



- 1.- CONSIDERACIONES GENERALES
- 1 2.- ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA
 - 2.1.- Cálculo del consumo
 - 2.2.- Cálculo de la demanda
- 3.3.- VOLUMEN DE ACUMULACIÓN
- 4.- DISEÑO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN
 - 4.1.- Superficie de intercambio
 - 4.2.- Distancia mínima a otras filas de captadores
- 5.- CÁLCULO DE LA COBERTURA SOLAR
 - 5.1.- Presentación del método
 - 5.2.- Datos de partida
 - 5.3.- Procedimiento de cálculo
- 6.- FLUIDO DE TRABAJO DEL CIRCUITO PRIMARIO
- 7.- SUPERFICIE Y EFICIENCIA DEL INTERCAMBIADOR
 - 7.1.- Determinación superficie intercambiador
 - 7.2.- Determinación eficiencia intercambiador
- 8.- CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE APOYO
- 9.- DIMENSIONADO DEL CIRCUITO HIDRÁULICO
 - 9.1.- Circuito primario
 - 9.2.- Circuito secundario
- 10.- PÉRDIDA DE CARGA
- 11.- CÁLCULO DE LA BOMBA DEL CIRCUITO PRIMARIO
- 12.- CÁLCULO DEL VASO DE EXPANSIÓN
- 13.- AISLAMIENTO TÉRMICO DE LAS INSTALACIONES
 - 13.1.- Tuberías y accesorios
 - 13.2.- Depósitos de acumulación
 - 13.3.- Vaso de expansión
- 14.- SISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL
- 15.- ESTRUCTURA SOPORTE
- 16.- CABLEADO Y PROTECCIONES



16.1.-Cálculo del cableado

16.2.- Cálculo de las protecciones



1. CONSIDERACIONES GENERALES.

En esta memoria se detallaran los pasos para el diseño de la instalación solar térmica para la producción de agua caliente sanitaria (A.C.S.) en un conjunto de 10 viviendas unifamiliares de dos dormitorios cada una, situadas en la población de Cabeza la Vaca, provincia de Badajoz.

Este proyecto cumple con la normativa del Código Técnico de la Edificación, con la normativa local de energía y además se ha considerado el pliego de condiciones técnicas del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (I.D.A.E.), cuya fuente para datos de consumos, temperaturas y radiación es Censolar.

A continuación se presentan los resultados del dimensionado de todos los componentes de la instalación de Agua Caliente Sanitaria.

El dimensionado básico de la instalación solar define, para las bases de cálculo referentes al consumo, las aportaciones energéticas del sistema solar térmico en función de la superficie de captación, y el aporte de energía auxiliar necesario, que servirá para cubrir la parte de la demanda energética que no quede cubierta por la energía solar.

2. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA.

Los criterios de partida para dimensionar la superficie captadora son las cargas caloríficas para el calentamiento del agua caliente sanitaria y las aportaciones solares. En este apartado se obtienen dichas cargas, es decir, obtenemos la demanda energética de la instalación.

Para poder calcular esta demanda energética en primer lugar se calcula los correspondientes consumos diarios totales de A.C.S. necesarios.



2.1. CÁLCULO DE CONSUMOS DIARIOS DE A.C.S.

La determinación del consumo diario suele ser el más complicado de obtener con fiabilidad, ya que a priori no podemos determinar cual será el consumo real. En instalaciones nuevas o existentes, para las que dispongamos de datos de consumo de instalaciones similares, se utilizan dichos datos previa justificación.

En nuestro caso no disponemos de datos previos, por lo cual nos basamos en los datos extraídos del Código Técnico de la Edificación (DH4):

Criterio de demanda	Litros ACS/día a 60° C	
Viviendas unifamiliares	30	por persona
Viviendas multifamiliares	22	por persona
Hospitales y clínicas	55	por cama
Hotel ****	70	por cama
Hotel ***	55	por cama
Hotel/Hostal **	40	por cama
Camping	40	por emplazamiento
Hostal/Pensión *	35	por cama
Residencia (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
Administrativos	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 1.Demanda de referencia a 60°C.

Número de dormitorios	1	2	3	4	5	6	7	más de 7
Número de Personas	1,5	3	4	6	7	8	9	Nº de dormitorios

Tabla 2. Relación de dormitorios con el número de personas que habitan la vivienda.



El cálculo es para un bloque de 10 viviendas unifamiliares, cada una de las cuales consta de 2 habitaciones, según la tabla 2, cada vivienda constará de 3 ocupantes y según la tabla 1 se estima un consumo de 30l/día*persona, así los cálculos quedarán de la siguiente forma:

$$3 \text{ personas} * 30\text{l/día*persona} = 90 \text{ l/día}$$

$$90\text{l/día} * 10 \text{ viviendas} = 900 \text{ l/día.}$$

La instalación será centralizada por lo que debo tener en cuenta un factor de centralización que depende del número de viviendas (U.N.E. 94002):

Número de viviendas	$N \leq 3$	$4 \leq N \leq 10$	$11 \leq N \leq 20$	$21 \leq N \leq 50$	$51 \leq N \leq 75$	$76 \leq N \leq 100$	$N \geq 101$
FC	1	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70

Tabla 3. Valor del factor de centralización.

Para 10 viviendas corresponde un factor de centralización de 0,95. También se considera que al ser viviendas unifamiliares la ocupación anual será del 100%.

Por tanto, el consumo diario resultante es:

$$900\text{l/día} * 0,95 = 855 \text{ l/día}$$



2.2. CÁLCULO DE LA DEMANDA.

Para la obtención de este parámetro se deben tener en cuenta dos factores claves, la temperatura de agua de red y la temperatura de agua de consumo.

La temperatura de consumo o temperatura de agua caliente es un dato de partida que se fija según norma U.N.E.94002 y será de 45 °C.

La temperatura de agua de red corresponde a la temperatura de suministro o temperatura de agua fría. Es un dato que se obtiene tabulado en las distintas especificaciones técnicas (I.D.A.E. y U.N.E. 94002) que se adjuntan a continuación:



	Altura de referencia	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
A Coruña	5	10	10	11	12	13	14	16	16	15	14	12	11
Albacete	685	7	8	9	11	14	17	19	19	17	13	9	7
Alicante	3	11	12	13	14	16	18	20	20	19	16	13	12
Almería	16	12	12	13	14	16	18	20	21	19	17	14	12
Ávila	1128	6	6	7	9	11	14	17	16	14	11	8	6
Badajoz	185	9	10	11	13	15	18	20	20	18	15	12	9
Barcelona	18	9	10	11	12	14	17	19	19	17	15	12	10
Bilbao	19	9	10	10	11	13	15	17	17	16	14	11	10
Burgos	860	5	6	7	9	11	13	16	16	14	11	7	6
Ciomas	439	9	10	11	12	14	18	21	20	19	15	11	9
Cádiz	4	12	12	13	14	16	18	19	20	19	17	14	12
Castellón	30	10	11	12	13	15	18	19	20	18	16	12	11
Costa	0	11	11	12	13	14	16	18	18	17	15	13	12
Ciudad Real	635	7	8	10	11	14	17	20	20	17	13	10	7
Córdoba	123	10	11	12	14	16	19	21	21	19	16	12	10
Cuenca	1001	6	7	8	10	13	16	18	18	16	12	9	7
Girona	75	8	9	10	11	14	16	19	18	17	14	10	9
Granada	685	8	9	10	12	14	17	20	19	17	14	11	8
Guadalajara	679	7	8	9	11	14	17	19	19	16	13	9	7
Huelva	56	12	12	13	14	16	18	20	20	19	17	14	12
Huesca	488	7	8	10	11	14	16	19	18	17	13	9	7
Jáen	574	9	10	11	13	16	19	21	21	19	15	12	9
Las Palmas de Gran Canaria	8	15	15	16	16	17	18	19	19	19	18	17	16
León	838	6	6	8	9	12	14	16	16	15	11	8	6
Lleida	155	7	9	10	12	15	17	20	19	17	14	10	7
Logroño	384	7	8	10	11	13	16	18	18	16	13	10	8
Lugo	454	7	8	9	10	11	13	15	15	14	12	9	8
Madrid	655	8	8	10	12	14	17	20	19	17	13	10	8
Málaga	8	12	12	13	14	16	18	20	20	19	16	14	12
Melilla	2	12	13	13	14	16	18	20	20	19	17	14	13
Múrcia	42	11	11	12	13	15	17	19	20	18	16	13	11
Ourense	139	8	10	11	12	14	16	18	18	17	13	11	9
Oviedo	232	9	9	10	10	12	14	15	16	15	13	10	9

(Continúa)



	Altura de referencia	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Palencia	740	6	7	8	10	12	15	17	17	15	12	9	6
Palma de Mallorca	34	11	11	12	13	15	18	20	20	19	17	14	12
Pamplona	449	7	8	9	10	12	15	17	17	16	13	9	7
Pontevedra	290	10	11	11	13	14	16	17	17	16	14	12	10
Salamanca	800	6	7	8	10	12	15	17	17	15	12	8	6
San Sebastián	40	9	9	10	11	12	14	16	16	15	14	11	9
Santa Cruz de Tenerife	4	15	15	16	16	17	18	20	20	20	18	17	16
Santander	15	10	10	11	11	13	15	16	16	16	14	12	10
Segovia	1001	6	7	8	10	12	15	18	18	15	12	8	6
Sevilla	12	11	11	13	14	16	19	21	21	20	16	13	11
Soria	1063	5	6	7	9	11	14	17	16	14	11	8	6
Tarragona	51	10	11	12	14	16	18	20	20	19	16	12	11
Teruel	915	6	7	8	10	12	15	18	17	15	12	8	6
Toledo	529	8	9	11	12	15	18	21	20	18	14	11	8
Valencia	13	10	11	12	13	15	17	19	20	18	16	13	11
Valladolid	691	6	8	9	10	12	15	18	18	16	12	9	7
Vitoria-Gasteiz	525	7	7	8	10	12	14	16	16	14	12	8	7
Zamora	649	6	8	9	10	13	16	18	18	16	12	9	7
Zaragoza	200	8	9	10	12	15	17	20	19	17	14	10	8

Tabla 4. Altura de referencia (m) y Temperatura diaria media mensual de red para las distintas capitales de provincia.

La fórmula para la obtención de la demanda energética diaria para cada uno de los meses del año es la siguiente:

$$L = M \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot N$$

Donde,

L= demanda energética diaria.

M= consumo diario.

ρ = densidad del fluido a calentar, es decir, densidad del agua ya que se trata de una instalación para A.C.S, cuyo valor es 1 kg/l.



c_p = calor específico del agua, cuyo valor es, 4190 J/kg°C.

ΔT = salto térmico necesario:

$$\Delta T = (T_{\text{consumo}} - T_{\text{red}})$$

$$T_{\text{consumo}} = 60^\circ\text{C}.$$

T_{red} = será calculada posteriormente.

N = número de días del mes en cuestión.

La localidad en la cual se va a realizar el proyecto pertenece a la provincia de Badajoz y tiene una altitud de 751m por lo que debo realizar unas correcciones para hallar la temperatura de red correcta.

Para ello empleo la siguiente fórmula:

$$T_{\text{AFY}} = T_{\text{AFCP}} - B \cdot \Delta z$$

Donde,

T_{AFY} = temperatura de agua fría diaria media mensual.

T_{AFCP} = temperatura de agua fría de la capital de provincia correspondiente.

Δz = diferencia de altura entre capital de provincia y localidad.

$$H_{\text{Badajoz}} = 186 \text{ m}.$$

$$H_{\text{Cabeza la Vaca}} = 759 \text{ m}.$$

$$\Delta z = 759 - 186 = 573 \text{ m}$$

B = Es una constante que toma dos valores diferentes según los meses.



$B = 0,0066$, de Octubre a Marzo.

$B = 0,0033$, de Abril a Septiembre.

Con este procedimiento de cálculo se encuentra cuantificada la energía demandada por la instalación mes a mes.

	Días	Consumo mensual a 60°C (litros/día)	Temperatura agua de red (°C)	Salto térmico ΔT (°C)	Demanda energética mensual (MJ)
Enero	31	855	5,2	54,8	6085,7
Febrero	28	855	6,2	53,8	5396,6
Marzo	31	855	7,2	52,8	5863,7
Abril	30	855	11,1	48,9	5255,4
Mayo	31	855	13,1	46,9	5208,5
Junio	30	855	16,1	43,9	4718,1
Julio	31	855	18,1	41,9	4653,2
Agosto	31	855	18,1	41,9	4653,2
Septiembre	30	855	16,1	43,9	4718,1
Octubre	31	855	11,2	48,8	5419,5
Noviembre	30	855	8,2	51,8	5567,1



Diciembre	31	855	5,2	54,8	6085,7
-----------	----	-----	-----	------	--------

Tabla 5.Energía demandada por la instalación.

3. VOLUMEN DE ACUMULACIÓN.

Nos decantamos por una instalación por circulación forzada indirecta y centralizada, por los siguientes motivos:

- Se trata de una zona con fuerte radiación solar en la época estival, unido a la disminución del consumo en ese periodo, se aconseja disponer de circulación forzada y presurizada en el circuito cerrado del primario, para aumentar la protección del sistema ante las sobre-temperaturas que se puedan producir.
- La elección del sistema indirecto se ha hecho en bases a dos criterios fundamentales. El primero es que para instalaciones ubicadas en zonas con riesgo de heladas, están desaconsejados los sistemas directos, y el segundo criterio para decidir este sistema de intercambio es la calidad del agua, vuelve a estar desaconsejado los sistemas directos donde hay problemas de dureza en el agua.
- Se ha elegido un sistema de acumulación centralizado; se instalará por tanto un único sistema de acumulación que abastecerá la demanda de los puntos de consumo.

El fluido caloportador estará compuesto por una mezcla de agua y anticongelante y cederá su calor al agua de consumo, acumulada en un depósito, a través de un sistema de intercambio.

Se determinará el volumen de acumulación en base al cálculo realizado en el punto 2.1,

$$V= 855 \text{ l.}$$



Según I.D.A.E. el valor del volumen del acumulador se recomienda que sea aproximadamente la carga del consumo diario.

$$V=M= 855 \text{ l.}$$

Según aconseja la guía técnica de Instalación Solar, se permite acumular el 20% del volumen de agua de consumo, lo que me da como resultado un volumen de 1026 litros.

$$1 < V/M < 1,2$$

Siendo V, volumen del depósito de acumulación solar (l).

M, demanda del edificio en l/día, en nuestro caso, 855 l/día.

El volumen del acumulador será de 1000 litros ya que es el que más se aproxima a la necesidad.

$$V=1000 \text{ l.}$$

El acumulador será de la empresa Baeza, S.A. modelo HERA IEC (Familia 1124) Interacumulador vertical para la producción y acumulación de Agua Caliente Sanitaria con serpentín tubular extraíble en COBRE ESTAÑADO.

- Tratamiento interno VITRIFICADO, resistentes a la corrosión e idóneos para contener agua sanitaria.
- Presión máxima de trabajo acumulador: 8bar.
- Temperatura máxima de trabajo acumulador: 95° C.
- Presión máxima de trabajo intercambiador: 10bar.
- Temperatura máxima de trabajo intercambiador: 130° C (junta de aislamiento 85° C).
- Aislamiento: Espuma de poliuretano flexible de 100 mm.de espesor acabado en funda de PVC (se suministra desmontado).
- Boca DN 420.



- Protección contra la corrosión mediante ánodos de magnesio.

4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN.

4.1. SUPERFICIE DE CAPTACIÓN

Para definir la superficie de captación de la instalación de energía solar térmica en cuestión, debemos elegir el tipo de captador solar térmico que se instalará.

Se opta por el modelo de captadores planos selectivos “Calorama 2309 VS”, cuyos datos técnicos son los siguientes:

Captadores solares planos SELECTIVOS con estructura MONOCASCO hermética, con respiraderos e inalterable a las agresiones del medio ambiente.

- Área total: 2,30 m².

- Área del absorbedor: 2 m².

- Tratamiento SELECTIVO de ÓXIDO DE TITANIO.

- Cubierta de vidrio templado extraclaro de 3,2 mm de espesor y bajo contenido en Fe.

- Aislamiento térmico de lana mineral de elevado espesor y alta densidad.

