caso de expansión [litros].

V: cantidad de fluido caloportador en el circuito primario [litros].

ε: incremento del volumen del fluido caloportador des de 40 ºC hasta la temperatura máxima alcanzable por los captadores [adimensional]

P_f: presión absoluta final del vaso de expansión [kg/cm^2]

P_i: presión absoluta inicial del vaso de expansión [kg/cm^2]

Puesto que en la instalación se utiliza agua con anticongelante pero no se dispone de información detallada sobre la dilatación de la mezcla, el valor ε admitido es de 0.08.

Como valor de P_f se toma la presión correspondiente al tarado de la válvula de seguridad 3 kg/cm^2 (véase apartado el *10.3.8-Otros elementos del circuito primario* del documento Memoria), que es la máxima a la que la instalación puede funcionar. Para obtener la presión absoluta, el valor de tardado de la válvula de seguridad debe incrementarse en 1 kg/cm^2:

$$P_f = 4 \ kg/cm^2$$

Normalmente, la presión inicial de llenado del circuito será como mínimo de 0.5 kg/cm^2 al nivel de los captadores solares (Pi = 1.5 kg/cm^2 de presión absoluta). A este valor deberá añadirse la presión correspondiente a la altura de la columna de agua situada sobre vaso. Si la diferencia de cota existente entre el punto más alto de la instalación y la posición del vaso es de 10 m, la presión estática a añadir será de 1 kg/cm^2 de presión relativa (2 kg/cm^2 de presión absoluta). En este caso, el valor de pi seria de 2,5 kg/cm^2 de presión absoluta.

En el presente estudio, dado que el vaso de expansión y la bomba de circulación se encuentran situados en la cubierta del edificio, para el cálculo del vaso de expansión, la presión absoluta Pi es de:

$$P_i = 1.5 \ kg/cm^2$$

Finalmente, el tamaño mínimo del vaso de expansión será:

$$V_{vaso} = V \cdot \varepsilon \cdot \frac{P_f}{P_f - P_i} = 109{,}409 \cdot 0{,}08 \cdot \frac{4}{4 - 1{,}5} = \underline{14\ litros}$$

15. DIMENSIONADO DE LAS TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN DE ACS

La selección del diámetro de las tuberías del circuito de distribución de agua precalentada debe realizarse a partir del consumo puntual esperado de agua caliente de las viviendas.

El consumo instantáneo de agua caliente del conjunto de un edificio no es igual a la suma de los consumos máximos de cada una de las viviendas, ya que la probabilidad de que todos los usuarios demanden agua simultáneamente es prácticamente nula.

A continuación se muestra el método que es seguido para determinar el caudal de diseño de los diferentes tramos del circuito de distribución:

En primer lugar, se supone que el consumo de diseño de agua caliente (en litros/segundo) de los diferentes grupos de consumo de una vivienda es el siguiente:

- Para un cuarto de baño con bañera: 0.25 l/s
- Para un cuarto de baño o aseo con ducha: 0.15 l/s
- Para un aseo sin ducha: 0.10 l/s
- Para un cocina: 0.15 l/s

Para estimar el consumo de un determinado tramo de tubería deberá sumarse el caudal correspondiente a los grupos de consumo abastecidos (cuarto de baño con bañera, con ducha o cocina) y multiplicar el resultado por un coeficiente de simultaneidad que es función del número de grupos de consumo, según la tabla 23.

Nº de grupos de consumo	Coeficiente de simultaneidad	Nº de grupos de consumo	Coeficiente de simultaneidad
1	1	20	0,4
2	0,75	30	0,38
3	0,6	40	0,37
4	0,55	50	0,35
5	0,53	75	0,33
6	0,5	100	0,32
7	0,49	150	0,31
8	0,48	200	0,3
9	0,46	500	0,27
10	0,45	1000	0,25

Tabla 23: Coeficientes de simultaneidad para el cálculo de tuberías de distribución. Fuente: Gas Natural.

