

Universidad Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

Área de Ingeniería Térmica



INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

ANÁLISIS DE MÉTODOS DE DIMENSIONADO DE INSTALACIONES SOLARES PARA ACS

Autora: Maite Ballesteros Ruiz

Tutor: Antonio Soria Verdugo

Diciembre de 2012

Título: Análisis de Métodos de Dimensionado de Instalaciones Solares para ACS

Autor: Maite Ballesteros Ruiz

Director: Antonio Soria Verdugo

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 20 de Diciembre de 2012 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	11
OBJETIVOS	13
INTRODUCCIÓN	15
1. Análisis Energético Actual	16
1.1. Introducción	16
1.2. Situación Energética en España	19
1.3. Impacto Medioambiental	24
1.4. Energías Renovables	25
2. Consumo de Energía en el Sector Residencial	26
2.1. Código Técnico de la Edificación (CTE)	27
2.2. Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE)	28
ENERGÍA SOLAR	29
1. Características del Sol	30
1.1. Posición solar	30
2. Clasificación de la Energía Solar	36
2.1. Energía Solar Fotovoltaica	37
2.2. Energía Solar Térmica	37
2.3. Energía Solar Térmica de Baja Temperatura	38
3. Radiación Solar	39
DESCRIPCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO	47
1. Localización	48
2. Descripción	49
3. Datos Previos	52
3.1. Datos meteorológicos	52
3.2. Datos de radiación incidente	53
4. Demanda de Agua Caliente Sanitaria	54
5. Contribución Solar Mínima	57

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN	59
1. Introducción	60
2. Sistema de Captación.....	61
2.1. Componentes de un colector solar	62
2.2. Modelo de colector empleado	64
2.3. Fluido caloportador.....	66
2.4. Disposición del sistema de captación.....	70
3. Sistema de Acumulación.....	72
3.1. Modelo de depósito de acumulación empleado	73
3.2. Disposición del sistema de acumulación	74
4. Sistema de Intercambio de Calor	74
4.1. Modelo de intercambiador de calor empleado	75
5. Sistema Auxiliar	80
5.1. Dimensionado de la caldera.....	80
5.2. Modelo de caldera empleado	83
6. Sistema de Distribución.....	83
6.1. Componentes del sistema de distribución.....	83
7. Sistema de Regulación y Control	85
8. Esquema de la Instalación.....	86
MÉTODO <i>f</i>-CHART	88
SIMULACIÓN	96
1. Datos Previos	97
2. Simulación.....	99
2.1. Sistema de captación.....	99
2.2. Sistema de acumulación	100
2.3. Sistema de intercambio de calor.....	101
2.4. Sistema de control	102
3. Resultados	103
3.1. Temperaturas obtenidas en la simulación	103
3.2. Aporte Solar	107



RESULTADOS FINALES	112
ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL	115
ANÁLISIS ECONÓMICO	118
1. Presupuesto.....	119
2. Subvenciones.....	120
3. Viabilidad Económica.....	120
CONCLUSIONES	123
BIBLIOGRAFÍA	126
ANEXOS	130
1. Planos del Edificio.....	131
2. Programación Matlab	134
3. Ficha técnica de los elementos utilizados	150

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

RESUMEN	11
OBJETIVOS	13
INTRODUCCIÓN	15
Figura 1.- Reparto del consumo de energía primaria en el mundo.	17
Figura 2.- Consumo de energía primaria mundial para cada tipo de energía.	17
Figura 3.- Grado de dependencia energética del exterior por países en 2010.	18
Figura 4.- Evolución histórica del consumo de energía final en España.	20
Figura 5.- Distribución del consumo de energía final en 2010.	21
Figura 6.- Distribución del consumo de energía primaria en 2010.	22
Figura 7.- Producción nacional de energía en 2010.	23
Tabla 1.- Grado de autoabastecimiento en España.	23
Figura 8.- Evolución del índice de emisiones GEI sobre el año base PK.	25
ENERGÍA SOLAR	29
Figura 9.- Estructura del Sol.	30
Figura 10.- Movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol.	31
Figura 11.- Declinación solar a lo largo del año.	31
Figura 12.- Ángulo horario a lo largo del día.	32
Figura 13.- Definición de masa de aire.	33
Figura 14.- Representación de los distintos ángulos que forma el Sol con el observador.	34
Figura 15.- Duración del día a lo largo del año.	35
Figura 16.- Irradiancia global media (kWh/m ²).	36
Figura 17.- Efectos atmosféricos sobre la radiación solar.	39
Figura 18.- Representación de la transparencia atmosférica en un año.	41
Figura 19.- Radiación global sobre una superficie horizontal para distintos días del año.	42

Figura 20.- Radiación en verano sobre una superficie inclinada en función del ángulo de inclinación.	43
Figura 21.- Radiación en invierno sobre una superficie inclinada en función del ángulo de inclinación.	44
Figura 22.- Representación de la inclinación de un panel solar para verano e invierno.	45
Figura 23.- Energía incidente sobre una superficie inclinada en función del ángulo de inclinación.	46
DESCRIPCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO	47
Figura 24.- Situación geográfica de Leganés en España.	48
Figura 25.- Zonas climáticas.....	49
Figura 26.- Vista delantera del edificio.....	50
Figura 27.- Vista posterior del edificio.	50
Tabla 2.- Número de personas en función del número de dormitorios de la vivienda..	50
Figura 28.- Plano de una de las viviendas de 3 dormitorios.	51
Tabla 3.- Dimensiones de una de las viviendas de 3 dormitorios.....	51
Tabla 4.- Datos meteorológicos de la ciudad de Leganés.....	52
Tabla 5.- Factor de corrección k para superficies inclinadas con una latitud=40°.....	53
Tabla 6.- Datos de energía media para la ciudad de Leganés.....	54
Tabla 7.- Demanda de ACS.....	54
Figura 29.- Variación del consumo de ACS.....	55
Tabla 8.- Factor de corrección del consumo mensual de ACS.....	55
Tabla 9.- Consumo medio y demanda energética de ACS mensuales.	56
Tabla 10.- Contribución solar mínima.....	57
DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN	59
Figura 30.- Elementos de un colector solar plano.....	63
Figura 31.- Captador solar plano marca Vaillant.....	64
Tabla 11.- Datos técnicos del colector solar AuroTHERM VFK 145 V, Vaillant.....	65
Figura 32.- Curva de rendimiento para el colector solar AuroTHERM VFK 145 V, Vaillant.....	66
Tabla 12.- Datos de la provincia de Madrid.	66
Figura 33.- Temperatura de congelación en función de la concentración en peso.	67
Figura 34.- Valores de densidad para distintas concentraciones de propilenglicol.....	68

Figura 35.- Valores de calor específico para distintas concentraciones de propilenglicol.	68
Figura 36.- Valores de conductividad térmica para distintas concentraciones de propilenglicol.	69
Figura 37.- Valores de viscosidad dinámica para distintas concentraciones de propilenglicol.	69
Tabla 13.- Propiedades del propilenglicol al 45% para una temperatura de 40°C.	70
Figura 38.- Separación entre filas de colectores.	71
Figura 39.- Acumulador MV4000I, Lapesa.	73
Figura 40.- Conexión en paralelo (izq.) y en serie (drcha.) de los depósitos de acumulación.	74
Figura 41.- Principio de funcionamiento en un intercambiador de calor de placas.	75
Figura 42.- Intercambiador CB60, marca Alfa Laval.	75
Tabla 14.- Características intercambiador CB60.	76
Tabla 15.- Caudal instantáneo mínimo para cada tipo de aparato.	80
Tabla 16.- Caudales instantáneos en el edificio de estudio.	81
Tabla 17.- Cálculo de los coeficientes de simultaneidad.	81
Figura 43.- Esquema de un vaso de expansión.	85
Figura 44.- Producción de ACS con acumuladores conectados en serie e intercambiador exterior.	86
MÉTODO <i>f</i>-CHART	88
Tabla 18.- Cálculo de la carga calorífica Q_c	90
Figura 45.- Cobertura solar mensual y anual según el método <i>f</i> -chart.	95
SIMULACIÓN	96
Figura 46.- Esquema de una instalación de ACS.	97
Figura 47.- Intercambiador de calor.	101
Figura 48.- Variación de las distintas temperaturas del sistema en invierno.	103
Figura 49.- Variación de las distintas temperaturas del sistema en verano.	105
Figura 50.- Variación de la temperatura de salida del colector a lo largo de un año. ..	106
Figura 51.- Variación de la temperatura del tanque a lo largo de un año.	106
Figura 52.- Variación de la temperatura del tanque para distintos días del año.	107
Tabla 21.- Cálculo del aporte solar mensual según la simulación real.	109
Figura 53.- Cobertura solar mensual y anual según la simulación real.	109

Figura 54.- Aporte solar y aporte auxiliar durante un año.....	110
Figura 55.- Calor producido mediante E. Solar y E. Auxiliar y demanda mensual de ACS.....	111
RESULTADOS FINALES	112
Figura 56.- Cobertura solar mensual para los dos métodos estudiados.....	113
ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL	115
Tabla 22.- Energía mensual aportada por la instalación y demanda de ACS.....	116
Tabla 23.- Toneladas de CO ₂ emitidas para cada instalación en 20 años.	117
ANÁLISIS ECONÓMICO	118
Tabla 24.- Presupuesto de la instalación.	119
Tabla 25.- Tarifas de Gas Natural. Fuente: Gas Natural Fenosa 2012.	121
Tabla 26.- Resultado del VAN para cada año.	122
Figura 57.- Periodo de retorno de la inversión.....	122
CONCLUSIONES	123
BIBLIOGRAFÍA	126
ANEXOS	130

RESUMEN

Resumen

En el presente proyecto se diseña y se estudia el funcionamiento de una instalación solar térmica para suministrar agua caliente sanitaria a un edificio de viviendas. Para ello se utilizan dos métodos de diseño distintos, uno siguiendo la reglamentación vigente en España y el otro utilizando datos reales obtenidos en el periodo de un año. Con este propósito se han seguido las siguientes etapas:

En primer lugar se ha estudiado la necesidad de suministro de ACS en el edificio propuesto, ya que tanto la zona climática como el número de habitantes de la vivienda afectan a la demanda de ésta.