- Rendimientos térmicos:

$$N_0 = 0,810.$$

$$A_1 = 3,956 \text{ W/ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Una vez elegido el modelo, se determina el número de captadores que se instalarán, sabiendo que el campo solar debe estar formado por captadores todos del mismo modelo que deben de poder agruparse en baterías o hileras del mismo número para un buen equilibrado de la red hidráulica.



Así, en primer lugar debo determinar el área de captación, y lo haré en base a las limitaciones dada por el Código Técnico de la Edificación (DH 4):

$$50 \leq V/A \leq 180$$

Y el Reglamento Instalaciones Térmicas en los Edificios (R.I.T.E):

$$1,25 < 100 * A/M < 2$$

Según el Pliego de Condiciones Técnicas (I.D.A.E) para instalaciones con fracciones solares bajas, se deberá considerar el uso de relaciones V/A pequeñas y para instalaciones con fracciones solares elevadas se deberá aumentar dicha relación. Considerando fracciones solares a la cantidad media de horas de sol diarias según la latitud y altitud, se considera que la zona donde se ubicarán las viviendas tiene una fracción solar elevada ya que según DH4 corresponde a la zona IV.

Así partiendo de la ecuación dada por R.I.T.E. obtengo un área de:

$$A_1 = 10,7 \text{ m}^2.$$

$$A_2 = 17,1 \text{ m}^2.$$

Aplicando los dos valores obtenidos en el intervalo dado por DH_4:

Obtengo:

$$A_1 \text{ una relación } V/A = 93,6 \text{ l/m}^2$$

$$A_2 \text{ una relación } V/A = 58,5 \text{ l/m}^2$$



Según lo explicado anteriormente tomaré el valor de área cuya relación V/A sea más alta, es decir, tomo el área de 10,7 m, lo que conllevaría un número de 6 captadores CALORAMA 2309-VS.

Se agruparan en una única batería de seis captadores, conexiados entre ellos en serie.

Una vez definido el número de captadores hay que definir la inclinación y orientación adecuadas para un óptimo aprovechamiento de la radiación solar.

La variación de la orientación se entiende como que la mejor opción es la orientación sur pura, pero pequeñas oscilaciones de $\pm 15^\circ$ no alteran de manera significativa la radiación global recibida por los captadores a lo largo del día.

Con la inclinación sucede que, siendo la latitud la opción de inclinación más favorable a lo largo del año, se admiten variaciones de -10° para instalaciones de marcado uso estival y $+10^\circ$ para instalaciones de marcado uso invernal. Con esto lo que se persigue es el conseguir una inclinación del captador de forma que la radiación llegue a él lo más perpendicular posible en la época del año que más demanda energética se tiene.

Dado que la latitud de Cabeza la Vaca es de $38,5^\circ$ se tomará una inclinación para los captadores de 45° . Con esto se penalizará la captación en los meses de verano en pos de obtener algo más de energía en los meses de invierno.

La orientación que se dará a los colectores tiene una variación norte-sur de 0° para tratar de aprovechar al máximo la radiación solar disponible a lo largo de todo el año.

4.2. DISTANCIA MÍNIMA ENTRE FILAS DE CAPTADORES.

En nuestro caso, se trata de una única fila de captadores pero debemos prever una futura ampliación de la instalación debido a un aumento de necesidades, por lo cual, ha de calcularse la distancia mínima a la que podría colocarse otra hilera de captadores detrás, de tal forma que no se arrojasen sombras entre ellas.



Así, para captadores de longitud “L” inclinados una inclinación “s” se determina su altura:

$$H = L \cdot \sin s$$

Donde:

$$L = 2,1\text{m.}$$

$$S = 45^\circ.$$

Obtenemos una altura “h” de 1,5m.

La separación mínima entre hileras viene dada por la siguiente expresión:

$$D = k \cdot h$$

Donde k es un coeficiente que depende del grado de inclinación de los captadores:

Inclinación (°C)	20	25	30	35	40	45	50	55
Coeficiente K	1,532	1,638	1,732	1,813	1,879	1,932	1,970	1,992

Tabla 6. Relación inclinación –coeficiente k.

Para 45° de inclinación el valor k correspondiente es 1,932.

Así el cálculo de la distancia entre filas de captadores será el siguiente:

$$D = 1,932 \cdot 1,5 = 2,9 \text{ m}$$



5. CÁLCULO DE LA COBERTURA SOLAR.

Para el dimensionado de las instalaciones de energía solar térmica se tienen distintas opciones. Una de ellas es utilizar programas informáticos para el cálculo de la cobertura solar, el utilizado en este proyecto será “el método de las curvas f ” más conocido como F-Chart, lo que resulta un procedimiento de cálculo simplificado pues está basado en datos diarios medios mensuales. Este método permite obtener la cobertura solar, es decir, la contribución a la aportación de calor necesario para cubrir las cargas térmicas, y el rendimiento medio de una instalación de energía solar en un largo periodo de tiempo.

5.1. PRESENTACIÓN DEL MÉTODO.

El método F-Chart es un modelo para analizar y dimensionar instalaciones solares térmicas. Es un programa muy extendido para dimensionar instalaciones de ACS. Está basado en correlaciones obtenidas de múltiples datos experimentales y aporta resultados anuales bastante adecuados.

El resultado final del método es la fracción solar, definida como el cociente entre la cantidad de energía aportada por la instalación solar en un período de tiempo determinado y la demanda energética en ese mismo período. A partir de ese valor, y conociendo la demanda total de energía durante dicho período, se puede calcular la cantidad de energía térmica aportada por la instalación solar.

El esquema básico de una instalación de agua caliente sanitario utilizada por el modelo es el siguiente:

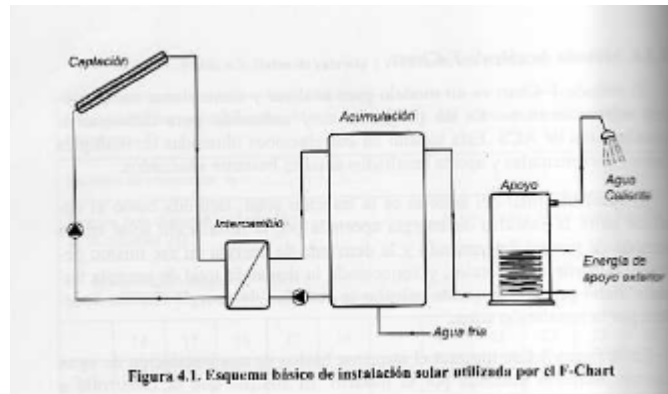


Figura 1. Esquema básico de instalación solar para F-Chart.

El modelo F-Chart presenta tres restricciones:

- 1- Sistemas de calefacción y ACS, tal que el ACS representa una carga menor al 20% de calefacción.
- 2- Sistemas sin intercambiador de calor en el sistema de acumulación.
- 3- Sistemas con una capacidad de acumulación de 75l/m^2 de superficie de captación.

Para entrar dentro de la 3ª restricción debemos hacer una corrección en el valor del área que pasaría a ser de 13,3 m.

Y comprobado que cumple la normativa del DH4, queda como área final= 13,3m.

La forma de utilizar el método es la siguiente:

Una vez sabido como cuantificar la energía solar captada y la energía demandada por la instalación, el método F-Chart define a continuación el rendimiento del sistema como la fracción solar (f):



$$F = Q_T / L$$

Donde,

Q_T , energía solar captada (J/mes).

L , demanda térmica (J/mes).

Como es en base mensual, para cada mes se calcula la energía útil captada por el sistema solar, multiplicado las cargas caloríficas por el rendimiento “f” característico del método. Este rendimiento tendrá un valor mensual en función de dos parámetros adimensionales, D_1 y D_2 asociados a las pérdidas y ganancias en el sistema. En estos parámetros se incluirán las correcciones que el método requiere.

La expresión para “f” es la siguiente:

$$F = 1,029 D_1 - 0,065 D_2 - 0,0245 D_1^2 - 0,0018 D_2^2 + 0,0215 D_1^3$$

Donde,

D_1 , parámetro asociado a las ganancias.

D_2 , parámetro asociado a las pérdidas.

La variable D_2 representa la relación entre las pérdidas del captador para una temperatura de referencia respecto de la carga térmica, mientras que la variable D_1 representa la relación entre la energía solar absorbida y la misma carga térmica.

Una vez obtenidos D_1 y D_2 , aplicando esta ecuación se calcula la fracción de la carga calorífica mensual aportada por el sistema de energía solar.

De esta forma, la energía útil captada cada mes tiene el valor:



$$Q_u = f * Q_a$$

Donde,

Q_a , carga calorífica mensual de ACS.

Mediante igual proceso operativo que el desarrollado para un mes, se operará para todos los meses del año. La relación entre la suma de las coberturas mensuales y la suma de las cargas caloríficas, o necesidades mensuales de calor, determinará la cobertura anual del sistema:

$$\text{Cobertura}_{\text{anual}} = \sum_{u=1}^{u=12} Q_{u\text{necesaria}} / \sum_{u=1}^{u=12} Q_{a\text{ necesaria}}$$

5.2. DATOS DE PARTIDA.

Los datos que el método de cálculo requiere se pueden clasificar en tres grupos:

- Datos relativos al consumo, los cuales, serán las cargas caloríficas calculadas en el punto 2 para cada mes del año.
- Datos técnicos del captador, vendrán facilitados por el fabricante, y los parámetros claves necesarios para el cálculo son:
 - Área útil.
 - Rendimiento óptico.
 - Coeficiente de pérdidas.
 - Largo y ancho de los colectores.
 - Diámetro del tubo colector.
 - Volumen del fluido que contendrá cada captador.



- Radiación solar incidente en el campo de captación. Dato que calculamos a continuación:

Se partirá del valor de la radiación en MegaJulios que incide sobre un metro cuadrado de superficie horizontal en un día medio de cada mes, tabulados en CENSOLAR para cada mes en las distintas provincias.

Al estar los captadores en cuestión inclinados un determinado ángulo, esta radiación estará multiplicada por un factor de corrección k , que representa el cociente entre la energía total incidente en un día sobre una superficie orientada hacia el ecuador e inclinada un determinado ángulo, y otra horizontal. Este factor se encuentra también tabulado en CENSOLAR, según distintas latitudes e inclinaciones para cada mes del año.

A continuación se exponen dichas tablas:



LATITUD = 39 °

Incli.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1.07	1.06	1.04	1.03	1.02	1.01	1.02	1.03	1.05	1.07	1.09	1.08
10	1.14	1.11	1.08	1.05	1.03	1.02	1.03	1.06	1.1	1.14	1.17	1.16
15	1.19	1.16	1.11	1.07	1.03	1.02	1.03	1.07	1.13	1.2	1.24	1.23
20	1.25	1.2	1.14	1.07	1.03	1.01	1.03	1.08	1.16	1.25	1.31	1.29
25	1.29	1.23	1.15	1.07	1.02	1	1.02	1.08	1.18	1.29	1.36	1.35
30	1.31	1.25	1.16	1.07	1	.97	1	1.08	1.19	1.33	1.41	1.4
35	1.35	1.27	1.16	1.05	.97	.94	.98	1.06	1.2	1.35	1.45	1.43
40	1.37	1.27	1.15	1.03	.94	.91	.94	1.04	1.19	1.37	1.48	1.46
45	1.38	1.27	1.14	1	.9	.87	.9	1.01	1.18	1.37	1.5	1.48
50	1.39	1.26	1.12	.97	.86	.82	.86	.98	1.16	1.37	1.51	1.5
55	1.38	1.25	1.09	.93	.81	.77	.81	.94	1.13	1.36	1.51	1.5
60	1.37	1.22	1.05	.88	.75	.71	.75	.89	1.1	1.34	1.51	1.49
65	1.35	1.19	1.01	.83	.69	.65	.69	.83	1.05	1.31	1.49	1.47
70	1.32	1.15	.96	.77	.63	.58	.63	.77	1	1.27	1.46	1.45
75	1.28	1.11	.91	.7	.56	.51	.56	.71	.95	1.23	1.42	1.41
80	1.23	1.06	.84	.64	.49	.43	.48	.64	.88	1.17	1.37	1.37
85	1.18	1	.78	.58	.41	.35	.41	.56	.81	1.11	1.32	1.32
90	1.12	.93	.71	.49	.33	.28	.33	.49	.74	1.04	1.25	1.26

Tabla 7. Valor k según la latitud e inclinación de las placas.



Tabla 8. Energía en megajulios que incide sobre un metro cuadrado de superficie horizontal en un día medio de cada mes.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO
1 ÁLAVA	4,6	6,9	11,2	13	14,8	16,6	18,1	17,3	14,3	9,5	5,5	4,1	11,3
2 ALBACETE	6,7	10,5	15	19,2	21,2	25,1	26,7	23,2	18,8	12,4	8,4	6,4	16,1
3 ALICANTE	8,5	12	16,3	18,9	23,1	24,8	25,8	22,5	18,3	13,6	9,8	7,6	16,8
4 ALMERÍA	8,9	12,2	16,4	19,6	23,1	24,6	25,3	22,5	18,5	13,9	10	8	16,9
5 ASTURIAS	5,3	7,7	10,6	12,2	15	15,2	16,8	14,8	12,4	9,8	5,9	4,6	10,9
6 ÁVILA	6	9,1	13,5	17,7	19,4	22,3	26,3	25,3	18,8	11,2	6,9	5,2	15,1
7 BADAJOZ	6,5	10	13,6	18,7	21,8	24,6	25,9	23,8	17,9	12,3	8,2	6,2	15,8
8 BALEÁRES	7,2	10,7	14,4	16,2	21	22,7	24,2	20,6	16,4	12,1	8,5	6,5	15
9 BARCELONA	6,5	9,5	12,9	16,1	18,6	20,3	21,6	18,1	14,6	10,8	7,2	5,8	13,5
10 BURGOS	5,1	7,9	12,4	16	18,7	21,5	23	20,7	16,7	10,1	6,5	4,5	13,6
11 CÁCERES	6,8	10	14,7	19,6	22,1	25,1	28,1	25,4	19,7	12,7	8,9	6,6	16,6
12 CÁDIZ	8,1	11,5	15,7	18,5	22,2	23,8	25,9	23	18,1	14,2	10	7,4	16,5
13 CANTABRIA	5	7,4	11	13	16,1	17	18,4	15,5	13	9,5	5,8	4,5	11,3
14 CASTELLÓN	8	12,2	15,5	17,4	20,6	21,4	23,9	19,5	16,6	13,1	8,6	7,3	15,3
15 CEUTA	8,9	13,1	18,6	21	24,3	26,7	26,8	24,3	19,1	14,2	11	8,6	18,1
16 CIUDAD REAL	7	10,1	15	18,7	21,4	23,7	25,3	23,2	18,8	12,5	8,7	6,5	15,9
17 CÓRDOBA	7,2	10,1	15,1	18,5	21,8	25,9	28,5	25,1	19,9	12,6	8,6	6,9	16,7
18 LA CORUÑA	5,4	8	11,4	12,4	15,4	16,2	17,4	15,3	13,9	10,9	6,4	5,1	11,5
19 CUENCA	5,9	8,8	12,9	17,4	18,7	22	25,6	22,3	17,5	11,2	7,2	5,5	14,6
20 GERONA	7,1	10,5	14,2	15,9	18,7	19	22,3	18,5	14,9	11,7	7,8	6,6	13,9
21 GRANADA	7,8	10,8	15,2	18,5	21,9	24,8	26,7	23,6	18,8	12,9	9,6	7,1	16,5
22 GUADALAJARA	6,5	9,2	14	17,9	19,4	22,7	25	23,2	17,8	11,7	7,8	5,6	15,1
23 GUIPÚZCOA	5,5	7,7	11,3	11,7	14,6	16,2	16,1	13,6	12,7	10,3	6,2	5	10,9
24 HUELVA	7,6	11,3	16	19,5	24,1	25,6	28,7	25,6	21,2	14,5	9,2	7,5	17,6
25 HUESCA	6,1	9,6	14,3	18,7	20,3	22,1	23,1	20,9	16,9	11,3	7,2	5,1	14,6
26 JAÉN	6,7	10,1	14,4	18	20,3	24,4	26,7	24,1	19,2	11,9	8,1	6,5	15,9
27 LEÓN	5,8	8,7	13,8	17,2	19,5	22,1	24,2	20,9	17,2	10,4	7	4,8	14,3
28 LÉRIDA	6	9,9	18	18,8	20,9	22,6	23,8	21,3	16,8	12,1	7,2	4,8	15,2
29 LUGO	5,1	7,6	11,7	15,2	17,1	19,5	20,2	18,4	15	9,9	6,2	4,5	12,5
30 MADRID	6,7	10,6	13,6	18,8	20,9	23,5	26	23,1	16,9	11,4	7,5	5,9	15,4
31 MÁLAGA	8,3	12	15,5	18,5	23,2	24,5	26,5	23,2	19	13,6	9,3	8	16,8
32 MELILLA	9,4	12,6	17,2	20,3	23	24,8	24,8	22,6	18,3	14,2	10,9	8,7	17,2
33 MURCIA	10,1	14,8	16,6	20,4	24,2	25,6	27,7	23,5	18,6	13,9	9,8	8,1	17,8
34 NAVARRA	5	7,4	12,3	14,5	17,1	18,9	20,5	18,2	16,2	10,2	6	4,5	12,6
35 ORENSE	4,7	7,3	11,3	14	16,2	17,6	18,3	16,6	14,3	9,4	5,6	4,3	11,6
36 PALENCIA	5,3	9	13,2	17,5	19,7	21,8	24,1	21,6	17,1	10,9	6,6	4,6	14,3
37 LAS PALMAS	11,2	14,2	17,8	19,6	21,7	22,5	24,3	21,9	19,8	15,1	12,3	10,7	17,6
38 PONTEVEDRA	5,5	8,2	13	15,7	17,5	20,4	22	18,9	15,1	11,3	6,8	5,5	13,3
39 LA RIOJA	5,6	8,8	13,7	16,6	19,2	21,4	23,3	20,8	16,2	10,7	6,8	4,8	14
40 SALAMANCA	6,1	9,5	13,5	17,1	19,7	22,8	24,6	22,6	17,5	11,3	7,4	5,2	14,8
41 STA. C. DE TENERIFE	10,7	13,3	18,1	21,5	25,7	26,5	29,3	26,6	21,2	16,2	10,8	9,3	19,1
42 SEGOVIA	5,7	8,8	13,4	18,4	20,4	22,6	25,7	24,9	18,8	11,4	6,8	5,1	15,2
43 SEVILLA	7,3	10,9	14,4	19,2	22,4	24,3	24,9	23	17,9	12,3	8,8	6,9	16
44 SORIA	5,9	8,7	12,8	17,1	19,7	21,8	24,1	22,3	17,5	11,1	7,6	5,6	14,5
45 TARRAGONA	7,3	10,7	14,9	17,6	20,2	22,5	23,8	20,5	16,4	12,3	8,8	6,3	15,1
46 TERUEL	6,1	8,8	12,9	16,7	18,4	20,6	21,8	20,7	16,9	11	7,1	5,3	13,9
47 TOLEDO	6,2	9,5	14	19,3	21	24,4	27,2	24,5	18,1	11,9	7,6	5,6	15,8
48 VALENCIA	7,6	10,6	14,9	18,1	20,6	22,8	23,8	20,7	16,7	12	8,7	6,6	15,3
49 VALLADOLID	5,5	8,8	13,9	17,2	19,9	22,6	25,1	23	18,3	11,2	6,9	4,2	14,7
50 VIZCAYA	5	7,1	10,8	12,7	15,5	16,7	17,9	15,7	13,1	9,3	6	4,6	11,2
51 ZAMORA	5,4	8,9	13,2	17,3	22,2	21,6	23,5	22	17,2	11,1	6,7	4,6	14,5
52 ZARAGOZA	6,3	9,8	15,2	18,3	21,8	24,2	25,1	23,4	18,3	12,1	7,4	5,7	15,6