Con este procedimiento se puede estimar el caudal esperado en cada uno de los tramos de la tubería de distribución de agua caliente.

El diámetro de la tubería de distribución se elegirá de manera que la velocidad del agua esté comprendida entre 0.5 y 2 m/s, pudiéndose aceptar como máximo hasta 3 m/s si las tuberías circulan por locales no habitados (como por ejemplo en la sala de máquinas).

La determinación de la velocidad del fluido, conocido el caudal y el diámetro se realiza de la misma manera que en cálculos anteriores:

$$v = 0{,}354 \cdot \frac{Q}{D^2}$$

Siendo:

v: la velocidad en m/s

Q: el caudal en litros/h

D: el diámetro interior de la tubería en mm

Para un caudal dado, pueden existir varios diámetros de tuberías que mantienen la velocidad del agua dentro de los límites recomendados.

Dada la distribución de las viviendas en el edificio, se ralizarán tres bajantes de distribución utilizando los patios de luz, de manera que dos de estos montantes suministrarán agua caliente a 10 viviendas (dos por planta) y el otro montante a 5 viviendas (una por planta). (véanse *Planos: 8.Distribución de las tuberías por la cubierta del edificio, 9.Dimensionado de las tuberías de distribución de ACS por la cubierta del edificio, 11 y 12.Dimensionado de las tuberías de distribución y recirculación de los bajantes 1, 2 y 3*).

Cada una de las viviendas dispone de un baño con bañera, un aseo con ducha y una cocina, es decir, de tres grupos de consumo. Por lo tanto, como ya se ha comentado, el caudal de diseño será igual a la suma de los caudales de estos tres grupos multiplicado por el coeficiente de simultaneidad correspondiente a tres grupos de consumo, que es de 0.6 según la tabla 23.

Como resultado del cálculo se obtine un caudal de diseño de:

$$Q = (0{,}25 + 0{,}15 + 0{,}15) \cdot 0{,}6 = 0{,}33\ litros/s$$

Para dos viviendas, el número de grupos de consumo es de 6, por lo que el coeficiente de simultaneidad es de 0.5 y el caudal de diseño es igual a:

$$Q = 2 \cdot (0{,}25 + 0{,}15 + 0{,}15) \cdot 0{,}5 = 0{,}55\ litros/s$$

Una vez definido el caudal de diseño de los diferentes tramos, se puede proceder al diseño de las tuberías.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada bajante.

15.1 BAJANTE 1

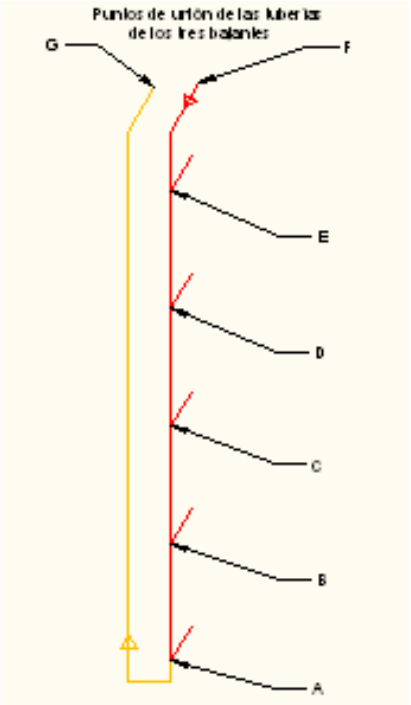

Figura 8: Esquema de la red de distribución por el bajante 1.

TRAMO	Viviendas servidas	Grupos de consumo	Coef. Simult.	Caudal [l/s]	Caudal (l/h)	DN [mm]	D int [mm]	Velocidad [m/s]
AB	1	3	0,60	0,330	1188,0	18	16	1,643
BC	2	6	0,50	0,550	1980,0	22	20	1,752
CD	3	9	0,46	0,759	2732,4	28	26	1,431
DE	4	12	0,44	0,968	3484,8	28	26	1,825
EF	5	15	0,43	1,183	4257,0	35	33	1,384

Tabla 24: Dimensionado de las tuberías del circuito de distribución (para el bajante 1).