A continuación se ha realizado el procedimiento de cálculo siguiendo el método *f*-chart, el más utilizado para el diseño de estas instalaciones. Gracias a este método es posible determinar la superficie de captación necesaria para proporcionar el aporte solar especificado en la normativa.

Por otra parte, se ha programado una simulación real del funcionamiento de este tipo de instalaciones con ayuda del programa Matlab. Para ello, es necesario conocer la radiación incidente sobre el sistema de captación, utilizando un ángulo fijo en los colectores, debido a la imposibilidad de variar la orientación e inclinación de éstos para seguir la trayectoria del Sol. Una vez conocidos los datos iniciales, se ha procedido al ensayo de la instalación solar con el fin de obtener resultados cercanos a la realidad.

Por último se ha realizado un análisis medioambiental y económico de la instalación solar, calculando el ahorro de emisiones de CO₂ que supone el empleo de energías renovables para proporcionar ACS a una vivienda, así como la viabilidad económica de este tipo de instalaciones.

OBJETIVOS

Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de una instalación solar térmica de baja temperatura para suministrar agua caliente sanitaria (ACS) a un edificio de viviendas situado en Leganés, en la Comunidad de Madrid. El empleo de energías renovables en el sector de la edificación pretende alcanzar un ahorro energético, disminuyendo la dependencia energética del exterior.

En el presente proyecto se pueden distinguir diferentes objetivos separados en los siguientes bloques:

- ❖ Realizar un estudio detallado de la vivienda y de la demanda de ACS, con el fin de diseñar una instalación apropiada.
- ❖ Estudiar el aporte solar mensual y anual que proporciona la instalación de estudio, realizando el método de cálculo vigente en España, el método *f*-chart, y compararlo con una simulación real realizada a partir de datos de radiación global sobre una superficie horizontal en un intervalo de una hora para un año completo.
- ❖ Realizar un estudio del impacto ambiental, con el que se pretende estimar la reducción en las emisiones de gases contaminantes que supone el empleo de energía solar para la producción de ACS, en lugar de utilizar energía convencional.
- ❖ Llevar a cabo un estudio económico de la instalación con el cual se determine la viabilidad económica del proyecto. Gracias a esto, puede convertirse en una alternativa de las instalaciones convencionales que resulte atractiva a los consumidores.

INTRODUCCIÓN

Introducción

1. ANÁLISIS ENERGÉTICO ACTUAL

1.1. Introducción

La energía se define como la capacidad de producir un trabajo. Dicha energía tiene una importancia excepcional en el mundo actual, ya que sin su consumo, el bienestar del que disfrutaban la mayoría de los habitantes del planeta sería inimaginable. El mayor problema de la energía lo presenta el derroche que se hace de ella, al no ser conscientes de que las fuentes de energía primaria no son inagotables. De este modo, el proceso del ciclo energético (obtención, procesado y suministro de energía) constituye un elemento significativo del sistema económico mundial.

Hay que tener en cuenta que prácticamente todos los países son a la vez productores y consumidores, y la mayoría de ellos son, al mismo tiempo, importadores y exportadores de uno o varios tipos de energía. En general, las grandes áreas desarrolladas como América del Norte, Europa Occidental y Central, Japón y otros países industriales del Pacífico, son bastantes deficitarios en energía, aunque algunos de ellos sean grandes productores de una o varias energías primarias. Debido a una distribución desigual de los recursos energéticos a lo largo del planeta y a la no coincidencia entre países con grandes recursos y países grandes consumidores, la energía se ha convertido en un objeto muy importante del comercio internacional. ^[1]

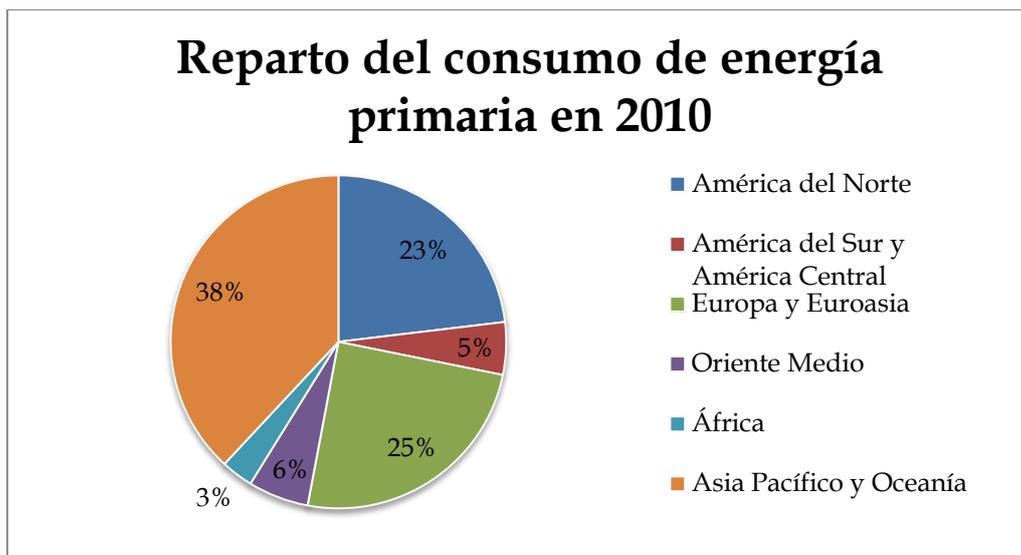


Figura 1.- Reparto del consumo de energía primaria en el mundo. Fuente: foronuclear.org.

Como se aprecia en el gráfico, Asia Pacífico y Oceanía consumen un 38% del total de la energía disponible en el mundo. Esto es debido principalmente al consumo de energía primaria que presenta China, 2.432 Millones de tep en 2010, siendo el mayor consumidor de energía del mundo, seguido de cerca por EEUU con 2.286 Millones de tep.

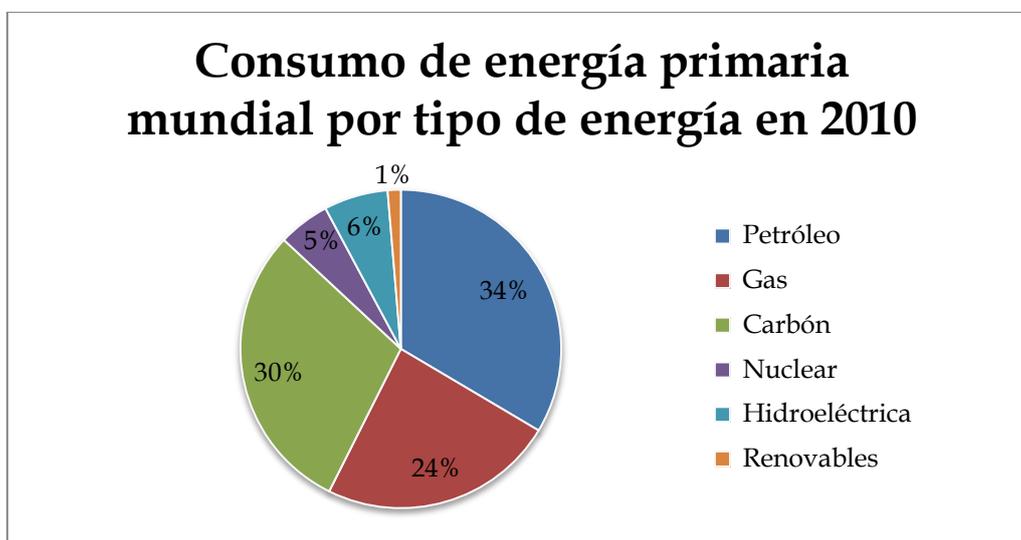


Figura 2.- Consumo de energía primaria mundial para cada tipo de energía. Fuente: foronuclear.org.

En la figura 2 se puede observar que las principales fuentes de energía consumidas en el mundo son el petróleo, el gas natural y el carbón. Únicamente una minoría de países tiene reservas de estos tipos de energía, sin embargo son consumidas

en grandes cantidades por todo el mundo. Concretamente en la Unión Europea existe una gran diferencia entre producción (830,8 Millones de tep) y consumo (1.733 Millones de tep), lo que da lugar a una dependencia de las importaciones de energía procedente de terceros países. Dicha dependencia evoluciona de forma creciente a medida que las fuentes de materias primas van agotándose o que los productores consideran que la explotación de recursos limitados no es rentable.