Se tomarán para Cabeza la Vaca los valores de la tabla correspondientes a 39° de latitud y 45° de inclinación.

A continuación se muestra el cálculo de la radiación interceptada por el campo de captadores para el mes de Enero:

$$Rad_{sup.inclinada} = Rad_{sup.horizontal} * K = 6,5 MJ / m^2 \cdot día * 1,38 = 8,97 MJ / m^2 \cdot día$$

Y teniendo en cuenta el área de captación y el periodo de tiempo considerado se llega a

$$Rad_{sup.inclinada} = 8,97 MJ / m^2 \cdot día * 13,3 m^2 * 31 días = 3698,33 MJ$$

	Radiación sobre superficie horizontal Badajoz(MJ/m ² día)	Factor k	Radiación sobre superficie inclinada(MJ/m ² día)	Radiación sobre superficie inclinada(MJ)
Enero	6,5	1,38	8,97	3698,3
Febrero	10	1,27	12,7	4729,5
Marzo	13,6	1,14	15,5	6390,6
Abril	18,7	1	18,7	7461,3
Mayo	21,8	0,9	19,6	8081,1
Junio	24,6	0,87	21,4	8538,6
Julio	25,9	0,9	23,3	9606,6
Agosto	23,8	1,01	24,03	9907,6
Septiembre	17,9	1,18	21,12	8426,9



Octubre	12,3	1,37	16,8	6926,6
Noviembre	8,2	1,5	12,3	4907,7
Diciembre	6,2	1,48	9,2	3793,2

Tabla 9. Radiación superficie inclinada.

5.3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO.

Para la obtención de la cobertura solar mes a mes la secuencia de cálculo será la siguiente, desarrollada para el mes de enero:

- Cálculo del parámetro D_1 .

El parámetro D_1 expresa la relación entre la energía absorbida por la placa del captador plano y la carga calorífica total de calentamiento durante un mes:

$D_1 = \text{Energía absorbida} / \text{Carga calorífica.}$

La energía absorbida por el captador viene dada por la siguiente expresión:

$$E_a = S_c * F_r(\tau\alpha) * R_1 * N$$

Donde,

$S_c = \text{Superficie de captación (m}^2\text{)} \rightarrow S_c = 13,3 \text{ m}^2$

$R_1 = \text{Radiación media mensual incidente sobre la superficie de captación (MJ/m}^2\text{*día)}$

$N = \text{Número de días del mes.}$

$F_r(\tau\alpha) = \text{Factor adimensional, que viene dado por la siguiente expresión:}$

$$F_r(\tau\alpha) = F_r(\tau\alpha)_n * [(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n] * (F_r / F_r)$$



donde:

$F_r(\tau\alpha)_n$ = Factor de eficiencia óptica del captador $\rightarrow F_r(\tau\alpha)_n = 0,810$

$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ = Modificador del ángulo de incidencia. En general se toma como constante 0,96 para superficie transparente sencilla (Valor recomendado por CENSOLAR).

F_r / F_r = Factor de corrección del conjunto captador-intercambiador. Se tomará el valor recomendado 0,95.

Con esto el factor adimensional toma el valor:

$$F_r(\tau\alpha) = 0,810 * 0,96 * 0,95 = 0,74.$$

Así, la Energía absorbida por el captador será:

$$E_a = 13,3 \text{ m}^2 * 0,74 * 8,97 \text{ MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{día} * 31 \text{ día} (\text{MJ}) = 2736,8 \text{ MJ (Enero)}$$

$$D_1 (\text{Enero}) = E_a / \text{Carga calorífica} = 2736,8 / 6085,7 = 0,45$$

- Cálculo parámetro D_2

El parámetro D_2 expresa la relación entre las pérdidas de energía en el captador, para una determinada temperatura, y la carga calorífica de calentamiento durante un mes:

$$D_2 = \text{Energía perdida} / \text{Carga calorífica}$$

La Energía perdida por el captador viene dada por la siguiente expresión:

$$E_p = S_c * F_r * U_L * (100 - t_a) * \Delta t * K_1 * K_2$$

donde:

$$S_c = \text{Superficie de captación (m}^2) \rightarrow S_c = 13,3 \text{ m}^2$$



$$Fr_{UL} = Fr_{UL} * (Fr / Fr)$$

$$(Fr / Fr) = 0,95$$

Fr_{UL} = Pendiente de la curva característica del captador (coeficiente global de pérdidas) $\rightarrow Fr_{UL} = 3,956 \text{ W/m}^2\text{°C}$

T_a = Temperatura ambiente media mensual

Δt = Período de tiempo considerado (segundos):

$$\Delta t = 31 \text{ días} * 24 \text{ h} / 1 \text{ día} * 3600 \text{ s} / 1 \text{ h} = 2678400 \text{ s}$$

K_1 = Factor de corrección adimensional, por almacenamiento, que se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$K_1 = [Acumulación (kg) / (75 \text{ Kg} / m \cdot S_c (kg))]^{-0,25}$$

Siempre que $37,5 < (\text{kg acum.}) / (m \text{ captador}) < 300$.

$$K_1 = [1000 / (75 * 13,39)]^{-0,25} = 0,99 \sim 1,00$$

K_2 = Factor de corrección adimensional, para ACS, que relaciona la temperatura de consumo de ACS, la del agua de red y la media mensual ambiente, dado por la siguiente expresión:

$$K_2 = (11,6 + 11,8 * t_{\text{consumo}} + 3,86 * t_{\text{red}} - 2,32 * t_{\text{ambiente}}) / (100 - t_{\text{ambiente}})$$

Donde,

$$T_{\text{consumo}} = 60^\circ\text{C}$$

	Temperatura de red (°C)	Temperatura ambiente media mensual (°C)
Enero	5,2	10,2
Febrero	6,2	12,1



Marzo	7,2	12,9
Abril	11,1	16,2
Mayo	13,1	17,5
Junio	16,1	23,7
Julio	18,1	25,4
Agosto	18,1	25,5
Septiembre	16,1	22,2
Octubre	11,2	17,5
Noviembre	8,2	10,5
Diciembre	5,2	8,9

Tabla 10. Temperatura media mensual de red y del medio.

Determinación del rendimiento “f” y energía solar útil:

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

La energía solar útil captada vendrá determinada por la siguiente expresión:

$$Q_u= f*Q_a$$

Donde Q_a , es la carga calorífica.

Operando con las anteriores expresiones para cada mes del año se determinan las fracciones de energía útil. Los resultados y parámetros principales se presentan en las siguientes tablas:



	Días	Temperatura de red (°C)	Temperatura ambiente(°C)	Q _a (MJ)	Radiación (MJ/m ² *día)
Enero	31	5,2	10,2	6085,7	8,97
Febrero	28	6,2	12,1	5396,6	12,7
Marzo	31	7,2	12,9	5863,7	15,5
Abril	30	11,1	16,2	5255,4	18,7
Mayo	31	13,1	17,5	5208,5	19,6
Junio	30	16,1	23,7	4718,1	21,4
Julio	31	18,1	25,4	4653,2	23,3
Agosto	31	18,1	25,5	4653,2	24,0
Septiembre	30	16,1	22,2	4718,1	21,1
Octubre	31	11,2	17,5	5419,5	16,8
Noviembre	30	8,2	10,5	5567,1	12,3
Diciembre	31	5,2	8,9	6085,7	9,2

Tabla 11.Datos de partida.



	Δt (segundos)	K_2	D_1	D_2	F	Q_u (MJ)
Enero	2678400	0,8775	0,45	1,73	0,36	2190,85
Febrero	2419200	0,8903	0,65	1,75	0,46	2468,63
Marzo	2678400	0,9215	0,80	1,83	0,56	3283,68
Abril	2592000	1,050	1,05	2,16	0,70	3678,80
Mayo	2678400	1,120	1,15	2,37	0,75	3906,40
Junio	2592000	1,174	1,34	2,45	0,84	3963,20
Julio	2678400	1,251	1,53	2,68	0,92	4281,00
Agosto	2678400	1,252	1,58	2,68	0,94	4374,00
Septiembre	2592000	1,200	1,32	2,55	0,83	3916,02
Octubre	2678400	1,030	0,94	2,10	0,64	3468,50
Noviembre	2592000	1,002	0,65	2,08	0,44	2449,52
Diciembre	2678400	0,900	0,46	1,80	0,31	1886,6

Tabla 12. Cálculo de parámetros y resultados del método.

A continuación se muestran los resultados más relevantes del balance energético y del análisis porcentual del sistema de energía solar en estudio.

Como podemos observar, la instalación de energía solar diseñada para el bloque de 10 viviendas situadas en Cabeza la Vaca tiene un aporte solar global anual del 64,6 % con lo que se cumple lo indicado en la normativa que para zona climática IV, que es la zona



a la que corresponde Cabeza la Vaca, la normativa requiere que el aporte solar sea del 60%.

Podemos apreciar que en meses como Julio o Agosto el aporte solar es bastante elevado, mientras que en otros como Diciembre o Enero aparece un alto déficit de energía que habrá de verse compensado mediante el aporte de energía auxiliar convencional.

Este aporte se calcula como la diferencia entre la energía demandada y la energía captada con el sistema solar.

Además, como también se pone de manifiesto en los gráficos, no existe ningún exceso de energía captada en ninguno de los meses del año, con lo que la instalación está bien diseñada para evitar excesos y los sobrecalentamientos que de estos se derivan.

	Energía demandada (MJ)	Energía solar disponible (MJ)	Energía solar captada (MJ)	Energía auxiliar aportada (MJ)	Cobertura solar (%)
Enero	6085,7	3698,3	2190,8	3894,8	36
Febrero	5396,6	4729,5	2468,6	2928,0	46
Marzo	5863,7	6390,6	3283,7	2580,0	56
Abril	5255,4	7461,3	3678,8	1576,6	70
Mayo	5208,5	8081,1	3906,4	1302,1	75
Junio	4718,1	8538,6	3963,2	754,9	84
Julio	4653,2	9606,6	4281,0	372,2	92
Agosto	4653,2	9907,6	4374,0	279,2	94



Septiembre	4718,1	8426,9	3916,0	802,1	83
Octubre	5419,5	6926,6	3468,5	1951,0	64
Noviembre	5567,1	4907,7	2449,5	3117,6	44
Diciembre	6085,7	3793,2	1886,6	4199,1	31
Total	63624,8	82468,0	39867,1	23757,6	64,6

Tabla 13. Balance energético.

6. FLUIDO DE TRABAJO DEL CIRCUITO PRIMARIO.

El fluido de trabajo será elegido en función del riesgo de heladas que exista en la localidad donde se ubique la instalación, de forma que si este riesgo existe, el sistema de intercambio será indirecto y nuestro fluido de trabajo será una mezcla de agua y anticongelante (etilenglicol o propilenglicol), como será el caso de la instalación en estudio. Al mezclar agua con anticongelante baja el punto de fusión evitándose la congelación, y esto obligará a utilizar un intercambiador de calor para independizar ambos circuitos.

La proporción de esta solución se determinará en función de la temperatura de congelación, que será la resultante de disminuir en 5°C la temperatura mínima histórica.

$$T^a_{\text{mínima}} = -12\text{ °C}$$

$$T^a_{\text{congelación}} = -17\text{ °C}$$

En la gráfica siguiente vemos la relación temperatura de congelación con la concentración en peso de dos anticongelantes, y emplearemos aquel que mejor se adapte a nuestras características de trabajo.



De los dos fluidos anticongelantes que se contemplan se elige el etilenglicol, pues para una misma temperatura de congelación se precisa de menos concentración. Por lo tanto se elige como fluido caloportador una mezcla tipo de agua y etilenglicol, que según la gráfica presenta una proporción del 30% en peso.

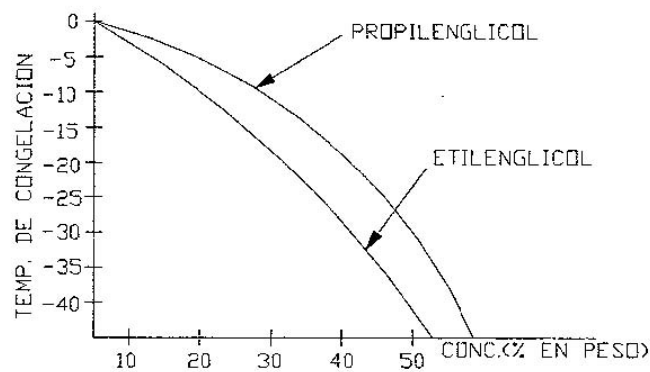


Figura 2. Punto de congelación de anticongelantes según su concentración en peso

Una vez obtenida la concentración, se calcularán la densidad, la viscosidad y el calor específico de la mezcla, pues serán necesarios en cálculos posteriores.