15.2 BAJANTES 2 Y 3

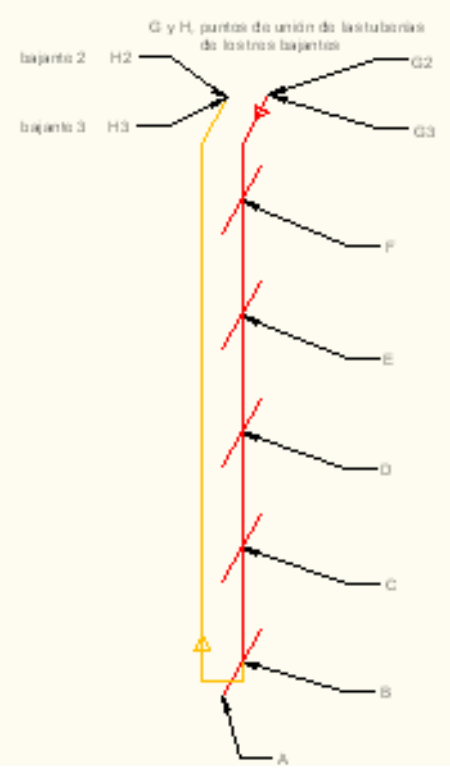

Figura 9: Esquema de la red de distribución por los bajantes 2 y 3.

TRAMO	Viviendas servidas	Grupos de consumo	Coef. Simult.	Caudal [l/s]	Caudal (l/h)	DN [mm]	D int [mm]	Velocidad [m/s]
AB	1	3	0,60	0,330	1188,0	18	16	1,643
BC	2	6	0,50	0,550	1980,0	22	20	1,752
CD	4	12	0,44	0,968	3484,8	28	26	1,825
DE	6	18	0,41	1,353	4870,8	35	33	1,583
EF	8	24	0,39	1,716	6177,6	42	40	1,367
FG	10	30	0,38	2,090	7524,0	42	40	1,665

Tabla 25: Dimensionado de las tuberías del circuito de distribución (para los montantes 2 y 3).

Aplicando el mismo procedimiento, el tramo de tubería situado en el interior de la sala de máquinas, entre la salida del depósito y la bifurcación de los tres bajantes se realizará con tubería de DN 54

Viviendas servidas	Grupos de consumo	Coef. Simult.	Caudal [l/s]	Caudal (l/h)	DN [mm]	D int [mm]	Velocidad [m/s]
25	75	0,33	4,538	16335	54	51,6	2,172

Tabla 26: Dimensionado de la tubería del circuito de distribución antes de la bifurcación.

16. CÁLCULO DE LA BOMBA DE RECIRCULACIÓN

El caudal de recirculación debe ser tal que la energía aportada al circuito de distribución sea suficiente para compensar las pérdidas energéticas del mismo.

La cantidad de energía que se aporta mediante la recirculación se puede calcular a través de la expresión siguiente:

$$P_A = 1{,}16 \cdot Q \cdot \Delta T$$

Donde:

P_A: es la energía aportada por unidad de tiempo al circuito de distribución debido a la recirculación [W].

Q: es el caudal de recirculación [l/h].

ΔT: es la pérdida de temperatura admisible en el circuito de distribución. Un valor aceptable puede ser de 3 ºC.

Por otro lado, las pérdidas de calor en tuberías aisladas pueden calcularse multiplicando la longitud de los diferentes tramos por las pérdidas unitarias, es decir:

$$P_P = \sum (L_i \cdot P_i)$$

Siendo:

P_P: la energía perdida por unidad de tiempo por las tuberías del circuito de distribución [W].

P_i: las pérdidas del tramo i [W/m].

L_i: la longitud del tramo i [m].