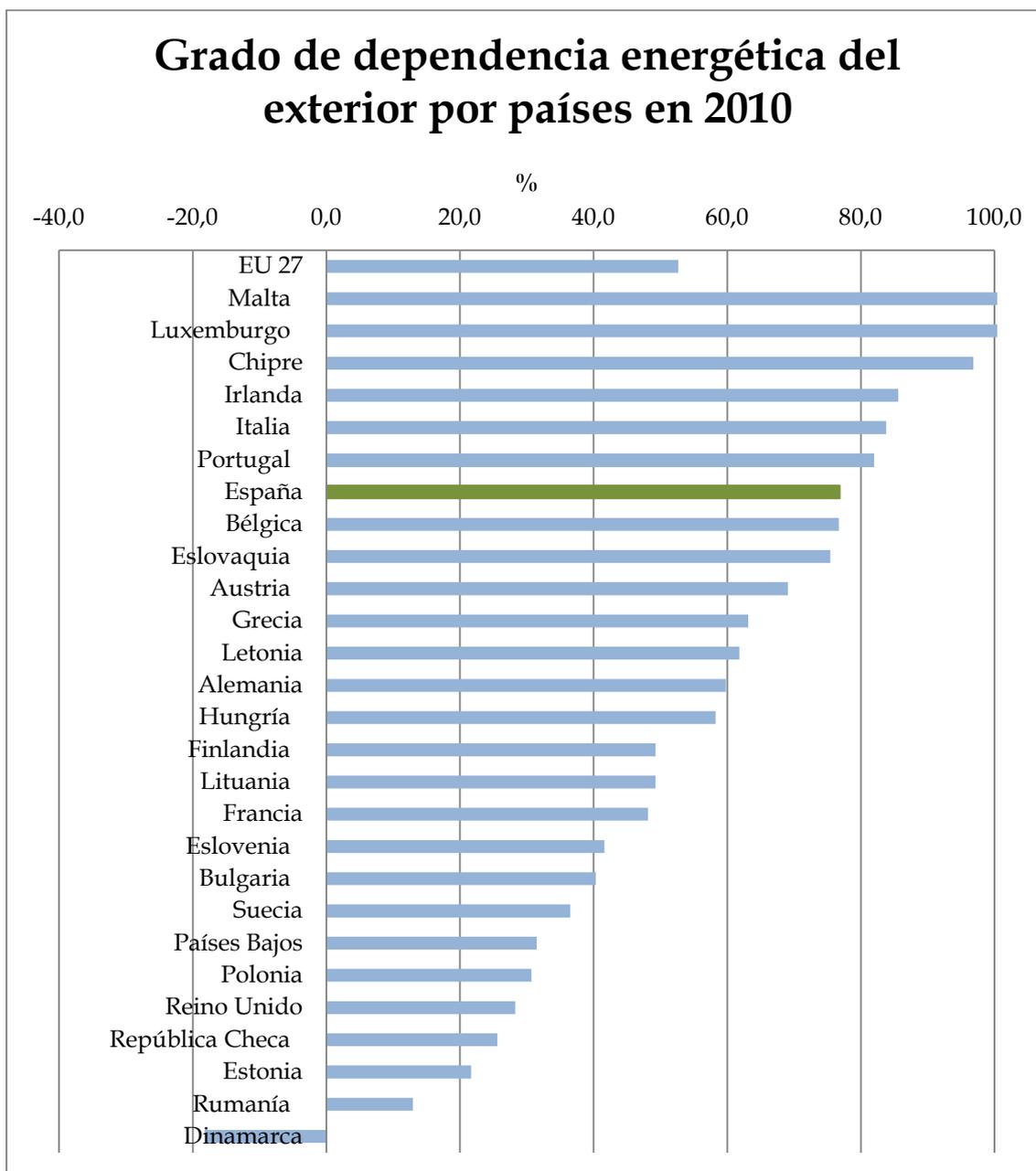


Figura 3.- Grado de dependencia energética del exterior por países en 2010. Fuente: foronuclear.org.

Las importaciones netas de energía de la EU-27 superan a la producción primaria desde 2004, lo que significa que más de la mitad del consumo interior bruto de energía de la EU-27 se cubre con importaciones netas.

En 2010, Dinamarca fue el único Estado miembro de la EU-27 con una tasa de dependencia negativa, por lo que se trata de un país exportador neto. Por otra parte, Malta, Luxemburgo y Chipre dependen prácticamente de las importaciones de energía primaria para cubrir sus necesidades, mientras que los Estados con una tasa de dependencia más baja (menor del 30%) fueron Rumanía, Estonia, República Checa y Reino Unido, como se puede observar en la figura 3. España, por su parte, presenta una tasa de dependencia exterior del 77%, lo que la convierte en el séptimo país de la Unión Europea con mayor dependencia energética.

La EU-27 debe importar más de la mitad de la energía consumida de países no pertenecientes a la Unión Europea. Gran parte de ella procede de Rusia, a partir del cual el suministro de energía se ha visto amenazado en los últimos años, debido a las disputas con los países de tránsito.

Con el fin de reducir los riesgos que conlleva la dependencia energética de la UE, la Comisión Europea ha adoptado una serie de iniciativas para definir las prioridades energéticas y establecer unas medidas con las que se pretende asegurar el abastecimiento energético. ^[2]

1.2. Situación Energética en España

España se ha caracterizado tradicionalmente por tener un mayor consumo de energía que la media de los países europeos para una misma unidad de producto interior bruto. Con el fin de corregir dicha tendencia, en los últimos años se han realizado importantes esfuerzos en materia de ahorro y eficiencia energética, lo que ha permitido acercarse progresivamente a los valores medios que presenta Europa. Concretamente, estas medidas adoptadas han conseguido un descenso de la intensidad energética final superior al 13% durante los últimos cinco años.

➤ **Demanda de energía final**

El consumo de energía final en España ha aumentado un 3,2% en 2010 respecto al año anterior. Este incremento viene determinado por la recuperación del consumo en algunos sectores industriales, el comercio y los servicios, tras la caída del 2009. A continuación se muestra un desglose del consumo de energía final distinguiendo las distintas fuentes de energía y su evolución a lo largo de los últimos años.

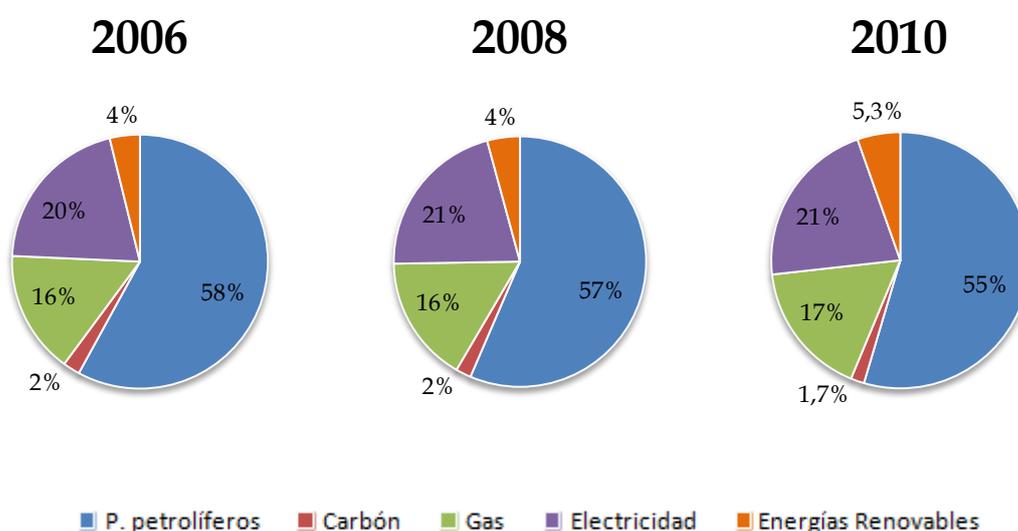


Figura 4.- Evolución histórica del consumo de energía final en España. Fuente: foronuclear.org.

En el gráfico se aprecia la importancia que tienen los productos petrolíferos en el consumo de energía en España, a pesar de su disminución a lo largo de los años. Por otra parte, el consumo de gas y electricidad presenta un pequeño incremento en los últimos años, mientras que el carbón ha disminuido ligeramente. Además, hay que destacar el aumento progresivo de las energías renovables, tomando cada vez más importancia en el consumo de energía final. Esta evolución de las energías renovables se debe en cierta medida a la creciente demanda en los sectores de transporte y edificios, especialmente el sector residencial.

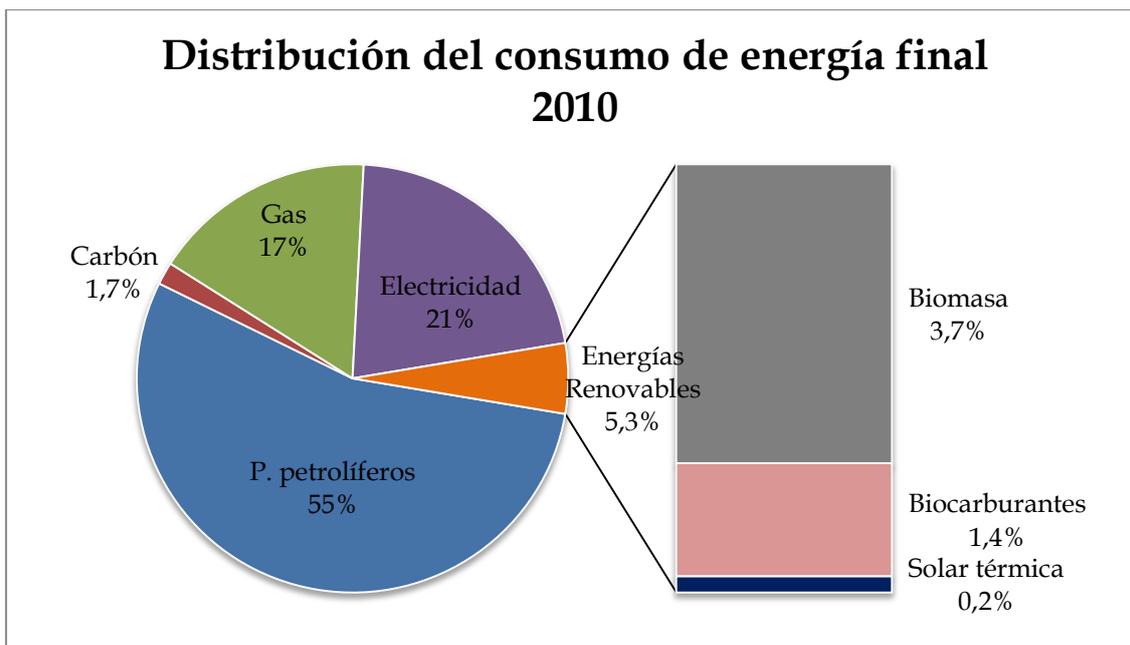


Figura 5.- Distribución del consumo de energía final en 2010. Fuente: foronuclear.org.