Para ello debemos conocer la temperatura de trabajo del fluido caloportador que es de 60°C.

Mediante la gráfica de la figura 3 se calcula el calor específico de la disolución etilenglicol al 30 % y a la temperatura de 60 °C, obteniéndose:

$$C_e = 0.93 \text{ Kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

Un requisito fundamental es que el calor específico del fluido caloportador no sea menor a 0.7 Kcal/Kg·°C, cosa que se cumple en el proyecto.

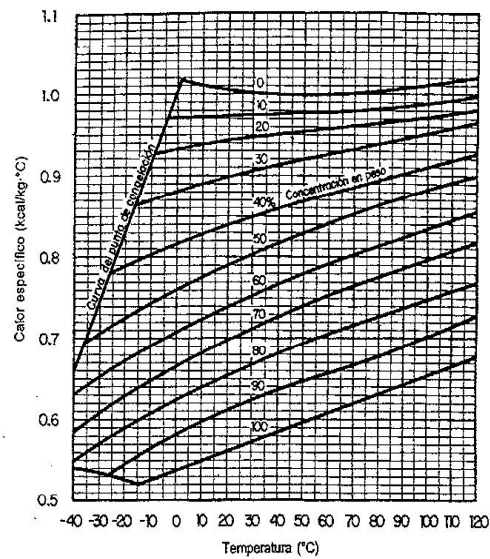


Figura 3. Calor específico de una disolución de etilenglicol, en función de la temperatura.

Con la gráfica de la figura 4 se calcula la densidad de la disolución etilenglicol al 30 % y a la temperatura de 60 °C, de forma que se obtiene:

$$P = 1,018 \text{ g/cc}$$

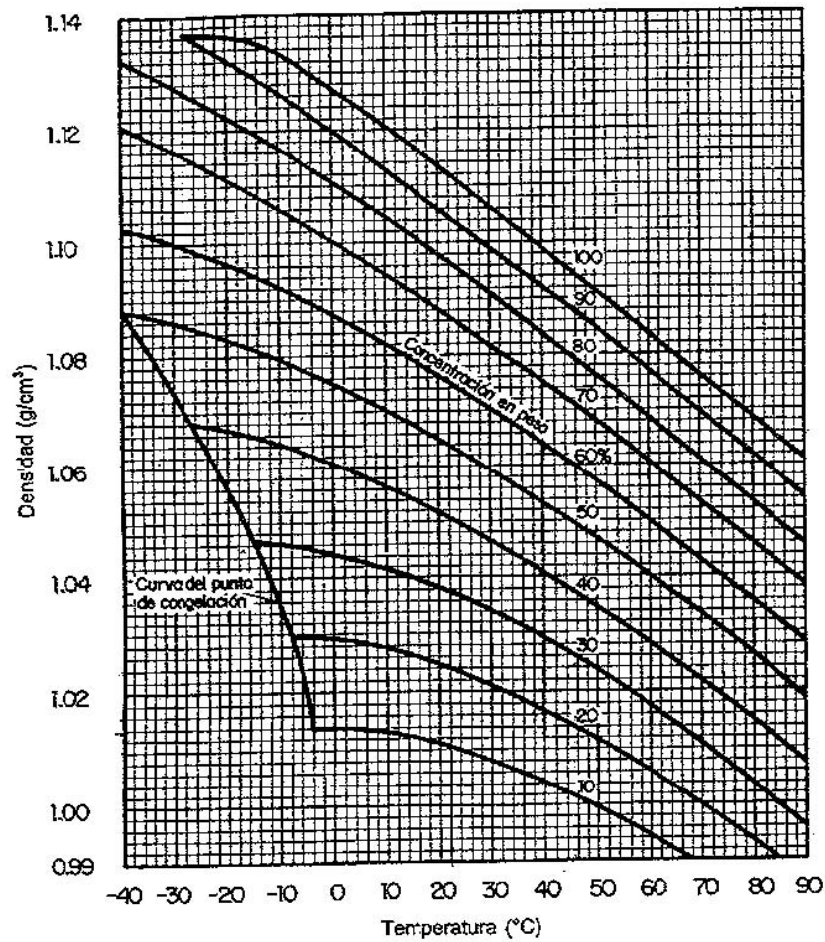


Figura 4. Densidad de una disolución de etilenglicol, en función de la temperatura.

Y finalmente con la gráfica de la figura 5 se calcula la viscosidad de la disolución de etilenglicol del fluido de trabajo:

$$\mu = 0,85 \text{ Kg/m}^*\text{s}$$

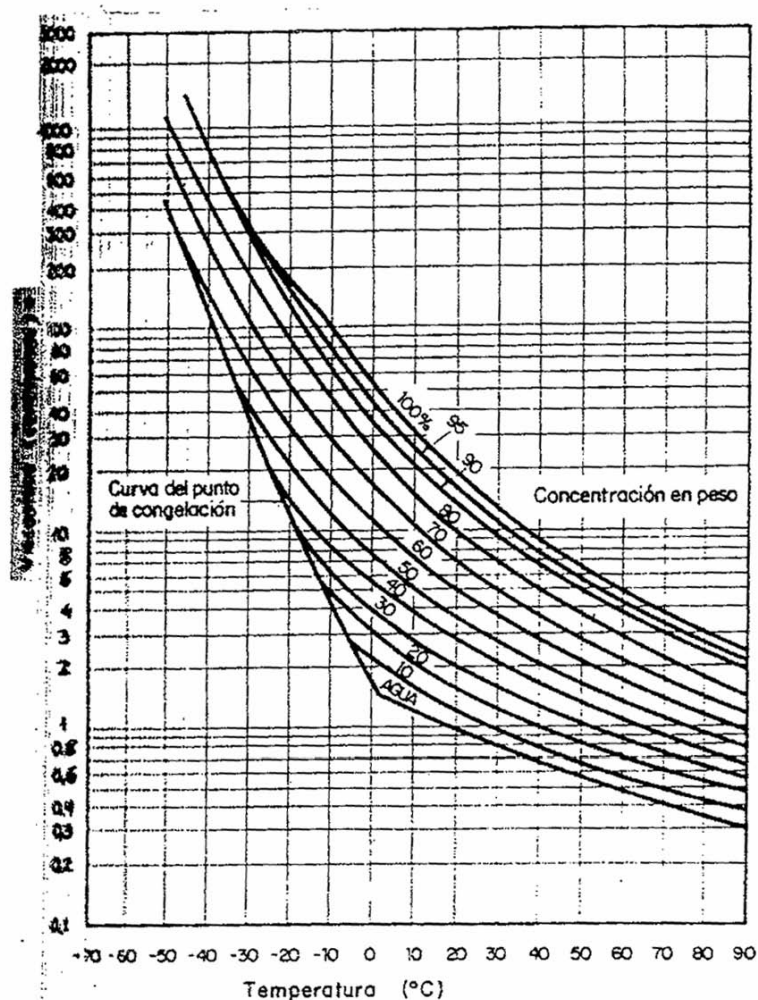


Figura 5. Viscosidad de una disolución de etilenglicol en función de la temperatura.

7. DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE Y EFICIENCIA DEL INTERCAMBIADOR.

7.1. SUPERFICIE DEL INTERCAMBIADOR.

El intercambiador será de tipo serpentín interno incorporado al acumulador y extraíble. El material empleado será cobre estañado y la superficie será una pared tubular simple.

En el intercambiador se disipará la energía captada en el campo de captación, luego mediante la expresión de transmisión de calor a través de este intercambiador se podrá obtener la superficie de éste, ya que el calor de transmisión es conocido. Dicha



expresión es la siguiente:

$$Q_T = 0,434 * K * S * \Delta t_e$$

, donde:

Q_T = Potencia térmica de transmisión, en Kcal/hora

K = Coeficiente de transmisión del material a través del cual se produce el intercambio. En este caso el intercambiador es de tubo de cobre.

$$K_{\text{cobre}} = 332 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$$

$$S = \text{Superficie de intercambio, en m}^2.$$

Δt_e = Incremento equivalente de temperatura, también llamado Temperatura media logarítmica. Se calcula mediante la expresión:

$$\Delta T_e = (\Delta T_{\text{caliente}} - \Delta T_{\text{fría}}) / \ln(\Delta T_{\text{caliente}} / \Delta T_{\text{fría}})$$

A continuación se calculan cada uno de los factores para la posterior obtención de la superficie del intercambiador.

Potencia de transmisión Q_T :

Para el cálculo del calor de transmisión se tendrá en cuenta el caso más desfavorable, es decir, el caso en el que la radiación captada por la superficie de captadores sea mayor, pues el diseño del intercambiador tendrá que contemplar estas condiciones para poder disipar esa cantidad de energía. El mes del año en el que se intercepta más radiación es Agosto, y dicho valor es $24,03 \text{ MJ/m}^2 \text{ día}$.

$$Q_T = 24,03 \text{ MJ/m}^2 \text{ día} * 13,3 \text{ m}^2 = 319,6 \text{ MJ/día}$$

Y teniendo en cuenta el número de horas al día:

$$Q_T = 319,6 \text{ MJ/día} * 1 \text{ día} / 24 \text{ horas} = 13,32 \text{ MJ/hora}$$



Pasamos de MJ a Kcal:

$$Q_T = 3186,6 \text{ kcal/h}$$

Salto térmico en el circuito primario:

Será necesario conocer el incremento de temperatura que se produce en el circuito primario, es decir, en el circuito de captadores, para obtener la temperatura de entrada del fluido de trabajo de los paneles solares. La expresión mediante la cual se calculará este incremento es la siguiente:

$$P_T = c * l_1 * C_{e1} * \Delta T_1$$

, siendo:

PT = Potencia térmica de transmisión PT = 3186,6 kcal/hora

c = Caudal, en l/h, del fluido de trabajo en el circuito primario

El caudal de circulación en el circuito primario se determinará en función de la superficie de captadores instalados. Para aplicaciones de ACS se aconseja, según normativa(C.T.E.DH_4), el caudal será mayor de 1,2 y menor de 2 l/s por cada 100 m² de captadores, es decir, entre 43 y 72 l/h por m² de captadores, tomaremos un valor medio de 50 l/h por m² de captador. La velocidad de circulación del fluido será en todo caso inferior a 2 m/s.

Luego en el circuito primario se tiene que:

$$C = 50 \text{ l/h} * m^2 \text{ captador} * 13,3 m^2 \text{ captador} = 665 \text{ l/h}$$

ρ_1 = Densidad del fluido de trabajo $\rho_1 = 1,018 \text{ Kg/l}$

C_{e1} = Calor específico del fluido de trabajo $C_{e1} = 0,93 \text{ Kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

Así pues, se despeja el ΔT de la relación y se obtiene que:

$$\Delta T_1 = P_T / (c * \rho_1 * C_{e1})$$

$$\Delta T_1 = 3186,6 / (0,93 * 1,018 * 665) = 5,1^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$$

Se sabe que la temperatura de salida de los captadores es, según fabricante, de 6 a 8°C mayor que la temperatura de consumo. Se tomará esta temperatura por tanto igual a 67°C.

Luego:

$$\Delta T_1 = T_{\text{sal}} - T_{\text{ent}}$$



$$T_{ent} = T_{sal} - \Delta T_1 = (67 - 5) ^\circ\text{C} = 62^\circ\text{C}$$

Incremento equivalente de temperatura ΔT_e :

Con los parámetros calculados anteriormente ya se puede determinar este término, sabiendo que la temperatura del agua acumulada en el depósito acumulador será la temperatura de consumo, es decir, 60°C .

$\Delta T_{caliente}$: Diferencia de temperatura de la parte caliente, es decir del fluido del circuito del serpentín cuando entra en el acumulador.

$$\Delta T_{caliente} = T_{entrada} - T_{acumulador} = (67 - 60)^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T = 7^\circ\text{C}$$

$\Delta T_{fría}$: Diferencia de temperatura de la parte fría, es decir del fluido del circuito del serpentín cuando sale de regreso a los captadores.

$$\Delta T_{fría} = T_{salida} - T_{acumulador} = (62 - 60)^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T = 2^\circ$$

Por tanto:

$$\Delta T_e = (\Delta T_{caliente} - \Delta T_{fría}) / \ln(\Delta T_{caliente} / \Delta T_{fría})$$

$$\Delta T_e = (7 - 2) / \ln(7 / 2) = 3,99 ^\circ\text{C} \sim 4^\circ\text{C}.$$

Una vez determinados todos los factores de la ecuación de transmisión de calor, ya se puede despejar de ésta la superficie del intercambiador:

$$Q_T = 0,434 * K * S * \Delta t_e$$

$$S = Q_T / (0,434 * K_{cobre} * \Delta t_e)$$

$$S = 3186,6 / (0,434 * 332 * 4) = 5,53 \text{ m}^2.$$

Así pues, la superficie de intercambio útil del intercambiador tipo serpentín es de **5,53 m²**, valor que cumple la condición de la normativa al respecto, que obliga a que la relación entre la superficie útil de intercambio del intercambiador incorporado y la superficie total de captación no sea inferior a 0.15.

$$S_{intercambiador} / S_{captación} = 5,53 / 13,3 = 0,42$$



7.2. EFICIENCIA DEL INTERCAMBIADOR

El intercambiador cuya superficie se ha calculado en el apartado anterior trabajará con cierta eficiencia, que se podrá cuantificar mediante la expresión:

$$\xi = (t_{\text{entrada}} - t_{\text{salida}}) / (t_{\text{entrada}} - t_{\text{acumulador}}) = 0,7142 \sim 71,43 \%$$

$$t_{\text{entrada}} = 67^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{salida}} = 62^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{acumulador}} = 60^{\circ}\text{C}$$

8. CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE APOYO.

Para asegurar la continuidad en el abastecimiento de la demanda térmica, las instalaciones de energía solar deben disponer de un sistema de energía auxiliar.

El sistema de energía auxiliar se diseñará de forma que sólo entre en funcionamiento cuando sea estrictamente necesario y que se aproveche lo máximo posible la energía extraída del campo de captación solar.

La instalación térmica deberá hacerse de manera que en ningún caso se introduzca en el acumulador solar energía procedente de la fuente auxiliar.

El sistema de aporte de energía auxiliar con acumulación o en línea siempre dispondrá de un control de la temperatura de salida, de forma que esta no sobrepase la temperatura de utilización prevista y que sea siempre inferior a 50°C .

Por otra parte, el dimensionado del sistema ha de asegurar el calentamiento, hasta la temperatura de diseño, de la totalidad del agua utilizada en el consumo diario previsto.

Con estas premisas, se opta por el aporte auxiliar mediante calentador mural instantáneo a gas.

Estos equipos requieren una elevada potencia instalada, ya que deberán de ser capaces de regular su potencia de forma que se obtenga la temperatura de diseño de manera permanente, con independencia de cual sea la temperatura del agua de entrada al citado equipo.

Sin embargo las ventajas del calentador a gas instantáneo son decisivas:



- Permiten controlar fácilmente la temperatura de salida del agua caliente, mediante la regulación del paso a gas.
- Solo consumen el combustible estrictamente necesario, al regular la potencia aportada.
- El coste de la caldera y de la instalación es bajo.
- No afecta al sistema solar.

Los parámetros que definirán el calentador mural a gas más adecuado son:

1. Caudal que debe circular por el mismo
2. Potencia necesaria para calentar el agua de suministro.

Estos dos parámetros son los mínimos necesarios para realizar un apoyo instantáneo de la energía auxiliar en el circuito de alimentación. Cualquier variación a la baja se traducirá en un funcionamiento deficiente, bien en temperatura o bien en caudal.

Caudal de circulación

El caudal que circulará por el calentador será el caudal total que demanda la instalación de ACS, multiplicado por un factor de simultaneidad correspondiente al número de aparatos sanitarios.

$$Q = Q_T * K$$

El caudal Q_T será la suma de los distintos caudales instantáneos correspondientes a los aparatos sanitarios instalados.

El caudal Q_T será la suma de los distintos caudales instantáneos correspondientes a los aparatos sanitarios instalados.

En la siguiente tabla se muestran los caudales más frecuentes de diversos aparatos de consumo, expresados en dm^3/s , y diámetros de las tuberías correspondientes en mm (Tabla 1, punto 4.2.1.1 del tomo IV de Censolar).