Las pérdidas de energía en tuberías aisladas se indican de modo aproximado en la tabla 27, en función del diámetro. Se ha supuesto un espesor de aislamiento de 20 mm y una temperatura ambiente de 10 ºC.

Así, el caudal de recirculación se puede calcular igualando las dos expresiones anteriores, quedando finalmente:

$$Q = \sum \frac{L_i \cdot P_i}{1{,}16 \cdot \Delta T}$$

D [mm]	Pi [W/m]
15	6,8
18	7,5
22	8,4
28	9,8
35	11,4
42	12,9
54	15,5

Tabla 27: Pérdidas energéticas aproximadas en tuberías aisladas. Fuente: [4]

El diámetro de la tubería de retorno se elegirá de modo que la velocidad de circulación sea del orden de 1 m/s.

Es conveniente que la velocidad de circulación esté comprendida entre 2 m/s y 0.5 m/s, y nunca inferior a este último valor. Una velocidad de circulación inferior puede favorecer excesivamente la creación de depósitos calcáreos en las tuberías.

Para el cálculo de las pérdidas de carga basta tener en cuenta el tramo de la tubería de retorno, des de la conexión a la última vivienda hasta el depósito, ya que la pérdida de carga en las tuberías de distribución de agua puede considerarse despreciable para los caudales de recirculación.

Para iniciar el cálculo se ha supuesto un diámetro nominal final de la tubería de retorno de 15 mm. Una vez finalizado el cálculo, es posible que sea necesario reconsiderar esta hipótesis de partida.

En las siguientes tablas se recogen los resultados principales del proceso de cálculo para cada montante:

TRAMO	DN[mm]	L [m]	P_i [W/m]	P_p [W]
AB	18	3	7,5	22,5
BC	22	3	8,4	25,2
CD	28	3	9,8	29,4
DE	28	3	9,8	29,4
EF	35	9,1	11,4	103,74
AG (retorno)	15	21,4	6,8	145,52
				Total 355,76

Tabla 28: Pérdidas energéticas en el circuito de distribución del montante 1 (ver figura 8, en el apartado anterior).

TRAMO	DN[mm]	L [m]	P_i [W/m]	P_p [W]
BC	22	3	8,4	25,2
CD	28	3	9,8	29,4
DE	35	3	11,4	34,2
EF	42	3	12,9	38,7
FG	42	17,5	12,9	225,75
BH (retorno)	15	28,6	6,8	194,48
				Total 547,73

Tabla 29: Pérdidas energéticas en el circuito de distribución del montante 2 (ver figura 9, en el apartado anterior).

TRAMO	DN[mm]	L [m]	Pi [W/m]	P_p [W]
BC	22	3	8,4	25,2
CD	28	3	9,8	29,4
DE	35	3	11,4	34,2
EF	42	3	12,9	38,7
FG	42	28,2	12,9	363,78
BH (retorno)	15	35,8	6,8	243,44
				Total 734,72

Tabla 30: Pérdidas energéticas en el circuito de distribución del montante 3 (ver figura 8, en el apartado anterior).

Aplicando estos valores obtenidos, el caudal de recirculación por los diferentes montantes será:

$$Q_1 = \sum \frac{L_i \cdot P_i}{1{,}16 \cdot \Delta T} = \underline{102{,}230\ l/h}$$

$$Q_2 = \underline{157{,}294\ l/h}$$

$$Q_3 = \underline{211{,}126\ l/h}$$

Para estos caudales y con una tubería de 15 mm, la velocidad que se obtiene es:

$$v_1 = 0{,}354 \cdot \frac{Q}{D^2} = 0{,}354 \cdot \frac{102{,}230}{13^2} = \underline{0{,}214\ m/s}$$

$$v_2 = \underline{0{,}329\ m/s}$$

$$v_3 = \underline{0{,}442\ m/s}$$

Para cumplir con la condición de asegurar una velocidad de circulación superior a 0.5 m/s, el caudal de circulación será el mismo para las tres bajantes e igual a 250 litros/s.

$$v = 0{,}354 \cdot \frac{Q}{D^2} = 0{,}354 \cdot \frac{250}{13^2} = \underline{0{,}524\ m/s}$$

Como en apartados anteriores, se seleccionará una bomba de recirculación cuya curva característica Q – H contenga el punto de trabajo de la instalación, considerando que la altura manométrica deberá compensar la pérdida de carga de los tramos de retorno (AG_1, BH_2, BH_3).