Dentro del porcentaje de energías renovables, destaca la biomasa y los biocarburantes, con un 3,7% y 1,4% respectivamente, y en menor medida el consumo de solar térmica (0,2%) para uso final de la energía.

➤ Demanda de energía primaria

El consumo de energía primaria en España se ha visto incrementado un 1,2% en 2010 respecto al año anterior, siendo dicho consumo de 132.123 ktep en el año 2010. En los últimos años se ha producido un cambio de estructura en la generación eléctrica que afecta a dicho aumento del consumo, inferior al de energía final. Concretamente, en 2010 ha crecido la producción eléctrica solar, eólica y la generación hidroeléctrica, lo que ha permitido un descenso en el consumo de carbón, gas y productos petrolíferos, que presentan un menor rendimiento por el tipo de tecnología empleada.

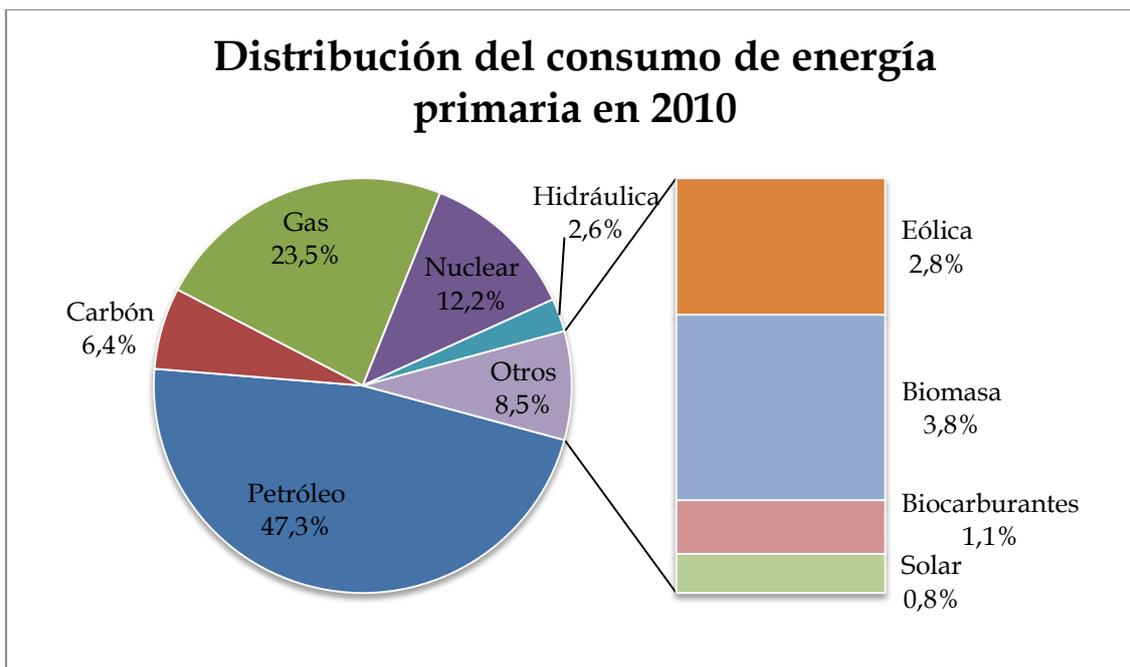


Figura 6.- Distribución del consumo de energía primaria en 2010. Fuente: foronuclear.org.

Dentro del consumo de energía primaria, el petróleo también es la principal fuente de energía, al igual que para energía final, solo que con un porcentaje menor. En este caso, las energías renovables, sin considerar la hidráulica, contribuyen con un 8,5% al consumo de energía primaria total. Dicho consumo corresponde a usos directos finales, especialmente biomasa y biocarburantes, así como al consumo en generación eléctrica a partir de eólica, biomasa, solar, etc.

➤ Producción de energía

En el año 2010 la producción interior de energía primaria se vio incrementada un 15,2% respecto al año anterior, produciendo 34.461 ktep, a causa del aumento en todas las fuentes de energía, excepto en carbón, destacando los crecimientos en hidráulica y otras renovables.

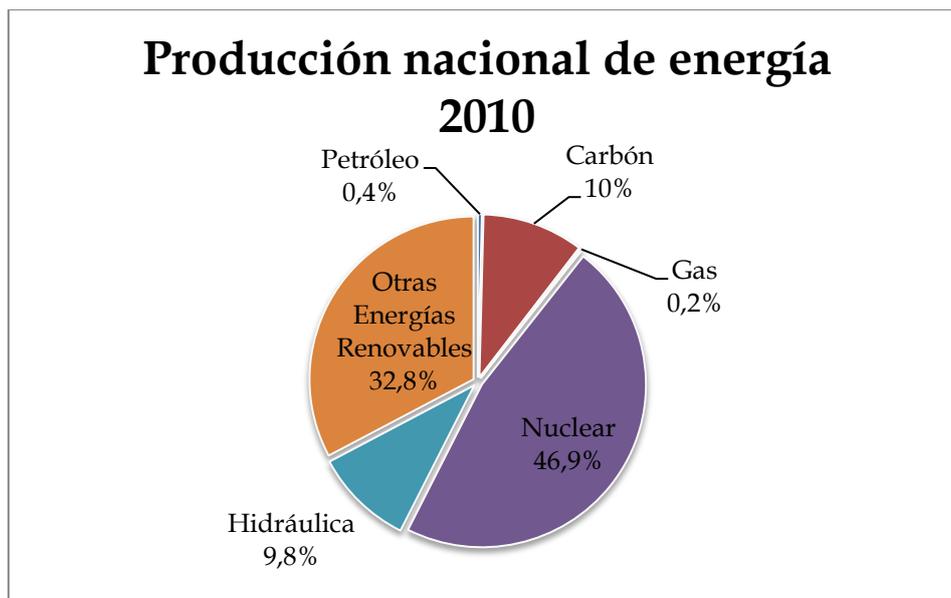


Figura 7.- Producción nacional de energía en 2010. Fuente: Ministerio de Industria.

Como se evalúa en el gráfico, la producción de petróleo y gas, con un 0,4% y 0,2% de la producción nacional de energía respectivamente, presenta niveles muy inferiores a los del consumo, por lo que España se ve en la necesidad de importar dichas fuentes de energía para cubrir las necesidades de consumo. Por otra parte, la energía nuclear y las energías renovables, hidráulica y otras, van adquiriendo una mayor importancia con el paso del tiempo, ya que consiguen más del 85% de la producción total de energía en España.

En la siguiente tabla se muestra el grado de autoabastecimiento en España para cada tipo de energía, es decir, la relación que existe entre la producción interior y el consumo total de energía.

	2009	2010
Petróleo	0,2	0,2
Carbón	36,8	40,7
Gas	0,0	0,2
Nuclear	100,0	100,0
Hidráulica	100,0	100,0
Otras Energías Renovables	100,0	100,0

Tabla 1.- Grado de autoabastecimiento en España. Fuente: Ministerio de Industria.

Como ya se ha mencionado, España presenta una dependencia total de otros países para el consumo de petróleo y de gas, como se indica en el bajo valor de autoabastecimiento mostrado en la tabla 1. Esta dependencia, además de desnivelar el mix energético, hace que nuestro país sea muy sensible a la volatilidad de sus precios. Sin embargo, tanto en energía nuclear, como hidráulica y otras energías renovables, dicho grado de autoabastecimiento es del 100%, lo que significa que es posible cubrir totalmente las necesidades con la producción interior. [3]

1.3. Impacto Medioambiental

Actualmente, el cambio climático es uno de los mayores desafíos a los que debe responder la humanidad. Los gases de efecto invernadero, especialmente el CO₂ y el metano, son el origen de este cambio climático. La Unión Europea lleva varios años comprometida en esta lucha, tanto europea como internacionalmente, y participa activamente en las negociaciones al respecto.

En 1997 se firmó el Protocolo de Kyoto, dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), donde los Estados miembros de la Comunidad Europea se comprometieron a reducir en el periodo del 2008 al 2012 sus emisiones de algunos gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento global. El objetivo de dicho Protocolo es reducir, al menos en un 5,2% respecto a los niveles de 1990, las emisiones de los seis gases de efecto invernadero originados por las actividades humanas: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFC), perfluorcarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆). Asimismo, también se promovió la generación de un desarrollo sostenible, de forma que se empleen energías no convencionales, con el fin de disminuir el calentamiento global. [4]

Dentro del compromiso general de reducir las emisiones, a cada país se le otorgó un margen distinto en función de diversas variables económicas y medioambientales. Específicamente, España se comprometió a aumentar sus emisiones un máximo del 15% respecto al año base y, según la evolución que presenta, tiene muy pocas posibilidades de cumplir con lo pactado.