CAUDALES INSTANTANEOS MINIMOS DE LOS DISTINTOS APARATOS SANITARIOS	
Lavabo	0,10 l/s.
Bidet	0,10 l/s.
Inodoro con depósito	0,10 l/s.
Bañera	0,30 l/s.
Ducha	0,20 l/s.
Fregadera	0,20 l/s.
«Office»	0,15 l/s.
Lavadero	0,20 l/s.
Lavavajillas	0,20 l/s.
Lavadora automática	0,20 l/s.

Figura 6. Caudales instantáneos de distintos aparatos sanitarios.

El coeficiente de simultaneidad viene determinado a través de la siguiente expresión:

$$K = 1/\sqrt{n-1}$$

, siendo n el número de aparatos sanitarios.

A continuación se muestran, recogidos en una tabla de cálculo, los cálculos anteriormente descritos:



Unidad	Elementos	Caudal (l/s)	Caudal parcial
10	Lavabo	0,1	1,0
10	Bidet	0,1	1,0
10	Bañera	0,3	3,0
10	Fregadero	0,2	2,0
10	Lavadora	0,2	2,0
10	Lavavajillas	0,2	2,0
	Caudal total(l/s)		11,0
	Número de aparatos		60
	Coefficiente de simultaneidad		0,13
	Caudal (l/s)		1,43

Tabla 14.

Luego se tiene finalmente que el caudal circulante por el calentador de energía auxiliar será igual a:

$$Q = 1,43 \text{ (l/s)} * 3600\text{s/ 1h} = 5148 \text{ l/h}$$

Potencia útil

Para calcular la potencia necesaria del calentador se considerará el caso más desfavorable, es decir, aquel en el que sean más bajas tanto la radiación solar captada como la temperatura de red. De esta forma se asegura la cobertura de las necesidades caloríficas en las condiciones más precarias.

Dichas condiciones se dan en el mes de Diciembre, en el que la temperatura de agua de red es de 5,22C, y se necesita el aporte por parte del sistema auxiliar de 4199,1MJ.



La potencia que necesita suministrar en este caso el calentador se cuantifica utilizando la siguiente expresión:

$$P=m*\rho*C*\Delta t$$

, donde:

m = Caudal, en L/h $m = 5148$ L/h

ρ = Densidad fluido en cuestión. En este caso agua $\rho = 1$ kg/l

C = Capacidad calorífica $C = 4,18$ kJ/kg*K

Δt = Salto de temperatura $\Delta t = (60-5,2) ^\circ\text{C} = 54,8^\circ\text{C}$ $54,8^\circ\text{C}+273\text{K} = 327,8$ K

Así, se tiene que:

$$P= 5148(\text{l/h}) * 1 (\text{kg/l}) * 4,18 (\text{kJ/kg*K}) * 327,8 (\text{K}) = 7053810,2 (\text{kJ/h})$$

Sustituyendo P por la potencia que se necesita del sistema:

$$4199100(\text{kJ/mes}) = 7053810,2 (\text{kJ/h})$$

$$4199100 (\text{kJ/mes}) * 1\text{mes}/ 31 \text{ días} = 7953810,2 (\text{kJ/h}) * x \text{ horas/día}$$

De esta igualdad se deduce el número de horas al día que trabaja la caldera, con solo despejar el número de horas correspondientes a un día de trabajo de la misma:

$$X \text{ horas/ día} = 0,019 \text{ h/día.}$$

Por tanto la potencia a la que realmente trabaja el sistema será:

$$P_{\text{útil}}= 135454,84 (\text{kJ/día}) * 1\text{día}/ 0,019 \text{ h} * 1\text{kcal}/4,18 \text{ kJ}= 1705550,74 \text{ kcal/h}$$

Por lo tanto la caldera mural a gas deberá suministrar un caudal de 2988 L/h con una potencia útil de 1705550,74 Kcal/h.

La instalación de fontanería del bloque de viviendas en estudio dispone de calentadores de agua a gas independientes para cada vivienda que satisfacen estas condiciones.



9. DIMENSIONADO DEL CIRCUITO HIDRÁULICO.

La instalación de abastecimiento de agua caliente sanitaria consta de dos circuitos independientes

- a) Circuito primario: Es el que circula el fluido caloportador, y es el que atraviesa los captadores, bomba de impulsión, vaso de expansión e intercambiador. Es el circuito fundamental del presente proyecto, pues su correcto diseño optimizará el rendimiento del sistema solar. Su dimensionado consistirá en el cálculo del caudal que circula en cada momento, y el diámetro de la tubería utilizada
- b) Circuito secundario: Es el circuito de consumo en sí. Lleva el agua de red a la parte baja del acumulador para que el fluido caloportador le ceda su calor a través del serpentín, y distribuye luego este agua por los diferentes puntos de consumo. Su dimensionado en el presente proyecto consistirá en el cálculo del caudal circulante por el calentador de energía auxiliar.

9.1. CIRCUITO PRIMARIO

Cálculo caudal

Para este cálculo se seguirán las indicaciones de las Especificaciones Técnicas de Diseño y Montaje de Instalaciones Solares Térmicas.

El caudal de diseño en este circuito viene determinado según la superficie de captación instalada. Este parámetro se encuentra restringido entre dos valores, que son 1,2 y 2 l/seg por cada 100 m² de captadores, lo que corresponde a un intervalo de 43 y 72 l/h·m². El caudal más aconsejado es 50 l/h·m², que será el que se tome en este caso.

Teniendo en cuenta la superficie de captación se tiene que:

$$C = 50 \text{ l/h} \cdot \text{m}^2 * 13,3 \text{ m}^2 = 665 \text{ l/h}$$

Por lo tanto se tiene que por la batería de los siete captadores circulará un caudal de 665 l/h de la mezcla caloportante elegida.

Cálculo tuberías

El material utilizado para tuberías tanto en el circuito primario como en el circuito secundario será el cobre, ya que es el material más aconsejable para las instalaciones de energía solar.



Todas las características de los tubos de cobre están comprendidas en la tabla de la norma UNE 37.141-76 que se adjunta a continuación.

Tabla 15. Características de los tubos de cobre

Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)	Peso lineal (kg/m)	Superficie pared exterior (cm ² /m)	Sección interior (mm ²)	Capacidad (l/m)	Resistencia (recocido)	
							Útil (kp/cm ²)	Rotura (Kp/cm ²)
6	0.75	4.5	0.110 0.140	188	16	0.016 0.013	147	733 1100
8	0.75	6.5	0.152 0.196	251	33	0.033 0.028	102	510
10	0.75	8.5	0.194 0.252	314	57	0.057 0.050	78	388
12	0.75	10.5	0.236 0.308	377	87	0.087 0.078	63	314
15	0.75	13.5	0.299 0.391	471	143 133	0.143 0.133	49	244
18	0.75	16.5	0.362 0.475	565	214 201	0.214 0.201	40	199
22	1	20	0.587	691	314	0.314	44	220
	1.2	19.6	0.698		302	0.302	54	269
	1.5	19	0.860		284	0.284	69	347
28	1	26	0.753	880	531	0.531	34	169
	1.2	25.6	0.899		515	0.515	41	206
	1.5	25	1.111		491	0.491	53	264
35	1	33	0.951	1100	855	0.855	27	133
	1.2	32.6	1.134		835	0.835	32	162
	1.5	32	1.405		804	0.804	41	206
42	1	40	1.146	1319	1257	1.257	22	110
	1.2	39.6	1.369		1232	1.232	27	133
	1.5	39	1.699		1195	1.195	34	169
54	1.2 1.5	51.6 51	1.172 2.202	1696	2091 2043	2.091 2.043	20	102
63	1.5 2	60 59	2.579 3.411	1979	2827 2734	2.827 2.734	22	110
80	1.5 2	77 76	3.292 4.362	2513	4657 4356	4.657 4.356	17	86
100	2 2.5	96 95	5.840 6.815	3142	7238 7088	7.238 7.088	18	92



Para proceder con el dimensionado de las tuberías del circuito primario, hay que tener en cuenta las siguientes restricciones que se encuentran en distintas normativas al respecto:

- 1) La velocidad de circulación del líquido será de 1.5 m/s máximo en circuitos que circule de forma continua (circuitos primarios) y de 2.5 m/s si lo hace a intervalos (circuitos de consumo). Existirá también la restricción, para cumplir con las Especificaciones Técnicas para el diseño de no superar los 2 m/s cuando la tubería discurre por locales habitados y nunca superar los 3 m/s cuando el trazado es exterior o discurre por locales no habitados.
- 2) El dimensionado de las tuberías se realizará de forma que la pérdida de carga no sea superior a 40 mm de columna de agua por metro lineal de tubería.

Respetando estas consideraciones se evita el posible ruido en tuberías.

El procedimiento a seguir para determinar el diámetro de la tubería será el siguiente

En función del caudal que circula por la tubería se elegirá un diámetro orientativo según una tabla que relaciona ambos parámetros. Luego se comprueba, mediante un método de cálculo que se detallará a continuación, que la pérdida de carga para ese diámetro no sea superior a 40mm.c.a/m y también que la velocidad de circulación del fluido sea inferior a 3 m/s si las tuberías discurren por locales no habitados, y de hasta 2 m/s cuando las tuberías se encuentren en locales habitados, caso que nos ocupa.

En el caso de que el diámetro elegido no cumpla con ninguna de las condiciones anteriores se elegirá un diámetro superior y se volverán a comprobar las condiciones anteriores.

La tabla que relaciona el diámetro mínimo de la tubería con el caudal circulante es la siguiente:



Caudal (L/h)	Distancia a recorrer por la tubería		Diámetro (mm)
	m	< 50 > 50 m	
	Menos de 800	Menos de 500	18
	De 801 a 1500	De 501 a 1500	22
	De 1501 a 2200	De 1501 a 1800	28
	De 2201 a 4500	De 1801 a 5600	42
	De 4501 a 8500	De 5601 a 11000	54
	De 8501 a 14000	De 11001 a 17000	80
	De 14001 a 25000	De 17001 a 25000	100

Tabla 16. Diámetros mínimos recomendados para tuberías de cobre

Para calcular la velocidad y la pérdida de carga asociados al diámetro elegido se procederá de la siguiente forma:

Para la pérdida de carga se aplicará la ecuación de Darcy-Weisbach, expresada en metros de columna de agua.

$$H_f = (f' * L * c^2) / (D * 2 * g)$$

, donde:

- h_f = Pérdida de carga del tramo que se estudia.
- L = Longitud del tramo considerado en la tubería.
- c = Velocidad del fluido.
- D = Diámetro de la tubería.
- g = Aceleración de la gravedad $\approx g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Φ = Factor de fricción, determinado en función de la relación entre la rugosidad absoluta del material y el diámetro interior de la tubería (e/D), así como el número de Reynolds.

Para conocer el factor de fricción hay que calcular el Número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería de cobre.

Una vez conocido estos valores se obtendrá el factor de fricción a través del diagrama de Moody.

Su campo de aplicación se encuentra entre 10^{-6} y 10^{-2} de rugosidad relativa y 5000 y 10^8 de número de Reynolds



El número de Reynolds se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Re = (\rho * c * D) / \mu$$

, siendo:

- μ = Viscosidad del fluido.
- ρ = Densidad del fluido.
- c = Velocidad del fluido.
- D = Diámetro interior de la tubería.
- La densidad y viscosidad del agua se encuentran tabuladas en función de la temperatura, según se muestra a continuación:

Tabla 17. Densidad y viscosidad dinámica del agua a diferentes temperaturas.

T °C	ρ (Kg/m ³)	μ (Kg/m·s)
0	1000	0.001788
10	1000	0.001307
20	998	0.001003
30	996	0.000799
40	992	0.000657
50	988	0.000548
60	983	0.000467
70	978	0.000405
80	972	0.000305
90	965	0.000316
100	958	0.000283

La rugosidad relativa se conoce como e/D , donde e es la rugosidad equivalente del material de la tubería, y D es el diámetro interior.

La rugosidad equivalente de algunos materiales utilizados para tuberías se muestra a continuación en la siguiente tabla:

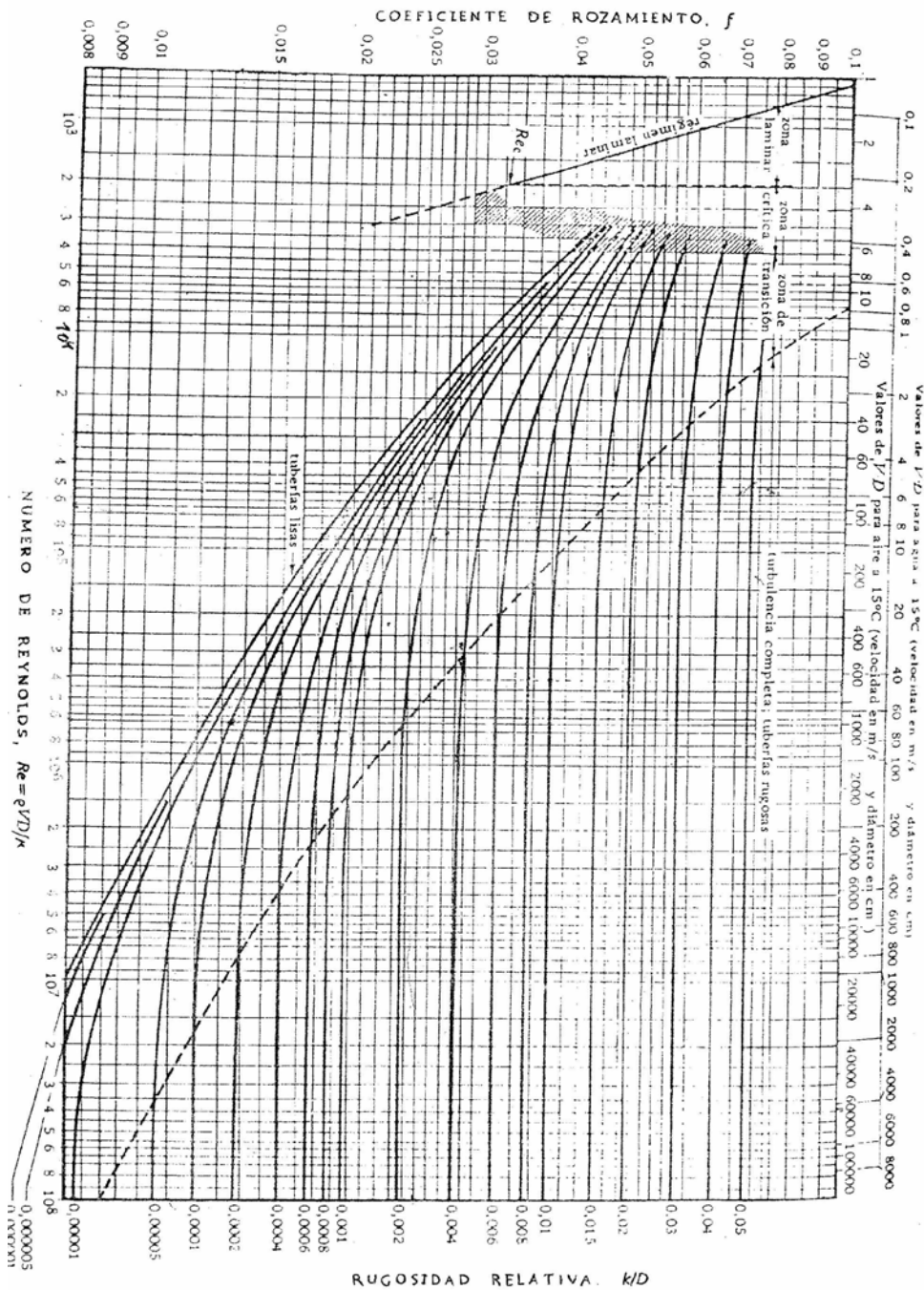
Tabla 18. Rugosidad tubería según material.

Material	Rugosidad absoluta e en cm.
Acero roblonado	0.091-0.91
Hierro forjado	0.0046
Vidrio, cobre ó latón estirado	0.00015

Una vez se han calculado el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se determina el factor de fricción mediante el Diagrama de Moody, mostrado a continuación:



Figura 7. Àbaco de Moody.





Una vez determinados todos los miembros de la ecuación de Darcy-Weisbach se obtiene el valor de la pérdida de carga en m.c.a para cada tramo en que se divida el circuito, asociada al diámetro elegido.