Siguiendo el procedimiento explicado en las bombas de circulación del primario y del secundario:

TRAMO	Q [l/h]	DN [mm]	D [mm]	v [m/s]	Pdc unit. [mmca/m]
AG	250	15	13	0,524	30,385

L [m]	Singularidades	L sing [m]	L total [m]	Pdc [mca]
22,65	6 curvas 90º	1,98	24,63	0,748

Tabla 31: Pérdidas de carga en el tramo de retorno del circuito de distribución del montante 1.

TRAMO	Q [l/h]	DN [mm]	D [mm]	v [m/s]	Pdc unit. [mmca/m]
BH2	250	15	13	0,524	30,385

L [m]	Singularidades	L sing [m]	L total [m]	Pdc [mca]
26,5	5 curva 90º	1,65	28,15	0,855

Tabla 32: Pérdidas de carga en el tramo de retorno del circuito de distribución del montante 2.

TRAMO	Q [l/h]	DN [mm]	D [mm]	v [m/s]	Pdc unit. [mmca/m]
BH3	250	15	13	0,524	30,385

L [m]	Singularidades	L sing [m]	L total [m]	Pdc [mca]
38	8 curvas 90º	2,64	40,64	1,235

Tabla 33: Pérdidas de carga en el tramo de retorno del circuito de distribución del montante 3.

Dado que existen tres bajantes, el caudal de la bomba de recirculación será de 750 l/h (3 x 250) y la altura manométrica de al menos 2.838 m.c.a.

17. CÁLCULO DEL AHORRO DE COMBUSTIBLE

Para calcular el ahorro de combustible se utiliza la siguiente expresión:

$$D_{ACS} \cdot Cobertura = V \cdot PCI \cdot \eta_{caldera}$$

Donde:

D_{ACS} · Cobertura: Energía cubierta por los colectores solares [MJ]

V: Volumen de combustible necesario para producir toda esa energía [m^3]

PCI: Poder calorífico inferior del combustible que se emplea en la instalación. En el caso de Gas Natural es de 39,6 MJ/N·m^3.

$\eta_{caldera}$: Rendimiento de la caldera = 0.75

De la ecuación anterior la única variable desconocida es la del gasto de combustible:

$$V = \frac{D_{ACS} \cdot Cobertura}{PCI \cdot \eta_{caldera}}$$

En la siguiente tabla se muestran los metros cúbicos de combustible ahorrados en cada mes:

MES	D_{ACS} [MJ]	Cobertura	Energía solar [MJ]	Ahorro combustible [m^3]
Enero	19157	0,23	4484	151,0
Febrero	16870	0,47	8012	269,8
Marzo	18200	0,63	11391	383,5
Abril	17151	0,76	12982	437,1
Mayo	17243	0,85	14669	493,9
Junio	16223	0,93	15130	509,4
Julio	16285	1,01	16411	552,6
Agosto	16762	0,82	13755	463,1
Septiembre	16687	0,78	12965	436,5
Octubre	17719	0,51	9070	305,4
Noviembre	17610	0,28	4856	163,5
Diciembre	18676	0,26	4921	165,7
Total anual	-	-	128647	4331,5

Tabla 34: Cálculo del ahorro de combustible

Los valores de D_{ACS} y cobertura se han calculado en el anexo de cálculo *10.Cálculo de la superficie de captación.*

Como se puede observar en la tabla anterior, en el diseño de esta instalación se obtiene un total de **4331,5 m^3** de Gas Natural ahorrados en un año gracias al aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento del agua caliente sanitaria.