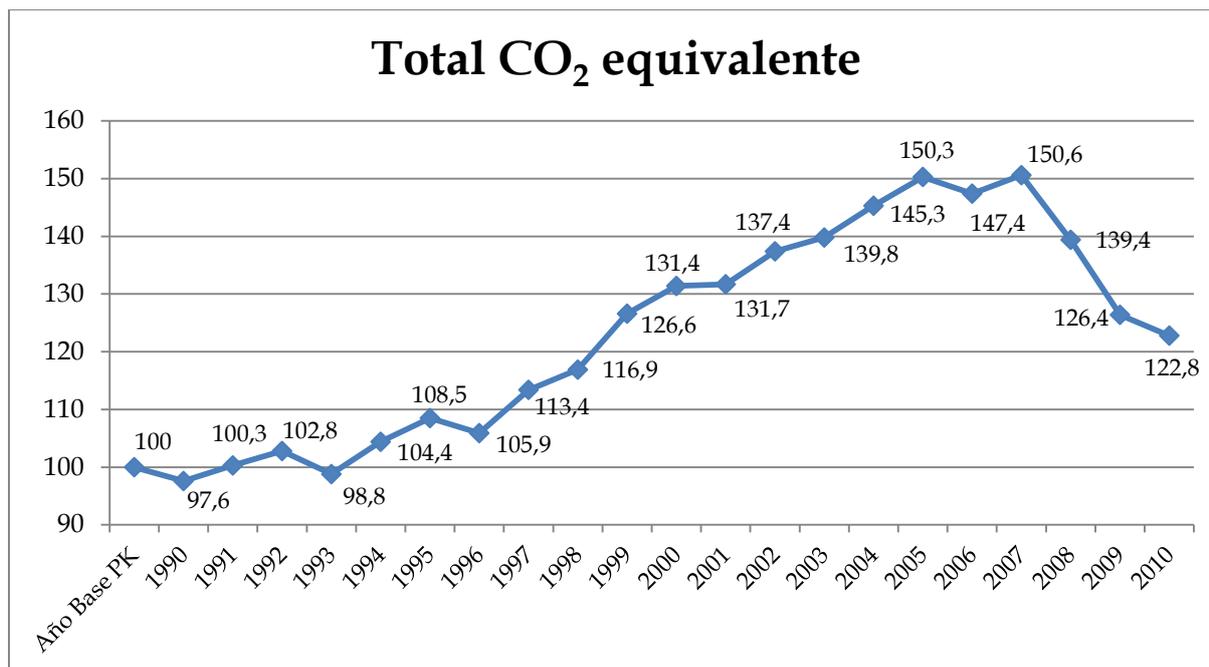


Figura 8.- Evolución del índice de emisiones GEI sobre el año base PK. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente [5].

Las emisiones de gases de efecto invernadero (emisiones GEI) se miden en términos de CO₂ equivalente y en 2010 en España se situaron en 355,9 millones de toneladas, lo que supone que el índice de referencia para el Protocolo de Kyoto (PK) se sitúa en el 122,8%, superior por tanto al objetivo del 115%. Para realizar este índice se toma como referencia 100% los 289,8 millones de toneladas del año base PK. Estos datos sitúan a España como uno de los países europeos más contaminantes, emitiendo una media de 8,86 toneladas de CO₂ por habitante en el año 2008, según EIA.

1.4. Energías Renovables

Como se ha explicado anteriormente, el gran consumo energético, la elevada dependencia exterior y las elevadas emisiones de gases de efecto invernadero justifican el fomento de energías renovables. En España, las energías renovables han evolucionado hacia una participación creciente en el sistema energético, como se aprecia en la demanda, tanto en energía primaria como final.

Con el fin de promover y facilitar el uso de los recursos renovables, el Parlamento Europeo ha fijado unos objetivos generales a cumplir por los Estados miembros de la UE. Estos objetivos consisten en conseguir una cuota del 20% de

energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía de la UE, el mismo objetivo establecido para España, y una cuota mínima del 10% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía en el sector del transporte para el año 2020. [6]

Las energías renovables presentan múltiples efectos positivos sobre la sociedad, como son la reducción de emisiones contaminantes, la sostenibilidad de sus fuentes, la reducción de la dependencia energética, el déficit de la balanza comercial y un avance hacia formas de energía más distribuidas. Estas ventajas suponen un mayor esfuerzo económico, el cual tiende a disminuir en el tiempo gracias al aprendizaje en dichas tecnologías. En general, los análisis realizados para el sistema español indican que los beneficios de las energías renovables son elevados y estables y superan a los costes, por lo que el apoyo a este tipo de energía está justificado. Los numerosos estudios realizados concluyen que, en España, hay un gran potencial de energías renovables, muy superior a la demanda energética nacional y a las existencias de recursos energéticos de origen fósil. Por tanto, puede decirse que las energías renovables son el principal activo energético de nuestro país.

2. CONSUMO DE ENERGÍA EN EL SECTOR RESIDENCIAL

Centrándose en el tema estudiado en el proyecto, el sector de la edificación y especialmente el sector residencial, España ha sufrido un incremento de la intensidad energética en la década de los 90, aunque en 2004 hubo un punto de inflexión y a partir de entonces se da una tendencia a la baja en la intensidad energética, consumiendo un 17,8% del consumo energético nacional en 2010. Este descenso continuado se debe a una moderación en la demanda y una mayor concienciación, además de las campañas de ahorro y eficiencia energética lanzadas por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. A pesar del descenso, el sector de la edificación se ha convertido junto con la industria en un gran consumidor de energía y un gran emisor de CO₂. Por ello, el desarrollo tecnológico de aplicaciones térmicas empleando energías renovables, ha adquirido una gran importancia con el fin de alcanzar los requisitos de ahorro y eficiencia energética.

En España la intensidad energética del sector residencial expresada en tep/hogar es aproximadamente el 60% de la media europea, debido a la climatología. Sin embargo, el consumo eléctrico en calefacción es elevado al no disponer en muchas viviendas de instalaciones fijas colectivas de calefacción, más eficientes que las individuales. La distribución de energía de una vivienda media española según datos del IDAE es la siguiente: calefacción (47%), agua caliente sanitaria (18,9%), electrodomésticos y cocinas (29,1%), iluminación (4,2%) y aire acondicionado (0,8%). En este reparto destaca que las instalaciones térmicas de la vivienda (calefacción y ACS) constituyen dos terceras partes del consumo energético de la vivienda.

En la actualidad existen numerosas posibilidades para integrar las energías renovables en el campo de la edificación. Para fomentar el uso de estas fuentes de energía, distintas administraciones se han implicado impulsando su uso en edificios públicos y redes urbanas de climatización, y modificando las normas y códigos del sector incluyendo las fuentes de energía renovable. Por otra parte, la aplicación de las medidas propuestas por el Plan de Acción 2008-2012 ha dado lugar a una mejora de la eficiencia energética en los edificios. [7]

2.1. Código Técnico de la Edificación (CTE)

El CTE es el marco normativo que determina las exigencias que deben cumplir los edificios atendiendo a unos requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley de Ordenación de la Edificación del CTE. Se encuentra dividido en seis Documentos Básicos que proponen las medidas necesarias para cumplir con la normativa de edificación de cada tipo de instalación contemplada en el Código. Dichos Documentos son los siguientes:

- DB SE: Seguridad estructural
- DB SI: Seguridad en caso de incendio
- DB SUA: Seguridad de utilización y accesibilidad
- DB HS: Salubridad
- DB HE: Ahorro de energía
- DB HR: Protección frente al ruido

El Documento Básico basado en el Ahorro de Energía tiene como objetivo conseguir un uso racional de la energía en los edificios, reduciendo su consumo y obteniendo parte de este consumo mediante el uso de energías renovables. Específicamente en esta sección, uno de los requisitos básicos se basa en una contribución solar mínima de agua caliente sanitaria para cada región de España, de modo que una parte de la necesidad energética del edificio se cubrirá mediante sistemas de captación, almacenamiento y utilización de energía solar de baja temperatura, teniendo en cuenta la localización y la demanda de agua caliente del edificio. [8]

La modificación del CTE fue la principal propuesta con el fin de impulsar las energías renovables en los edificios para avanzar en la independencia y autosuficiencia de éstos. Actualmente, los edificios de nueva construcción o rehabilitados están obligados a una contribución mínima de renovables para usos térmicos, con lo que una parte de las necesidades previstas de calefacción, agua caliente sanitaria o climatización se cubre con distintas posibilidades de energías renovables.

2.2. Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE)

Establece las exigencias en cuanto a eficiencia energética y seguridad que deben cumplir las instalaciones cuyo destino sea atender la demanda de bienestar térmico e higiene. Esto se lleva a cabo a través de las instalaciones de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria para cumplir el objetivo de dicho reglamento, es decir, conseguir un uso racional de la energía.

Para facilitar el cumplimiento del RITE se han creado los llamados documentos reconocidos que cuentan con el reconocimiento del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y el Ministerio de Vivienda, a pesar de no tener carácter reglamentario. Además, el RITE impone la obligación de realizar una revisión y actualización de las exigencias de eficiencia energética periódicamente, al menos cada 5 años. [9]

ENERGÍA SOLAR

Energía Solar

1. CARACTERÍSTICAS DEL SOL

El Sol es una estrella que se encuentra en el centro del Sistema Solar y es la más cercana a la Tierra, siendo la principal fuente de energía en forma de radiación electromagnética. La luz y el calor que proporciona el Sol son imprescindibles para el desarrollo y la vida de plantas, animales y humanos. Está compuesto de gas, principalmente Hidrógeno y Helio, y se encuentra a una distancia de 149,6 millones de km de la Tierra. El radio del Sol es de 695,5 km, lo que equivale aproximadamente a 109 veces el radio de la Tierra.

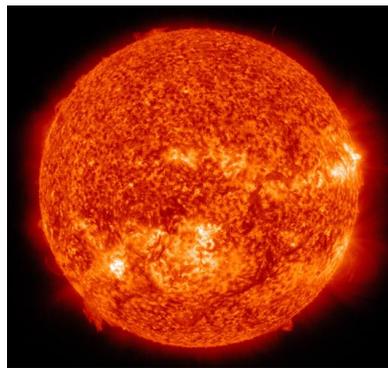


Figura 9.- Estructura del Sol.