Esta pérdida de carga así calculada tendrá que ser multiplicada por un factor de corrección, debido al aumento de ésta al tratarse el fluido circulante de una mezcla de agua con anticongelante.

Dicho factor de corrección se calcula a través de la siguiente expresión:

$$F = \sqrt[4]{(\mu_{\text{disolución}} / \mu_{\text{agua}})}$$

Para calcular la velocidad del fluido se aplicará la ecuación de continuidad, que relaciona la velocidad de un fluido con el caudal con el que circula y el diámetro de la tubería:

$$Q = S * c$$

Finalmente se comprueba que para el diámetro elegido la pérdida de carga sea inferior a 40 mm.c.a., y la velocidad sea menor de 2 m/s.

Si no se cumplen estas restricciones se aumenta el diámetro al inmediatamente superior normalizado y se vuelve a proceder de la misma forma.

Antes de aplicar el procedimiento explicado es necesario dividir el circuito primario en tramos.

La configuración del circuito primario es la mostrada en el siguiente esquema de principio.

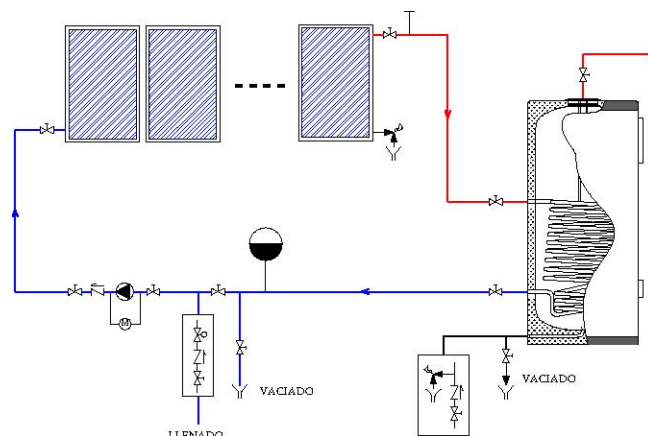


Figura8. Configuración circuito primario.



Puede observarse que al existir una única batería de captadores no hay ninguna bifurcación en la tubería, luego dicho circuito se compone de dos únicos tramos, correspondientes al fluido frío y al fluido caliente respectivamente:

Cálculo diámetro tramo 1

En primer lugar se determina la longitud en metros del tramo. Se tienen 12 metros de tuberías desde la bomba del circuito primario hasta el comienzo de la batería de los captadores.

Según la tabla 16 se tiene que para el caudal calculado, de 665 l/h, el diámetro mínimo es de 18 mm.

Este diámetro exterior corresponde a un diámetro interior de 16 mm, siendo el espesor de 1mm.

Se calcula la velocidad para este diámetro:

$$Q = S * c = \pi * r^2 * c \rightarrow c = 4 * Q / (\pi * D_i^2)$$

Donde,

$$Q = 665 \text{ l/h} * 1 \text{ dc} / 11 * 1 \text{ m}^3 / 1 * 10^3 \text{ dc} * 1 \text{ h} / 3600 \text{ s} = 1,85 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$C = 0,92 \text{ m/s}$$

La velocidad obtenida es menor a 2m/s cumpliendo así la normativa.

Ahora se procede a comprobar que la pérdida de carga no sea superior a la permitida: Se calcula en primer lugar el Número de Reynolds, tomando de la tabla 17 el valor de viscosidad y densidad del agua a 60°C.

$$\rho = 983 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,000467 \text{ kg/m*s}$$

Obtengo un valor de Reynolds:

$$Re = 30988,35$$

Como puede observarse en la tabla 18, la rugosidad absoluta para tuberías de cobre es



de 0,00015 cm. Y dividiendo este valor entre el diámetro interior se tiene que:

$$e/D = 9,4 \cdot 10^{-5}$$

Una vez conocidos el número de Reynolds y la rugosidad relativa se calcular f' mediante el diagrama de Moody, resultando:

$$F' = 0,023$$

Introduciendo los valores en la ecuación de Darcy-Weisbach se obtiene:

$$H_f = 0,74 \text{ mca} = 744,16 \text{ mmca}$$

Dividiendo entre la longitud del tramo se tiene la pérdida de carga por metro lineal de tubería:

$$H_f / \text{longitud del tramo} = 62,01 \text{ mmca/m}$$

Al tratarse de una disolución de agua y etilenglicol se tiene que el factor de corrección a aplicar para determinar la pérdida de carga real es:

$$\mu_{\text{disolución}} = 5,82 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$\mu_{\text{agua}} = 0,000467 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$f = 1,25$$

Con lo que finalmente se obtiene una pérdida de carga de:

$$H_{f \text{ total}} = h_f \cdot F = 62,02 \cdot 1,25 = 77,23 \text{ mmca/m}$$

$$H_{f \text{ total}} > 40 \text{ mmca/m}$$

Según lo expuesto anteriormente, con un diámetro exterior de 18 mm no se cumple la normativa, luego habrá que aumentar éste con el objeto de reducir pérdidas de carga.

Suponiendo ahora un diámetro de 22 mm para el tramo 1 se procede de nuevo con los cálculos para la velocidad y la pérdida de carga.

Este diámetro exterior corresponde a un diámetro interior de 20 mm, siendo el espesor



de 1mm, como puede observarse en la tabla 15.

Se calcula la velocidad para este diámetro:

$$Q = S * c = \pi * r^2 * c$$

$$C = (4 * Q) / (\pi * D_i^2) = 0,6 \text{ m/s}$$

$$D_i = 0,02 \text{ m}$$

$$Q = 1,85 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

La velocidad tiene un valor inferior al máximo permitido, luego se cumple la normativa en este aspecto.

Ahora se procede a comprobar que la pérdida de carga no sea superior a la permitida:

Se calcula en primer lugar el Número de Reynolds.

$$Re = 25259,10$$

La rugosidad relativa es:

$$e/D = 0,0015 \text{ mm} / 20 \text{ mm} = 7,5 * 10^{-5}$$

Una vez conocidos el número de Reynolds y la rugosidad relativa se calcula f' mediante el diagrama de Moody, resultando:

$$F' = 0,024$$

Introduciendo los valores en la ecuación de Darcy-Weisbach se obtiene:

$$H_f = (0,024 * 12 * 0,6^2) / (0,02 * 2 * 9,81) = 0,2642 \text{ mca} = 264,22 \text{ mmca}$$

Dividiendo entre la longitud del tramo se tiene la pérdida de carga por metro lineal de tubería:

$$H_f / \text{longitud tramo} = 264,22 / 12 = 22,02 \text{ mmca/m}$$

Y aplicando el factor:

$$H_{f \text{ total}} = 22,02 * 1,25 = 27,52 \text{ mmca}$$



Según las especificaciones técnicas de diseño y montaje de instalaciones solares térmicas, con un diámetro de 22 mm tanto la velocidad de circulación del fluido como las pérdidas de carga no superan los valores máximos permitidos, luego se opta finalmente en el tramo 1 por un diámetro exterior de 22 mm.

Cálculo diámetro tramo 2

En primer lugar se determina la longitud en metros del tramo. Se tienen 13 metros de tuberías desde la salida de los captadores hasta la bomba del circuito primario.

Según la tabla 16 se tiene que para el caudal calculado, de 665 l/h, el diámetro mínimo es de 18 mm.

Este diámetro exterior corresponde a un diámetro interior de 16 mm, siendo el espesor de 1mm.

Se calcula la velocidad para este diámetro:

$$Q = S * c = \pi * r^2 * c$$

$$C = (4 * Q) / (\pi * D_i^2) = 0,92 \text{ m/s}$$

La velocidad tiene un valor inferior al máximo permitido, luego se cumple la normativa en este aspecto.

Ahora se procede a comprobar que la pérdida de carga no sea superior a la permitida:

Se calcula en primer lugar el Número de Reynolds.

$$Re = \rho * c * D / \mu$$

, siendo:

$$\rho = 983 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 0,000467 \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$$

Luego se obtiene que:

$$Re = (983 * 0,92 * 0,02) / 0,000467 = 30988,35$$

Como puede observarse en la tabla 18, la rugosidad absoluta para tuberías de cobre es de 0,00015 cm. Y dividiendo este valor entre el diámetro interior se tiene que:



$$e/D = 0,0015\text{mm} / 16\text{ mm} = 9,4 \cdot 10^{-5}$$

F' se calcula mediante el diagrama de Moody para los valores $Re = 30988,35$ y $e/D = 9,4 \cdot 10^{-5}$, resultando:

$$F' = 0,023$$

Introduciendo los valores en la ecuación de Darcy-Weisbach se obtiene:

$$H_f = (f' \cdot L \cdot c^2) / (D \cdot 2 \cdot g) = (0,023 \cdot 13 \cdot 0,92^2) / (0,016 \cdot 2 \cdot 9,81) = 0,806\text{mca} = 806,2\text{mmca}$$

Dividiendo entre la longitud del tramo se tiene la pérdida de carga por metro lineal de tubería:

$$H_{f\text{total}} = h_f / \text{longitud tramo } 2 = 806,2 / 13 = 62,01\text{mmca/m}$$

Con lo que finalmente se obtiene una pérdida de carga, aplicando el factor de corrección, de:

$$62,01\text{mmca/m} \cdot 1,25 = 77,51\text{mmca/m} > 40\text{mmca/m}$$

No se cumple la normativa pues las pérdidas de carga son superiores a las permitidas, luego habrá que aumentar el diámetro para reducirlas.

Suponiendo ahora un diámetro de 22 mm para el tramo 2 se procede de nuevo a calcular la velocidad y la pérdida de carga.

Este diámetro exterior corresponde a un diámetro interior de 20 mm, siendo el espesor de 1mm, como puede observarse en la tabla 15.

Se calcula la velocidad para este diámetro:

$$Q = S \cdot c = \pi \cdot r^2 \cdot c$$

$$C = (4 \cdot Q) / (\pi \cdot D_i^2) = 0,6\text{ m/s}$$

$$D_i = 0,02\text{m}$$

$$Q = 1,85 \cdot 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$$



La velocidad tiene un valor inferior al máximo permitido, luego se cumple la normativa en este aspecto.

Ahora se procede a comprobar que la pérdida de carga no sea superior a la permitida:
Se calcula en primer lugar el Número de Reynolds.

$$Re = \rho * c * D / \mu$$

, siendo:

$$\rho = 983 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 0,000467 \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$$

Luego se obtiene que:

$$Re = (983 * 0,6 * 0,02) / 0,000467 = 25259,10$$

Como puede observarse en la tabla 18, la rugosidad absoluta para tuberías de cobre es de 0,00015 cm. Y dividiendo este valor entre el diámetro interior se tiene que:

$$e/D = 0,0015 \text{ mm} / 20 \text{ mm} = 7,5 * 10^{-5}$$

F' se calcula mediante el diagrama de Moody para los valores $Re = 25259,20$ y $e/D = 7,5 * 10^{-5}$, resultando:

$$F' = 0,024$$

Introduciendo los valores en la ecuación de Darcy-Weisbach se obtiene:

$$H_f = (f' * L * c^2) / (D * 2 * g) = (0,024 * 13 * 0,6^2) / (0,02 * 2 * 9,81) = 0,286 \text{ mca} = 268,24 \text{ mmca}$$

Dividiendo entre la longitud del tramo se tiene la pérdida de carga por metro lineal de tubería:

$$H_{f \text{ total}} = h_f / \text{longitud tramo } 2 = 268,24 / 13 = 22,02 \text{ mmca/m}$$

Con lo que finalmente se obtiene una pérdida de carga, aplicando el factor de corrección, de:



$$22,02\text{mmca/m} * 1,25 = 27,52\text{mmca/m} < 40\text{mmca/m}$$

Según las especificaciones técnicas de diseño y montaje de instalaciones solares térmicas, con un diámetro de 22 mm tanto la velocidad de circulación del fluido como las pérdidas de carga no superan los valores máximos permitidos, luego se opta finalmente en el tramo 2 por un diámetro exterior de 22 mm.

Multiplicando los mm.c.a./m por los metros de cada tramo se obtienen las pérdidas totales.

A continuación se muestran los resultados más relevantes derivados del cálculo de los diámetros de cada tramo.

TRAMO	CAUDAL (l/h)	Φ Exterior (mm)	Φ Interior (mm)	LONGITUD (m)	VELOCIDAD (m/s)	m.c.a.total
Tramo 1	665	22	20	12	0,6	0,330
Tramo 2	665	22	20	13	0,6	0,358

Tabla 19. Pérdidas de carga en el circuito primario.

10. PÉRDIDA DE CARGA.

Será necesario determinar la pérdida de carga total del circuito primario de la instalación, para así poder calcular la potencia que tiene que suministrar la bomba.

Esta pérdida de carga se clasifica en las siguientes:

- Pérdida de carga lineal debido a los tramos de tuberías.
- Pérdida de carga singular debido a accesorios.
- Pérdida de carga debido a los captadores.
- Pérdida de carga debido al intercambiador.

La pérdida de carga total será la suma de las anteriormente citadas.



Al ser el líquido caloportador una mezcla de agua y etilenglicol se producirá un aumento en dicha pérdida de carga. Este aumento se cuantificará multiplicando la pérdida total obtenida por el factor de corrección F , determinado en el apartado 9.1.

- La pérdida de carga lineal debido a los tramos de tuberías ha sido calculada con anterioridad, y se muestra a continuación en la siguiente tabla:

	PÉRDIDA DE CARGA (mmca)
TRAMO 1	330,24
TRAMO 2	357,76
TOTAL	688,00

Tabla 20. Pérdida total de carga en el tramo primario.

- Para el cálculo de la pérdida de carga singular debido a accesorios se utilizará el método de las longitudes equivalentes. Este método consiste en sustituir cada accesorio por su longitud equivalente, que es la longitud en metros de tubería a la que equivaldría dicho accesorio.

Esta longitud equivalente se encuentra tabulada y se muestra a continuación:



Tabla 21. Longitud equivalente de accesorios.

Clase de resistencia añadida	Diámetros de las tuberías (*) (mm)	3/8	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5	6
		10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150
	manguito de unión	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,09	0,12	0,15	0,20	0,25
	cono de reducción	0,20	0,30	0,50	0,65	0,85	1,00	1,30	2,00	2,30	3,00	4,00	5,00
	codo o curva de 45°	0,20	0,34	0,43	0,47	0,56	0,70	0,83	1,00	1,18	1,25	1,45	1,63
	curva de 90°	0,18	0,33	0,45	0,60	0,84	0,96	1,27	1,48	1,54	1,97	2,61	3,42
	codo de 90°	0,38	0,50	0,63	0,76	1,01	1,32	1,71	1,94	2,01	2,21	2,94	3,99
	te de 45°	1,02	0,84	0,90	0,96	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,30
	te arqueado o de curvas (pentaciones)	1,50	1,68	1,80	1,92	2,40	3,00	3,60	4,20	4,80	5,40	6,00	6,60
	te confluencia de ramal (paso recto)	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	0,50	0,70	0,80	0,90	1,00	1,20
	te derivación a ramal	1,80	2,50	3,00	3,60	4,10	4,60	5,00	5,50	6,20	6,90	7,70	8,90
	válvula retención de batiente	0,20	0,30	0,55	0,75	1,15	1,50	1,90	2,65	3,40	4,85	6,60	8,30
	de pistón	1,33	1,70	2,32	2,85	3,72	4,67	5,75	6,91	8,40	11,1	12,8	15,4
	válvula retención paso de escuadra	5,10	5,40	6,50	8,50	11,50	13,0	16,5	21,0	25,0	36,0	42,0	51,0
	válvula de compuerta abierta	0,14	0,18	0,21	0,26	0,36	0,44	0,55	0,69	0,81	1,09	1,44	1,70
	válvula de paso recto y asiento inclinado	1,10	1,34	1,74	2,28	2,89	3,46	4,53	5,51	6,69	8,80	10,8	13,1
	válvula de globo	4,05	4,95	6,25	8,25	10,8	13,0	17,0	21,0	25,0	33,0	39,0	47,5
	válvula de escuadra o ángulo (abierta)	1,90	2,55	2,35	4,30	5,60	6,85	8,60	11,1	13,7	17,1	21,2	25,5
	válvula de asiento de paso recto	—	3,40	3,60	4,50	5,68	8,10	9,00	—	—	—	—	—
	intercambiador	—	—	—	2,10	5,00	12,5	13,2	14,2	25,0	—	—	—
	radiador	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,75	6,50	7,00	7,50	8,00	10,0
	radiador con valvulería	3,75	4,40	5,25	6,00	6,75	7,50	8,80	10,1	11,4	12,7	14,0	15,0
	caldera	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,75	6,50	7,00	7,50	8,00	10,0
	contador general individual o divisorio	4,5 m.e.d.a. 10 m.e.d.a.											