18. CÁLCULO DEL AHORRO DE EMISIONES

Para el caso concreto de las calderas domésticas de gas natural, las emisiones son las que se muestran en la siguiente tabla:

EMISIONES GAS NATURAL [g/GJ]	
Partículas	2,9
SO_2	0,3
NO_x	50
COVNM	3
CH_4	100
CO	125
CO_2 [kg/GJ]	56
N_2O	7

Tabla 35: Emisiones derivadas de la utilización de una caldera doméstica de gas natural. Fuente: CORINAIR

Tal y como se observa en esta tabla, frente a las emisiones de CO_2, el resto de gases y partículas son menospreciables.

Para conseguir igualar la energía suministrada por la instalación solar (128647 MJ) y con un rendimiento de 0,75 de la caldera, es necesario que el Gas Natural aporte una energía equivalente a 171529 MJ.

$$Ahorro\ CO_2\ anual = 171529\ MJ \cdot 0{,}056\ {}^{kg}/_{MJ} = \boxed{9605{,}64\ kg}$$

Esto implica que estimando para la instalación una vida útil de 25 años, se dejarán de emitir 240141 toneladas de CO_2.

Respecto al resto de emisiones,

Tipo de emisión	g/GJ	kg/MJ	Ahorro de kg a 25 años
Partículas	2,9	0,0000029	12,4
SO_2	0,3	0,0000003	1,3
NO_x	50	0,00005	214,4
COVNM	3	0,000003	12,9
CH_4	100	0,0001	428,8
CO	125	0,000125	536,0
N_2O	7	0,000007	30,0

Tabla 36: Ahorro de emisiones a la atmosfera a la largo de la vida útil de la instalación.

19. CÁLCULO DEL VAN Y EL TIR

$$VAN = \sum_{t=0}^{n} \frac{Q_t}{(1+k)^t} = Q_o + \frac{Q_1}{(1+k)} + \frac{Q_2}{(1+k)^2} + \cdots + \frac{Q_n}{(1+k)^n}$$

Donde:

Q_t: Flujo de caja del periodo t. El flujo de caja se actualizará año a año como consecuencia de la inflación del gas natural. Como los combustibles normalmente aumentan más que la inflación general, y la previsión para el 2011 dice que será del orden del 2,83 %, se estimará un valor de inflación de un 3 % y un 4% para el gas.

n: Número de años previsto para amortizar la instalación

k: tasa de descuento (k = 2%; Euribor actual 1,225%)

Por otra parte,

$$0 = Q_o + \frac{Q_1}{(1+r)} + \frac{Q_2}{(1+r)^2} + \cdots + \frac{Q_n}{(1+r)^n}$$

Donde r = TIR

Sin subvención:

AÑOS	0	1	2	3	4
Inversión inicial	-67609,92				
Ahorro anual		1954,06	2032,22	2113,51	2198,05
Mantenimiento		-250,00	-257,50	-265,23	-273,18
Flujo de caja	-67609,92	1954,06	2032,22	2113,51	2198,05
Flujo de caja acumulado	-67609,92	-65655,86	-63623,64	-61510,13	-59312,07

AÑOS	5	6	7	8	9
Ahorro anual	2285,97	2377,41	2472,51	2571,41	2674,27
Mantenimiento	-281,38	-289,82	-298,51	-307,47	-316,69
Flujo de caja	2285,97	2377,41	2472,51	2571,41	2674,27
Flujo de caja acumulado	-57026,10	-54648,69	-52176,18	-49604,77	-46930,50

AÑOS	10	11	12	13	14
Ahorro anual	2781,24	2892,49	3008,19	3128,51	3253,65
Mantenimiento	-326,19	-335,98	-346,06	-356,44	-367,13
Flujo de caja	2781,24	2892,49	3008,19	3128,51	3253,65
Flujo de caja acumulado	-44149,27	-41256,78	-38248,59	-35120,08	-31866,43