1.1. Posición solar

➤ Movimiento de la Tierra alrededor del Sol

La Tierra, además del movimiento de rotación alrededor de su eje, gira formando una órbita alrededor del Sol. La trayectoria de esta órbita es una elipse y se completa en un período de un año. En la siguiente figura puede observarse que, debido a este movimiento de traslación, la distancia que existe del Sol a la Tierra varía para cada día del año. Dicha distancia varía entre 147 y 152 millones de km, siendo mínima para los meses de invierno y máxima para los meses de verano.



Figura 10.- Movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol.

➤ Declinación

El eje de la Tierra tiene una inclinación constante de $23,45^\circ$ respecto a la perpendicular al plano que contiene su órbita alrededor del Sol. Esta inclinación del eje terrestre es lo que da lugar a las estaciones. Se denomina declinación (δ) al ángulo que forman la dirección de los rayos de Sol y el ecuador, y varía sinusoidalmente entre $\pm 23,45^\circ$, definiéndose como positiva en el hemisferio norte y negativa en el hemisferio sur. La ecuación para calcular la declinación para cada día del año es la siguiente:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right)$$

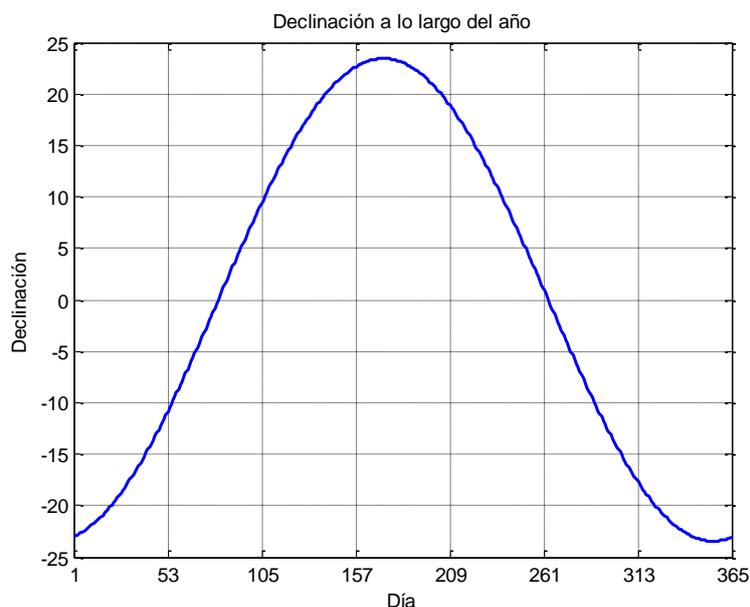


Figura 11.- Declinación solar a lo largo del año.

En la figura 11 se observa cómo en los días centrales del año los rayos solares inciden más perpendicularmente sobre el hemisferio norte y por tanto, es verano en este hemisferio e invierno en el hemisferio sur. Sin embargo, en los primeros y últimos días del año, será verano en el hemisferio sur e invierno en el hemisferio norte.

➤ **Ángulo horario**

El ángulo horario (ω) para una localización es el definido por dos planos que contengan al eje de la Tierra, uno de los cuales pasa por el meridiano local y otro por el Sol. Se toma como origen del ángulo las 12h del mediodía, ya que el Sol se encuentra en su punto más alto, y el valor aumenta en el sentido del movimiento del Sol a una velocidad de 15° por hora ($360^\circ/24h$). Siguiendo esto, antes de las 12h del mediodía el ángulo será negativo y en las horas posteriores será positivo.

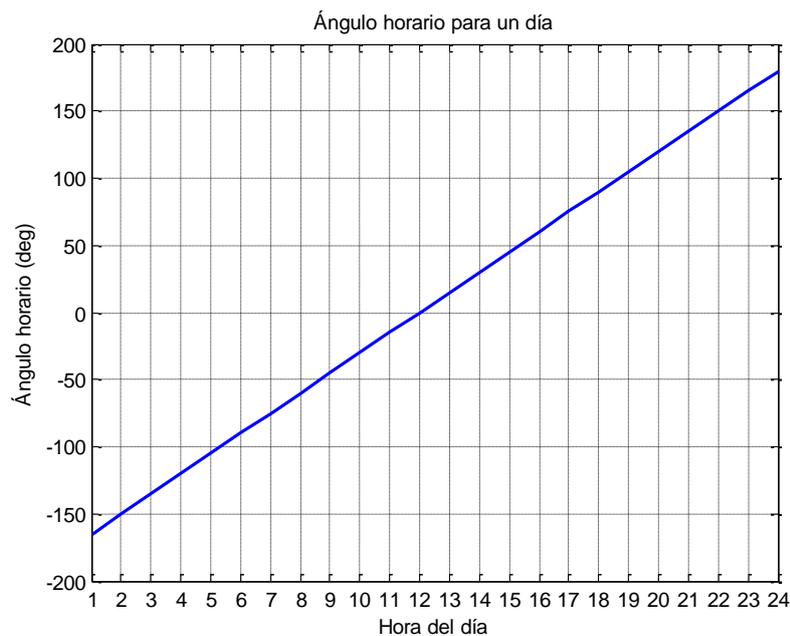


Figura 12.- Ángulo horario a lo largo del día.

➤ **Altura solar y Ángulo cenital**

La altura solar (α) representa el ángulo de la posición del Sol respecto al plano horizontal del observador. Este valor es función del día del año calculado (mediante la declinación δ), de la posición (con la latitud ϕ) y de la hora del día (con el ángulo horario ω).

La altura solar se calcula con la siguiente expresión:

$$\alpha = \arcsen(\sen(\delta) \cdot \sen(\phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega))$$

El ángulo cenital (θ_z) es el ángulo que forma la posición del Sol con el cenit, es decir, con el eje perpendicular al plano del observador que pasa por el punto de observación. Es el ángulo complementario a la altura y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\theta_z = \arccos(\sen(\delta) \cdot \sen(\phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega))$$

Al ser ángulos complementarios:

$$\alpha + \theta_z = 90^\circ$$

La altura solar es mayor durante el verano que en el invierno, por lo que la radiación procedente del Sol será mayor en verano, debido a la menor masa de aire que tiene que atravesar.

La masa de aire se define como el cociente entre la longitud de aire que atraviesa la radiación antes de llegar al suelo y la que atravesaría si el Sol estuviera en su cenit.

$$m = \frac{d_{atm}/\cos(\theta_z)}{d_{atm}} = \frac{1}{\cos(\theta_z)}$$

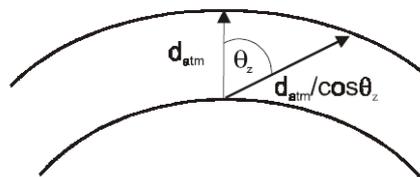


Figura 13.- Definición de masa de aire.

Un valor de masa de aire pequeño significa que incide una gran cantidad de radiación solar sobre el suelo, ya que los rayos solares inciden sobre la atmósfera más perpendicularmente que para una mayor masa de aire.

➤ **Ángulo azimutal**

Es el ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la línea que une al observador con el Sol y la dirección sur. Se considera positivo hacia el oeste y negativo hacia el este.

$$\gamma_s = \arcsen \left(\frac{\cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega)}{\cos(\alpha)} \right)$$

A continuación se representan el ángulo cenital y el ángulo azimutal para una posición del Sol concreta respecto a un colector solar.

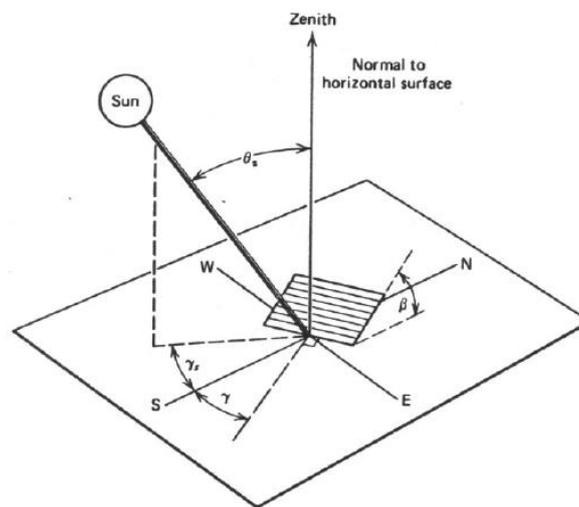


Figura 14.- Representación de los distintos ángulos que forma el Sol con el observador.

El ángulo β corresponde con la inclinación del colector, y el ángulo γ es la orientación del colector tomando como referencia el sur. Este ángulo será positivo hacia el este.

La inclinación óptima del colector varía para cada día del año en función de la latitud y la declinación, según la siguiente expresión:

$$\beta_{opt} = |\phi - \delta|$$

➤ **Ángulo de salida y puesta del Sol**

Corresponde con el ángulo en que el Sol sale y se pone respecto a la dirección sur. Ambos ángulos son semejantes por simetría y dependen de la latitud del lugar y la declinación:

$$w_{sh} = \arccos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta))$$

En el caso de estudiarlo para una superficie inclinada, el ángulo de salida y puesta del Sol es diferente:

$$w_{si} = \arccos(-\tan(\phi - \beta) \cdot \tan(\delta))$$

➤ **Duración del día**

La duración del día (DD) en horas se puede calcular a partir del ángulo de salida y puesta del Sol como:

$$DD = \frac{2 \cdot w_{sh}}{15(deg/hora)}$$

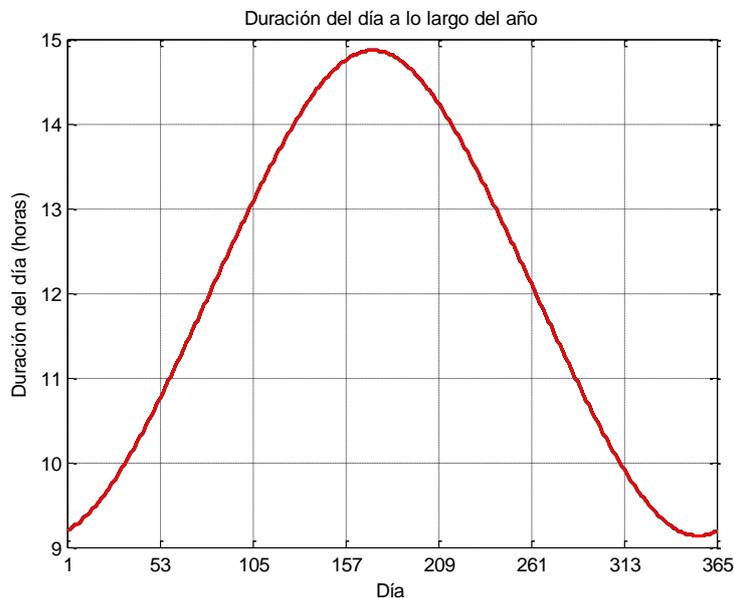


Figura 15.- Duración del día a lo largo del año.