TRAMO 1	ACCESORIOS	CANTIDAD	LONGITUD EQUIVALENTE (m)	TOTAL (m)
	Válvula de corte	4	0,21	0,84
	Codos 90°	3	0,45	1,35
	Válvula antiretorno	1	0,55	0,55
			TOTAL	2,74

Tabla 22. Cálculo longitud equivalente de accesorios tramo 1.



TRAMO 2	ACCESORIOS	CANTIDAD	LONGITUD EQUIVALENTE (m)	TOTAL (m)
	Válvula de corte	2	0,21	0,42
	Codos 90°	5	0,45	2,25
	Válvula de seguridad	1	0,20	0,20
	Válvula antiretorno	1	0,55	0,55
	Válvula en cruz	1	3,00	3,00
			TOTAL	6,42

Tabla 23. Cálculo longitud equivalente accesorios tramo 2.



Para tramo 1:

$$H_f = (f \cdot (L_{\text{tubería}} + L_{\text{accesorios}}) \cdot c^2) / (D_i^2 \cdot 9,81) =$$
$$(0,024 \cdot (12 + 2,74) \cdot 0,6^2) / (0,02^2 \cdot 9,81) = 0,324 \text{ mca}$$
$$H_f = 324,55 \text{ mmca}$$

Dividiendo entre la longitud del tramo se tiene la pérdida de carga por metro lineal de tubería:

$$H_{f_{\text{total}}} = h_f / \text{longitud tramo} = 324,55 / 14,74 = 22,02 \text{ mmca/m}$$

Con lo que finalmente se obtiene una pérdida de carga, aplicando el factor de corrección, de:

$$22,02 \text{ mmca/m} \cdot 1,25 = 27,52 \text{ mmca/m}$$

Para tramo 2:

$$H_f = (f \cdot (L_{\text{tubería}} + L_{\text{accesorios}}) \cdot c^2) / (D^2 \cdot g) = (0,024 \cdot (13 + 6,42) \cdot 0,6^2) / (0,02^2 \cdot 9,81) =$$
$$0,427 \text{ mca} = 427,60 \text{ mmca}$$

Dividiendo entre la longitud del tramo se tiene la pérdida de carga por metro lineal de tubería:

$$H_{f_{\text{total}}} = h_f / \text{longitud tramo} = 427,60 / 19,42 = 22,02 \text{ mmca/m}$$

Con lo que finalmente se obtiene una pérdida de carga, aplicando el factor de corrección, de:

$$22,02 \text{ mmca/m} \cdot 1,25 = 27,52 \text{ mmca/m}$$



- La pérdida de carga debido a la superficie colectora se determina mediante la siguiente expresión:

$$\Delta P_T = \Delta P * N * (N+1) / 4$$

Donde,

- N= Número de captadores en paralelo.
- ΔP = Pérdida de carga debida a un solo colector.

La pérdida de carga debida a un captador modelo CALORAMA se determina a través de los datos del fabricante, $\Delta P = 10$ mmca.

$$\Delta P_T = \Delta P * N * (N+1) / 4 = 10 * 7 * (7+1) / 4 = 140 \text{ mmca}$$

- La pérdida de carga debido al intercambiador se obtiene directamente del fabricante,

$$\Delta P_{\text{intercambiador}} = 559,55 \text{ mmca.}$$

Finalmente se suman estas pérdidas de carga obteniéndose la pérdida de carga total en el circuito primario:

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{(tuberías + accesorios)}} + \Delta P_{\text{intercambiador}} + \Delta P_{\text{colectores}}$$

$$\Delta P_{\text{total}} = 324,55 + 427,60 + 140 + 559,55 = 1451,70 \text{ mmca}$$

$$\Delta P_{\text{total}} * F = 1451,70 * 1,25 = 1814,62 \text{ mmca} = 1,82 \text{ mca}$$



11. CÁLCULO DE LA BOMBA DEL CIRCUITO PRIMARIO

El dimensionado de la bomba del circuito primario consistirá en determinar la potencia que requerirá ésta para suministrar los parámetros altura y caudal necesarios.

También se determinará el denominado **NPSH disponible** de la instalación.

A continuación se explican algunos conceptos básicos sobre el significado de este término.

El NPSH disponible es una característica de la instalación y se define como la energía que tiene un líquido en la toma de aspiración de la bomba por encima de la energía del líquido debido a su presión de vapor.

El NPSH disponible puede ser calculado u obtenido tomando lecturas de prueba en el lado de aspiración de la bomba.

El NPSH requerido es una característica de la bomba. Se determina por prueba o cálculo, y es aquella energía necesaria para llenar la parte de aspiración y vencer las pérdidas por rozamiento y el aumento de velocidad.

En resumen es la energía del líquido que una bomba necesita para funcionar satisfactoriamente.

Para que una bomba funcione bien el NPSH disponible menos el NPSH requerido ha de ser mayor o igual a 1 metro.

Cuando un líquido se mueve en una región donde su presión es menor que su tensión de vapor, hierve y se forman burbujas de vapor que son arrastradas con el líquido hasta una región donde se alcanza una presión más elevada y allí desaparecen. Este fenómeno se llama **cavitación**.

Cuando la presión de la tubería de aspiración cae por debajo de la presión de vapor se forman burbujas de vapor en su seno y son arrastradas por la corriente. Estas burbujas de vapor o cavidades desaparecen bruscamente cuando alcanzan zonas de presión más altas en su camino a través de la bomba. Los efectos más evidentes de la cavitación son ruido y vibración. Son ocasionados por la desaparición de las burbujas de vapor cuando llegan al lado de alta presión de la bomba. Cuanto mayor es la bomba mayores son el ruido y la vibración. Si la bomba funciona en condiciones de cavitación durante periodos largos de tiempo, especialmente en servicios con agua, se produce el picado de los álabes del impulsor. La desaparición violenta de las burbujas de vapor introduce el líquido a alta intensidad en áreas reducidas. Estas presiones pueden sobrepasar la



resistencia a la tracción del metal y realmente arrancar partículas, dando al metal una apariencia esponjosa. El ruido y la vibración pueden también causar averías en los rodamientos, rotura de eje y otros fallos en la bomba por fatiga de los materiales.

Otro factor primordial de la cavitación es una disminución en el rendimiento de la bomba, que se evidencia en una disminución de la altura.

En general la cavitación indica un NPSH disponible insuficiente. Pérdidas excesivas en la aspiración, junto con reducidas alturas estáticas y alta temperatura. Si no existe forma de modificar el sistema puede llegar a ser preciso modificar las condiciones, de forma que puede utilizarse una bomba distinta con un NPSH requerido más bajo.

- **Determinación de la potencia de la bomba:**

Para el cálculo de la potencia de una bomba se utiliza la siguiente fórmula:

$$W = (1000 * H * Q * \rho) / (75 * \eta)$$

- W = Potencia teórica de la bomba (CV)
- Q = Caudal volumétrico del fluido a bombear (m³/s)
- η = Rendimiento total de la instalación de bombeo □ Se supondrá el 25% para electrocirculadores pequeños.
- ρ = Densidad de la disolución (g/cm³) → $\rho = 1,0054$ g/cc

, siendo:

- H = Altura total desarrollada por la bomba, en metros de columna de líquido

El caudal en el circuito primario tiene el siguiente valor:

$$Q = 1,85 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$



La densidad del etilenglicol al 30% en peso es de $\rho = 1.0054 \text{ g/cm}^3$

La altura de presión ó carga total desarrollada por la bomba, “H”, viene dada por la siguiente expresión:

$$H = (P_2 - P_1) / (\rho * g) + H_g + h_s$$

, siendo:

- P_2 y P_1 = Presión en los espacios de impulsión y aspiración (Pa).
- ρ = Densidad del líquido que se bombea (kg/m^3).
- g = Aceleración de la gravedad $\rightarrow g = 9,81 \text{ m/s}^2$.
- $H_g = Z_2 - Z_1$ = Altura geométrica de aspiración del líquido (m).
- h_s = Altura de presión necesaria para crear la velocidad y superar el rozamiento y todas las resistencias locales en las horas de succión y de impulsión (m).

Como el circuito primario, por el que circula el fluido caloportador, es un circuito cerrado, se tiene que $P_2 - P_1 = 0$, y $Z_2 - Z_1 = 0$.

Luego la expresión de la altura de presión se reduce a:

$$H = 0 + 0 + h_s$$

Donde, $h_s = 1,82 \text{ mca.}$

$$H = 1,82 \text{ mca.}$$

Así, se tiene, sustituyendo en la expresión:

$$W = (1000 * H * Q * \rho) / (75 * \eta)$$

$$W = (1000 * 1,82 * 1,85 * 10^{-4} * 1,0054) / (75 * 0,25) = 0,018 \text{ C.V.}$$

$$0,018 \text{ C.V.} * 735 \text{ W/C.V} = 13,23 \text{ W}$$



Teniendo en cuenta las posibles sobrecargas, el motor de la bomba se instala con una potencia algo mayor que la consumida:

$$P_{ins} = W * \beta$$

W (KW)	<1	1-5	5-50	>50
B	2-1.5	1.5-1.2	1.2-1.15	1.1

Tabla 24. Coeficiente de reserva β de potencia.

Tomando un coeficiente de reserva de potencia de 2 la potencia instalada es:

$$W_{inst} = \beta * W = 2 * 13,23 W = 26,46 W$$

La potencia normalizada inmediatamente superior a la obtenida es de 30 W.

La bomba circuladora elegida es de la empresa Baeza S.A. modelo Wilo Star-R/S 30/4. Cuyas características son las siguientes:

- Tensión= 230 V.
- Potencia Absorción máxima= 68W.
- 3 velocidades.
- Aislamiento térmico de serie.
- Tecnología modular.
- Guardamotor integrado, protección por clixón.
- Temperatura de trabajo: -10°C-110°C.

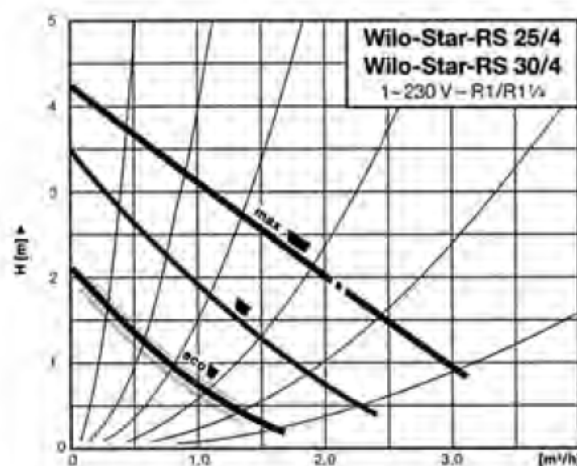


Figura 9. Curva característica de la bomba.



• **Determinación del NPSH disponible de la instalación:**

Para conocer el NPSH requerido de la bomba hay que conocer el NPSH disponible de la instalación, pues se debe cumplir que $\text{NPSH disponible} - \text{NPSH requerido} > 1$ para que no exista ningún problema de cavitación en el funcionamiento de la bomba.

$$\text{NPSH disponible} = Z_1 + ((P_1 - P_v) \cdot 10) / \rho - h_f$$

, donde:

- Z_1 = Diferencia de altura en metros entre el punto de aspiración de la bomba y el punto 1.
- P_1 = Presión del fluido en Kg/cm^2 en el punto 1.
- P_v = presión de vapor del fluido en Kg/cm^2 a una determinada temperatura.
- h_f = pérdidas de presión en metros, producidas en la tubería.
- ρ = densidad del fluido (etilenglicol al 30% en peso a 45°).

En el caso del circuito primario se tiene que:

$$-Z_1 = 2,66 \text{ m.}$$

$$-P_1 = P_{\text{bomba}} - \Delta P_{\text{tramo 1}} = 20660 - 324,55 = 20335,45 \text{ mmca} \cdot 1 \text{ atm} / 10,33 \cdot 10^3 \text{ mmca} = 1,97 \text{ atm}$$

$$P_{\text{bomba}} = 2 \text{ atm} \cdot 10,33 \cdot 10^3 \text{ mmca} / 1 \text{ atm} = 20660 \text{ mmca}$$

$$-\rho = 1.054 \text{ g/cm}^3 = 1.054 \text{ Kg/dm}^3$$

-Cálculo de P_v (Presión de vapor de la mezcla de agua y etilenglicol):

Para obtener la presión de vapor del etilenglicol puro a la temperatura de 60°C se parte de los siguientes valores de presión de vapor de compuestos orgánicos puros hasta 1 atm, obtenidos consultando el Tomo I del Perry, tabla 3-8.:

$$P_v (60^\circ\text{C}) = 129.5 \text{ mm Hg}$$



La presión de vapor del agua a 60° se obtiene mediante la tabla 2-5 del Tomo I del Perry: Presión de vapor del agua líquida pura desde 0°C a 100°C.

$$P_v(60^\circ\text{C}) = 71,88 \text{ mmHg}$$

$$P_{v_{\text{etilenglicol}}}(60^\circ\text{C}) = 129,5 \text{ mmHg} \cdot 1 \text{ atm} / 760 \text{ mmHg} \cdot 1,033 \text{ kg/cm}^2 / 1 \text{ atm} = 0,1760 \text{ kg/cm}^2$$

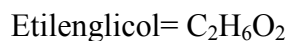
$$P_{v_{\text{agua}}}(60^\circ\text{C}) = 71,88 \text{ mmHg} \cdot 1 \text{ atm} / 760 \text{ mmHg} \cdot 1,033 \text{ kg/cm}^2 / 1 \text{ atm} = 0,098 \text{ kg/cm}^2$$

Con estos dos valores se puede obtener la presión de vapor de la mezcla de proporción 30% en peso de etilenglicol y agua al 70%, aplicando la ley de mezclas ideales:

Mediante la ley de Raoult se calcula la presión de vapor de ambos compuestos en sus respectivas concentraciones:

· Etilenglicol al 30% en peso:

$$P = P \cdot X$$



Siendo la fracción molar del etilenglicol:

$$X_{\text{etilenglicol}} = n_{\text{etilenglicol}} / (n_{\text{etilenglicol}} + n_{\text{agua}})$$

El número de moles de cada uno de los elementos se calcula a continuación:

$$n_{\text{agua}} = m_{\text{agua}} / P_{\text{molecular}}_{\text{agua}} = 70 \text{ g} / 18 \text{ g/mol} = 3,89 \text{ mol agua}$$

$$n_{\text{etilenglicol}} = m_{\text{etilenglicol}} / P_{\text{molecular}}_{\text{etilenglicol}} = 30 \text{ g} / 58 \text{ g/mol} = 0,52 \text{ mol etilenglicol.}$$

$$X_{\text{etilenglicol}} = n_{\text{etilenglicol}} / (n_{\text{etilenglicol}} + n_{\text{agua}}) = 0,52 \text{ mol} / (3,89 + 0,52) = 0,12$$

$$X_{\text{agua}} = 1 - X_{\text{etilenglicol}} = 0,88$$

Y finalmente aplicando la ley de mezclas ideales se obtiene que la presión de vapor de la mezcla agua 70% etilenglicol 30% en peso:



$$P_{v_mezcla} = P_{v_agua} * X_{agua} + P_{v_etilenglicol} * X_{etilenglicol} = 0,098 * 0,88 + 0,176 * 0,12$$

$$P_{v_mezcla} = 0,1074 \text{ kg/cm}^2$$

- Cálculo de hf:

Esta pérdida de carga es la debida a la aspiración de la bomba, es decir la pérdida de carga correspondiente al tramo 2, que es el recorrido del agua caliente desde los captadores hasta la bomba. Estas pérdidas de cargas se calcularon en el apartado 10.

$$\Delta P = (\Delta P_{tuberias} + \Delta P_{accesorios}) + \Delta P_{intercambiador} = (427,60 + 559,55) * 1,25 = 1233,98 \text{ mmca}$$

$$\Delta P = 1,23 \text{ mca}$$

Sustituyendo todos los datos calculados en la expresión del NPSH disponible se obtiene:

$$NPSH_{disponible} = Z_1 + ((P_1 - P_v) * 10) / \rho - h_f =$$

$$2,660 + ((2,035 - 0,1074) * 10) / 1,0054 - 1,230 = 20,60 \text{ m}$$

Luego el NPSH requerido de la bomba ha de ser $< 19,60$ metros.