AÑOS	15	16	17	18	19
Ahorro anual	3383,80	3519,15	3659,92	3806,31	3958,57
Mantenimiento	-378,15	-389,49	-401,18	-413,21	-425,61
Flujo de caja	3383,80	3519,15	3659,92	3806,31	3958,57
Flujo de caja acumulado	-28482,63	-24963,48	-21303,56	-17497,24	-13538,68

AÑOS	20	21	22	23	24
Ahorro anual	4116,91	4281,59	4452,85	4630,96	4816,20
Mantenimiento	-438,38	-451,53	-465,07	-479,03	-493,40
Flujo de caja	4116,91	4281,59	4452,85	4630,96	4816,20
Flujo de caja acumulado	-9421,77	-5140,18	-687,33	3943,63	8759,83

AÑOS	25
Ahorro anual	5008,85
Mantenimiento	-508,20
Flujo de caja	5008,85
Flujo de caja acumulado	13768,68

Tabla 37: Desarrollo económico, a lo largo de 25 años, de la instalación sin subvención.

$$\boxed{VAN = -6.554{,}38\ euros}$$

$$\boxed{TIR = 1{,}27\ \%}$$

El valor negativo del VAN y el valor inferior a la tasa de descuento (k = 2%) del TIR, indica que la implantación de esta instalación solar térmica, sin ningún tipo de ayuda o subvención no es rentable en 25 años.

Con subvención:

AÑOS	0	1	2	3	4
Inversión inicial	-47326,94				
Ahorro anual		1954,06	2032,22	2113,51	2198,05
Mantenimiento		-250,00	-257,50	-265,23	-273,18
Flujo de caja	-47326,94	1954,06	2032,22	2113,51	2198,05
Flujo de caja acumulado	-47326,94	-45372,88	-43340,66	-41227,15	-39029,09

AÑOS	5	6	7	8	9
Ahorro anual	2285,97	2377,41	2472,51	2571,41	2674,27
Mantenimiento	-281,38	-289,82	-298,51	-307,47	-316,69
Flujo de caja	2285,97	2377,41	2472,51	2571,41	2674,27
Flujo de caja acumulado	-36743,12	-34365,71	-31893,20	-29321,79	-26647,52

AÑOS	10	11	12	13	14
Ahorro anual	2781,24	2892,49	3008,19	3128,51	3253,65
Mantenimiento	-326,19	-335,98	-346,06	-356,44	-367,13
Flujo de caja	2781,24	2892,49	3008,19	3128,51	3253,65
Flujo de caja acumulado	-23866,29	-20973,80	-17965,61	-14837,10	-11583,45

AÑOS	15	16	17	18	19
Ahorro anual	3383,80	3519,15	3659,92	3806,31	3958,57
Mantenimiento	-378,15	-389,49	-401,18	-413,21	-425,61
Flujo de caja	3383,80	3519,15	3659,92	3806,31	3958,57
Flujo de caja acumulado	-8199,65	-4680,50	-1020,58	2785,74	6744,30

AÑOS	20	21	22	23	24
Ahorro anual	4116,91	4281,59	4452,85	4630,96	4816,20
Mantenimiento	-438,38	-451,53	-465,07	-479,03	-493,40
Flujo de caja	4116,91	4281,59	4452,85	4630,96	4816,20
Flujo de caja acumulado	10861,21	15142,80	19595,65	24226,61	29042,81

AÑOS	25
Ahorro anual	5008,85
Mantenimiento	-508,20
Flujo de caja	5008,85
Flujo de caja acumulado	34051,66

Tabla 38: Desarrollo económico, a lo largo de 25 años, de la instalación con subvención

$$\boxed{VAN = 13.728{,}60\ euros}$$

$$\boxed{TIR = 3{,}94\ \%}$$

El valor positivo del VAN y el valor superior a la tasa de descuento (k = 2%) del TIR, indica que la implantación de esta instalación solar térmica, con la concesión de la subvención del 30%, sí es rentable en 25 años.