Se puede observar que para los días centrales del año, correspondiente a los meses de verano, se dan más horas de luz alcanzando casi 15h del día, mientras que en invierno, la luz del Sol únicamente supera las 9h.

2. CLASIFICACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR

Se llama energía solar a la energía obtenida a partir del Sol gracias al aprovechamiento de la radiación electromagnética. Este tipo de energía se caracteriza por ser una fuente inagotable y no contaminante, aunque al no poderse almacenar debe ser transformada en otro tipo de energía inmediatamente (calor, electricidad, biomasa...). La energía solar se encuentra en continuo desarrollo durante los últimos años y presenta grandes expectativas para el futuro con el objetivo de convertirla en una fuente de energía competitiva.

España tiene un gran potencial para el aprovechamiento de este tipo de energía debido al nivel de irradiación solar que recibe, 1600kWh/m² al año sobre superficie horizontal, lo que la convierte en la mayor radiación de Europa. Además, el desarrollo del marco normativo y las subvenciones han logrado incrementar el aporte de energía solar al balance energético en este país.

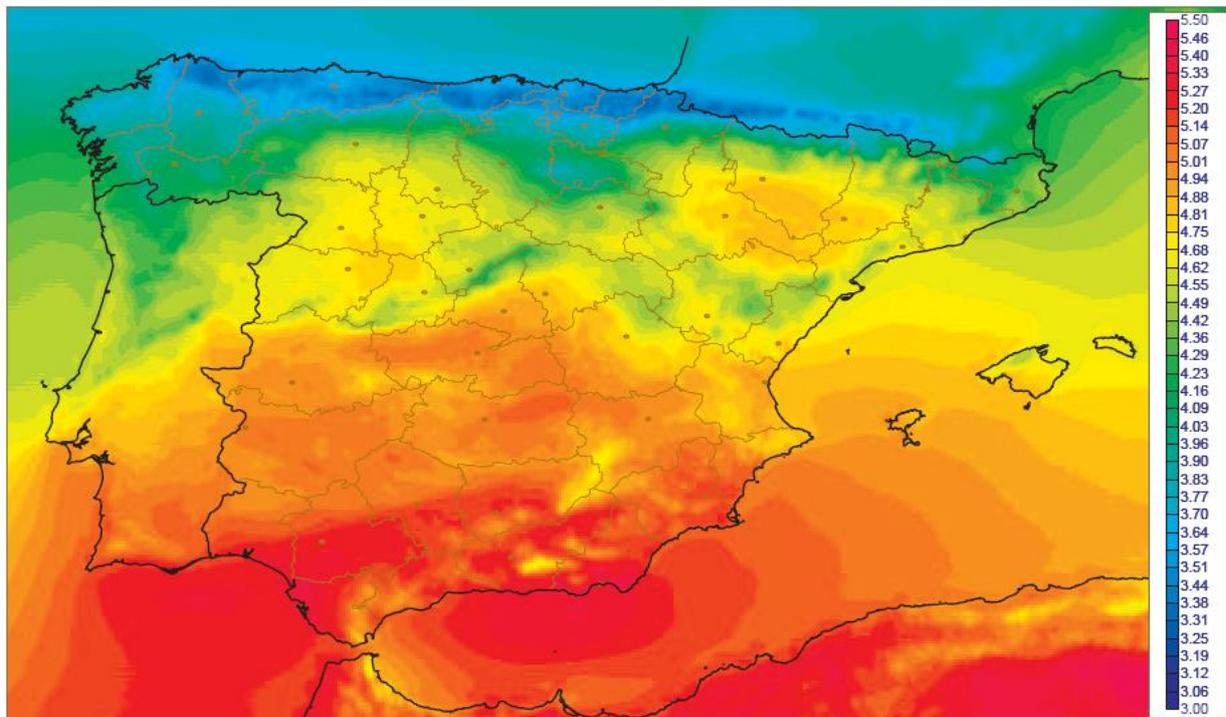


Figura 16.- Irradiancia global media (kWh/m²). Fuente: AEMET.

El aprovechamiento de la energía solar puede llevarse a cabo de dos maneras: fotovoltaica y térmica. Ambos procesos no se asemejan ni en la tecnología empleada ni en su aplicación.

2.1. Energía Solar Fotovoltaica

Se produce la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica mediante materiales semiconductores (células solares). Cuando los fotones inciden sobre estos materiales se produce un flujo de electrones que provocan electricidad. Es lo conocido como efecto fotovoltaico. La energía solar fotovoltaica puede utilizarse para sistemas aislados, lo que implica la posibilidad de disponer de electricidad en lugares alejados de la red de distribución eléctrica, o se puede inyectar la energía generada directamente a la red.

Una de las principales ventajas de este tipo de energía es que los módulos fotovoltaicos utilizados admiten radiación directa y difusa, por lo que pueden generar energía eléctrica también en días nublados. Además, tienen la posibilidad de instalar desde pequeñas centrales hasta centrales con una capacidad de megawattios. ^[10]

2.2. Energía Solar Térmica

Se obtiene energía calorífica gracias a la energía del Sol mediante captadores o colectores térmicos que calientan un fluido. Se utilizan colectores con una superficie oscura para absorber la mayor radiación posible y además se ayudan del llamado “efecto invernadero” para evitar las posibles fugas. La transformación que se lleva a cabo para conseguir energía calorífica puede darse a baja, media y alta temperatura.

➤ Baja temperatura

Se aprovecha la energía solar a temperaturas entre 35°C y 90°C mediante unos colectores planos por los que circula un fluido que absorbe la radiación solar y la transmite en forma de calor. Se emplea principalmente para calefacción doméstica, climatización y calentamiento de agua en piscinas, hospitales, etc. Actualmente es la principal aplicación de este tipo de energía en España.

➤ **Media temperatura**

Se trabaja a temperaturas que oscilan entre 90°C y 200°C y se utilizan colectores de concentración que pueden ser cilindro-parabólicos o heliostatos. Estos colectores trabajan sólo con la radiación directa, por lo que únicamente se pueden utilizar en zonas de alta insolación. Entre las principales aplicaciones destaca la producción de vapor para procesos industriales, la producción de energía eléctrica a pequeña escala y la desalinización del agua de mar.

➤ **Alta temperatura**

La temperatura de trabajo supera los 400°C. Estas instalaciones están formadas por una gran superficie de heliostatos que reflejan la radiación solar y la concentran en un punto receptor. Dicho receptor transmite la radiación a un fluido que circula por un circuito primario, éste transmite el calor a un circuito secundario y finalmente se produce energía eléctrica.

2.3. Energía Solar Térmica de Baja Temperatura

La energía solar de baja temperatura es la que se suele utilizar en el ámbito doméstico, instalándose en las azoteas de las viviendas o edificios comerciales. Esta tecnología es la más expandida debido a su utilidad como es la producción de agua caliente sanitaria en el sector residencial y servicios, la calefacción por suelo radiante, fan-coils o elementos radiantes, climatización de piscinas e incluso refrigeración.

A día de hoy la producción de agua caliente sanitaria (ACS) es la mayor aplicación práctica de la energía solar, estando la mayoría de los captadores solares instalados con ese fin. Los niveles de temperatura que hay que alcanzar para ACS oscilan entre los 40°C y 50°C, lo que coincide con la temperatura más apropiada para una buena eficacia del colector. Además, al ser una necesidad que debe ser satisfecha a lo largo de todo el año, la inversión en el sistema solar se rentabilizará más rápidamente que al utilizarlo para aplicaciones estacionales como la calefacción en invierno. [11, 12]

En este proyecto concretamente se estudia la energía solar térmica de baja temperatura para producir agua caliente sanitaria. A pesar de estar expandido mundialmente el empleo de energía solar para este uso, el tamaño de las instalaciones y el porcentaje de la demanda a cubrir dependen principalmente de la zona del mundo que se esté estudiando.

3. RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es un proceso mediante el cual se transmite energía procedente del Sol en forma de ondas electromagnéticas. El Sol prácticamente se comporta como un cuerpo negro emitiendo energía a unos 6000 K, siguiendo la ley de Planck. Esta radiación se distribuye en distintas longitudes de onda, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

A la superficie terrestre no le llega toda la radiación emitida por el Sol debido a diversos factores:

- Absorción: Proceso en el que la radiación solar es retenida y convertida en energía térmica.
- Reflexión: Parte de la radiación es desviada al incidir sobre un cuerpo.
- Dispersión: Es un fenómeno similar a la reflexión, solo que al desviarse la radiación se modifican los caracteres debido a la interacción de la luz con moléculas del aire, el agua o polvo en suspensión.