12. CÁLCULO DEL VASO DE EXPANSIÓN.

El depósito de expansión es uno de los elementos que tiene que incluirse en la instalación para el correcto funcionamiento y control de ésta.

La función de un vaso de expansión es compensar los cambios de volumen de un fluido de trabajo ocasionados por la dilatación térmica. Sin un vaso de expansión sería imposible evitar el escape del fluido de trabajo en un circuito cerrado a través de la válvula de seguridad cuando el fluido se calienta. Al calentarse el fluido del circuito primario, una parte del fluido entra en el vaso de expansión, absorbiendo esté la dilatación térmica, y cuando el sistema se enfría regresa al circuito

El depósito que se va a utilizar es del tipo cerrado, por su facilidad de ubicación y montaje. Este tipo de vasos de expansión no absorben oxígeno del aire, y eliminan las pérdidas de fluido caloportador por evaporación, con lo que a su vez se evitan posibles corrosiones e incrustaciones.

Para calcular el volumen del vaso de expansión se tendrá en cuenta el volumen total acumulado en el circuito primario, es decir, el volumen contenido en las tuberías, en los captadores y en el intercambiador.

○ Volumen de tuberías:

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{tubería}} = (\pi \cdot D_i^2 \cdot L) / 4 = (\pi \cdot 0,02^2 \cdot 13) / 4 = 3,78 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 4 \text{ litros}$$

○ Volumen del intercambiador:

Consultando la norma UNE 37.141-76, en función de los diámetros y de los metros de las tuberías se puede calcular el volumen existente en ellas según la siguiente tabla:

	Diámetros interiores	l/m
22	20 (espesor = 1)	0.314
18	16 (espesor = 1)	0.201

$$V = 16,42 \text{ m} \cdot 0,314 \text{ l/m} = 5,16 \text{ litros}$$



○ Volumen de paneles:

Consultando los datos técnicos del captador 2309 VS, se tiene cada panel contiene 5.1 litros de fluido, luego para la batería de los 7 captadores:

$$V = 7 * 5.1 = 35,7 \text{ litros}$$

Luego el volumen total del circuito primario será igual a la suma de estos tres volúmenes:

$$V_{\text{total}} = 44,86 \text{ litros}$$

El volumen del depósito de expansión estará relacionado con el volumen anteriormente calculado según la siguiente expresión:

$$V = V_T * (0.2 + 0.01 * h)$$

, siendo:

- VT = Capacidad total del circuito primario.
- h = Diferencia de alturas entre el punto más alto del campo de captadores y el depósito de expansión (metros).-->h=4,16m.

Sustituyendo los datos en la ecuación:

$$V = V_T * (0.2 + 0.01 * h) = 44,86 * (0.2 + 0.01 * 4,16) = 2,76 \text{ litros.}$$

Según indican las especificaciones técnicas de diseño y montaje de instalaciones solares para la producción de agua caliente sanitaria, el volumen del vaso ha de tener el 4,3% del volumen total del circuito primario, en previsión de dilataciones.

El volumen obtenido cumple la normativa, el volumen debe ser de 2 litros para cumplir la normativa y el volumen del vaso calculado es de 3 litros.

El vaso de expansión se conectará a la aspiración de la bomba.

Los circuitos con vaso de expansión cerrado deben incorporar un sistema de llenado manual o automático que permita llenar el circuito y mantenerlo presurizado.

Se elige un vaso de expansión para A.C.S. de la marca Salvador Escoda, modelo 5 AMR-B, con una capacidad de 5 litros, presión máxima de trabajo de 10 bar y diámetro de conexión 22mm.



13. AISLAMIENTO TÉRMICO DE LAS INSTALACIONES

Con el fin de evitar consumos energéticos superfluos, los aparatos, equipos y conducciones que contengan fluidos a temperatura inferior a la ambiente o superior a 40°C, dispondrán de un aislamiento térmico para reducir las pérdidas de energía.

Los espesores del material destinado al aislamiento térmico de las instalaciones cumplirán con todo lo indicado en el Apéndice 03.1 del RITE.

Dichos materiales cumplirán con lo señalado en el pliego de prescripciones técnicas, que a su vez cumplirá lo indicado en la norma UNE 100-171-89.

Los componentes que vienen aislados de fábrica tienen el nivel de aislamiento marcado por la respectiva normativa o determinado por el fabricante.

13.1. TUBERÍAS Y ACCESORIOS.

El espesor será como mínimo el que se indica en la tabla de la IT.IC.19.del reglamento de instalaciones de calefacción, climatización y A.C.S., en función del diámetro de la tubería y de la temperatura del fluido caloportador.

Esta tabla está indicada para tuberías que discurran por el interior, en caso de tuberías que discurran por el exterior se deberá aumentar el espesor en 10 mm.

Tanto para exterior como para interior el aislante deberá ser ignífugo. Las tuberías que discurran por exterior, dispondrán de una protección contra los agentes atmosféricos, para evitar deterioros y pérdidas evitables de calor.

Diámetro exterior tubería (mm) (*)	Espesor mínimo de aislamiento térmico (mm)			
	Temperatura del fluido (°C) (**)			
	40 a 65	66 a 100	101 a 105	150 a 200
$D \leq 35$	20	20	30	40
$35 < D \leq 60$	20	30	40	40
$60 < D \leq 90$	30	30	40	50
$90 < D \leq 140$	30	40	50	50
$140 < D$	30	40	50	60



(*) Diámetro exterior de la tubería sin aislar.

(**) Se escoge la temperatura máxima de la red.

Según la IT.IC.19., para las condiciones de trabajo del circuito primario y para un material aislante de conductividad térmica de $\lambda = 0,040 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$, como se verifica que:

- Diámetros inferiores a 35 mm.
- Temperaturas entre 40°C y 65°C .

Entonces el espesor mínimo del aislamiento para tuberías y accesorios de la instalación es de 20 mm para interior y de 30 mm para exterior.

Se adoptará un aislamiento de la marca SH/Armaflex de la casa Armstrong (es un aislamiento para tuberías de espuma elastomérica de células cerradas), con un espesor comercial de 28 mm para las tuberías exteriores.

13.2. DEPÓSITOS DE ACUMULACIÓN.

Según las especificaciones técnicas de diseño y montaje de instalaciones solares térmicas, el aislamiento de acumuladores cuya capacidad sea inferior a 300 litros será de un espesor mínimo de 30 mm., para volúmenes superiores el espesor mínimo será de 50 mm.

Según RITE 98 Apéndice 03.1, cuando los depósitos acumuladores tienen una superficie menor ó igual a 2 m^2 , el espesor del aislamiento es como mínimo de 30mm, mientras que si la superficie es superior a los 2 m^2 , el espesor del aislamiento es como mínimo de 50 mm, cuando se utilice un material aislante con una conductividad térmica de $\lambda = 0.04 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$.

El depósito acumulador en este caso tiene un volumen de 1000 L, luego para su aislamiento se utilizará espuma de poliuretano flexible de 100 mm de espesor acabado



en funda de PVC.

13.3. VASO DE EXPANSIÓN.

Para un material aislante de conductividad térmica de $0,040 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, el espesor de aislante para los vasos de expansión será de 30 mm.

En el exterior, el aislamiento llevará un recubrimiento de pintura asfáltica, de clorocaucho o similar.

14. SISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL.

El sistema de control de la instalación solar es un control diferencial de temperaturas, la centralita general de control recibe información de dos temperaturas diferentes del circuito primario, y actúa en función de su diferencia mediante una salida de relé.

Las sondas de temperatura miden las temperaturas del agua en los paneles y del agua en el acumulador solar respectivamente. Dichas temperaturas son comparadas en la centralita de manera que cuando la temperatura del agua en panel está entre 5°C y 7°C por encima de la temperatura del agua del acumulador, entonces da orden de funcionamiento a la bomba de circulación mediante la salida de relé. Y cuando la temperatura de paneles está sólo 3°C por encima de la temperatura del acumulador solar, entonces la centralita de control abre el relé de manera que la bomba para. Así se consigue transferir la energía desde los paneles al acumulador de forma eficiente

Las sondas de temperatura serán estancas y deberán disponer de un sistema adecuado que permita su fijación en los puntos requeridos.

El rango de temperaturas de ambiente en el que hay que exigir que el sistema de control funcione sin dificultades será como mínimo el comprendido entre los 10°C bajo cero y los 50°C , y el tiempo mínimo entre fallos especificado por el fabricante no deberá ser inferior a 7000 horas.

El sistema de control asegurará que en las instalaciones para agua sanitaria en ningún caso se alcancen temperaturas superiores a 45°C en los puntos de consumo recomendándose el uso de válvulas mezcladoras. También asegurará que en ningún caso



se alcancen temperaturas superiores a las máximas soportadas por los materiales, componentes y tratamientos del circuito secundario.

El termostato diferencial estará alojado en una carcasa estanca y deberá llevar en lugar visible una placa de características.

El sistema de control dispone además de tres tipos de seguridades:

- Protección antihielo.
- Protección de temperatura máxima en el acumulador.
- Protección del captador/refrigeración del acumulador.

Se elige finalmente para el control diferencial de la instalación una centralita modelo SOM 6 K de la marca STIEBEL ELTRON. Es un regulador de temperatura de tipo diferencial con caja de plástico. Limitación de temperatura máx. ajustable hasta 90°C. Compuesto de regulador y sondas de temperatura en el colector y el acumulador.

Características técnicas:

- o Punto de disparo ajustable.....2 hasta 10 (K).
- o Desconexión (histéresis).....1 hasta 9 (K).
- o Limitador de temperatura ajustable.....+0 hasta +100 (°C).
- o Sonda de temperatura de servicio.....-50 hasta +180 (°C).
- o Intervalo de regulación.....-20 hasta +150 (°C).



15. ESTRUCTURA SOPORTE

La estructura soporte del captador resistirá, con los captadores instalados, las sobrecargas de viento y nieve, de acuerdo con lo indicado en la normativa básica de la edificación CTE-DH4.

Las principales características son:

- El diseño y construcción de la estructura y el sistema de fijación de los captadores permitirá las necesarias dilataciones térmicas sin transmitir cargas que puedan afectar a la integridad de los captadores o el circuito hidráulico.
- La estructura se protegerá superficialmente contra la acción de los agentes ambientales. Las estructuras de acero podrán protegerse mediante galvanizado por inmersión, pinturas orgánicas de zinc o tratamientos anticorrosivos equivalentes. La estructura se diseñará y construirá de forma que los apoyos de sujeción del captador sean suficientes en número y tengan el área de apoyo y posición relativa adecuada de forma que no se produzcan flexiones del captador superior a las permitidas por el fabricante.

16. CABLEADO Y PROTECCIONES.

Se dimensionará la sección del conductor de la bomba del circuito primario, determinando el cableado y las protecciones necesarias, según el Reglamento Electrotécnico en Baja Tensión, REBT-IT-19.

16.1. CÁLCULO DEL CABLEADO.

Se calculará la sección del conductor por calentamiento y por caída de tensión:

- Por calentamiento: debido al efecto Joule, se puede producir la fusión del conductor, esto será debido al defecto de sección. El objetivo es permitir que circule la intensidad de uso de los receptores sin que se alcance una temperatura elevada.
- Por caída de tensión: esto es debido a que aunque la sección sea lo suficientemente grande para que no se funda, sea demasiado larga y al final de la línea la tensión sea muy baja, por tanto, se producirá una caída de tensión. Esta caída de tensión no puede sobrepasar unos valores dados en %. La sección que se adopte finalmente tiene que permitir que no se produzca una caída de tensión en el circuito superior al valor prefijado en el mismo.



Se tomará el mayor valor obtenido según ambos procedimientos, teniendo en cuenta que el valor mínimo de sección para conductores para fuerzas es de 2.5 mm^2 .

Cálculo de la sección por calentamiento:

Se calculará la intensidad que circulará a través de la línea, siguiendo el siguiente procedimiento:

- Monofásica:

$$I = P_c / (V \cdot \cos \alpha)$$

Donde,

-I = intensidad (A).

-P = Potencia (W).

-V = Tensión (V).

- $\cos \phi$ = Factor de potencia del motor.

- Trifásica:

$$I = P / (\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi)$$

Con el valor obtenido de la intensidad y según la ITC-BT-19 para este tipo de instalaciones se define la sección del conductor.

La potencia de cálculo será, al tratarse de un motor, la potencia nominal por 1.25:

$$P_c = P_n \times 1.25 = 30 \times 1.25 = 37.5 \text{ W}.$$

Al ser la bomba monofásica la intensidad máxima admisible será de:

$$I = P_c / (V \cdot \cos \alpha) = 37.5 / (230 \cdot 0.85) = 0.2 \text{ A}$$



Las intensidades máximas admisibles en servicio permanente para conductores aislados en canalizaciones fijas, y a una temperatura ambiente de 40°C son las señaladas en las Tablas I de la instrucción técnica 19, según sea el tipo de aislamiento y sistema de instalación.

Se eligen en base a esta tabla conductores aislados en tubos con montaje superficial² o empotrados en obra, con aislamiento de PVC, y con una sección de 2.5 mm². La corriente máxima que admite este conductor es de 15 amperios, de forma que cumple la condición de ser mayor ó igual que la calculada, con lo que el dimensionado es correcto.

• **Cálculo de la sección por caída de tensión:**

- Monofásica:

$$S_{CT}=2*P_c*L/(V*e*\sigma)$$

, donde:

SCT = Sección en mm².

-P_c = Potencia de cálculo del receptor.

-L = Longitud del circuito en metros.

-e = Caída de tensión en voltios.

-σ = Conductividad del material empleado (Cu: σ = 56 m/Ωmm²).

-V = Tensión entre fase y neutro.

- Trifásica:

$$S_{CT}=P_c*L/(V*e*\sigma)$$

Al ser la bomba monofásica la sección se calcula por la primera expresión y con los siguientes datos:



$V = 230$ voltios

$e = 5\%$ de la tensión.

$\sigma = 56 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ para el cobre.

$L = 10 \text{ m}$.

$P_c = 30 \text{ W}$

$$S_{CT} = 2 \cdot P_c \cdot L / (V \cdot e \cdot \sigma) = 2 \cdot 30 \cdot 10 / 230 \cdot (230 \cdot 0,05 \cdot 56) = 0,004 \text{ mm}^2$$

Se toma la sección normalizada inmediatamente superior a la obtenida por máxima caída de tensión que es de $2,5 \text{ mm}^2$.

La sección adoptada finalmente para el cable de la bomba del primario será la mayor obtenida por ambos procedimientos, en este caso iguales, luego será de $2,5 \text{ mm}^2$.

La sección del neutro, en una distribución monofásica será igual a la del conductor de fase.

16.2. CÁLCULO DE LAS PROTECCIONES.

• Magnetotérmicos.

Protegen a los circuitos (conductores y receptores) porque interrumpen automáticamente la alimentación si detectan una sobreintensidad. Ésta puede estar provocada por cualquiera de las dos causas siguientes:

- Sobrecargas: Interrumpirán el circuito, por su efecto térmico. Su funcionamiento depende además, de la duración de la sobrecarga.
- Cortocircuito: Abrirán el circuito por el efecto electromagnético. Su funcionamiento no depende del tiempo.

El calibre del magnetotérmico de la bomba del primario debe de ser superior a la intensidad que vaya a circular por la bomba e inferior a la intensidad máxima admisible de la sección adoptada.

$$I_C < I_{N\text{protección}} < I_{adm}$$



, siendo:

-IC = Intensidad de cálculo del circuito.

-INprotección = Intensidad nominal de la protección.

-Iadm = Intensidad máxima admisible del conductor.

De entre los valores normalizados de intensidad de magnetotérmicos se elegirá un interruptor de 10 A para proteger el circuito.

$$IC (0.4 A) < IN_{protección} (10 A) < I_{adm} (15 A)$$

- **Protección contra contactos indirectos.**

La protección contra contactos indirectos se hace con un diferencial de sensibilidad 30 mA.