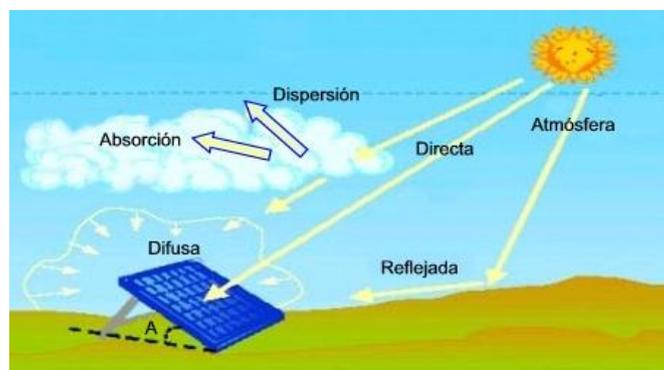


Figura 17.- Efectos atmosféricos sobre la radiación solar.

Estos procesos que sufren los rayos solares con los distintos gases permiten que no se produzcan cambios de temperatura muy extremos en la superficie terrestre.

En la mayoría de las aplicaciones solares la superficie del colector se encuentra inclinada formando un ángulo distinto en cada momento para captar mejor la radiación solar. Esta radiación incidente sobre una superficie inclinada es distinta a la que incide sobre una superficie horizontal, por lo que hay que corregir dicho valor. Para ello es necesario que tener en cuenta que la radiación global se descompone en: directa (b), difusa isotrópica (iso), difusa circumsolar (cs), difusa del horizonte (hf) y reflejada (r). [13, 14]

$$I = I_b + I_{d,iso} + I_{d,cs} + I_{d,hf} + I_{d,r}$$

Si se expresa la radiación global sobre un plano inclinado en función de las radiaciones sobre el plano horizontal:

$$A_c \cdot I_i = I_b \cdot R_b \cdot A_c + I_{d,iso} \cdot A_s \cdot F_{s_c} + I_{d,cs} \cdot R_b \cdot A_c + I_{d,hf} \cdot A_{hz} \cdot F_{hz_c} + I \cdot \rho_g \cdot A_g \cdot F_{g_c}$$

De donde:

A_c : Área del colector

ρ_g : Reflectividad del suelo, tomado como 0,2 por estar en condiciones normales.

$$A_s \cdot F_{s_c} = A_c \cdot F_{c_s}$$

$$A_{hz} \cdot F_{hz_c} = A_c \cdot F_{c_{hz}}$$

$$A_g \cdot F_{g_c} = A_c \cdot F_{c_g}$$

$$I_i = I_b \cdot R_b + I_{d,iso} \cdot F_{c_s} + I_{d,cs} \cdot R_b + I_{d,hf} \cdot F_{c_{hz}} + I \cdot \rho_g \cdot F_{c_g}$$

Donde F_{c_s} y F_{c_g} son los factores de forma entre el colector y el cielo y el colector y el suelo, respectivamente:

$$F_{c_s} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad F_{c_g} = \frac{1 - \cos(\beta)}{2}$$

Para el cálculo de la radiación global sobre una superficie inclinada se ha tomado el modelo isotrópico dentro de los modelos de cielo, el cual dice que toda la radiación difusa es isotrópica. [15]

Previamente se debe obtener la radiación difusa, para lo que se calculan una serie de parámetros:

- Constante solar (G_{0n}): Es la cantidad de energía recibida medida en un plano perpendicular al Sol situado en la parte externa de la atmósfera terrestre.

$$G_{0n} = 1367 \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right) (W/m^2)$$

- Índice de transparencia atmosférica (k_t): Se define como el cociente entre la radiación en un plano horizontal y la constante solar. Los días soleados este valor será alto mientras que tendrá un valor bajo para los días nublados.

$$k_t = \frac{I_h}{G_{0n}}$$

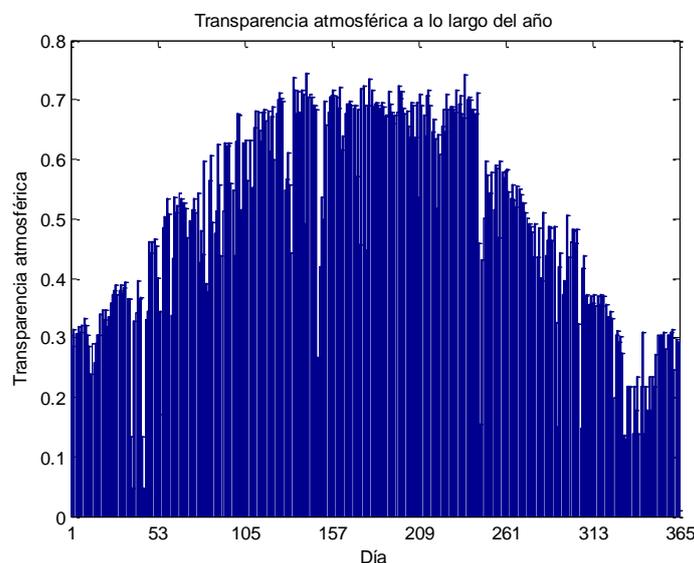


Figura 18.- Representación de la transparencia atmosférica en un año.

Para obtener la radiación difusa sobre una superficie horizontal se ha empleado una correlación de Orgill y Hollands:

$$I_d = \begin{cases} (1 - 0,249 \cdot k_t) \cdot I_h & \text{si } 0 \leq k_t < 0,35 \\ (1,557 - 1,84 \cdot k_t) \cdot I_h & \text{si } 0,35 \leq k_t < 0,75 \\ 0,177 \cdot I_h & \text{si } k_t > 0,75 \end{cases}$$

La relación entre la radiación sobre la superficie horizontal y sobre la superficie inclinada en el caso de radiación directa se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \text{sen}(\phi - \beta) \cdot \text{sen}(\delta)}{\cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta)}$$

Una vez obtenidos todos los valores necesarios se puede determinar la radiación sobre una superficie inclinada gracias a la siguiente ecuación:

$$I_i = (I_h - I_d) \cdot R_b + I_d \cdot F_{c_s} + I_h \cdot \rho_g \cdot F_{c_g}$$

Como se ha explicado anteriormente, la radiación horizontal e inclinada dependen del día del año estudiado, tal y como se representa en la gráfica 19:

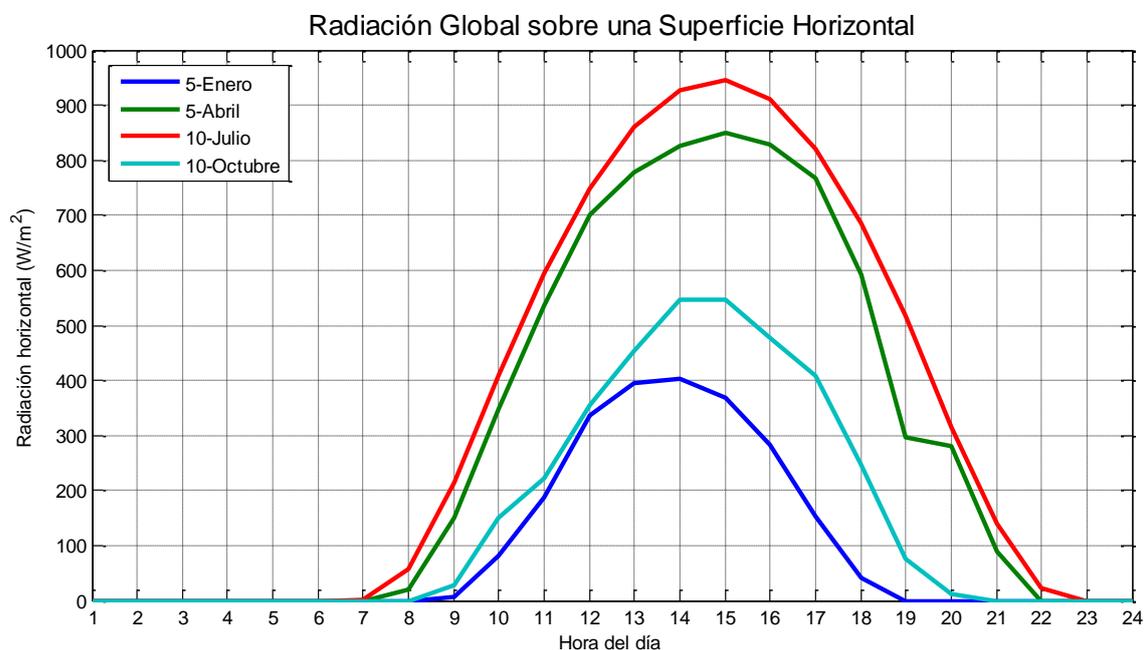


Figura 19.- Radiación global sobre una superficie horizontal para distintos días del año.

Se han representado días soleados para distintas épocas del año, ya que las nubes provocarían picos de radiación que pueden afectar a la correcta explicación de la gráfica.

Como puede apreciarse en la figura 19 la curva de radiación tiene la misma forma para todas las épocas del año, aumenta hasta llegar a un máximo en las horas centrales del día y después comienza a disminuir hasta que se pone el Sol. No obstante, puede distinguirse claramente la diferencia de los valores máximos de radiación que se produce entre los meses de verano y los meses de invierno y, además, como también

aparece en la gráfica, los meses de verano tienen más horas de luz que en invierno, hecho que se ha representado en la figura 15.

Hay que tener en cuenta que la energía captada en una superficie depende tanto de la radiación incidente como del tiempo de exposición, ya que se obtiene como la superficie bajo la curva de radiación solar para un determinado día.

Por último, en la gráfica se observa cómo varía la radiación para las distintas horas de un mismo día y dado que la demanda de energía solar no tiene porqué coincidir con las horas de mayor radiación, será necesario emplear un sistema de almacenamiento en las instalaciones solares para cubrir la demanda de energía en cada momento. En este proyecto se va a emplear la energía solar para una instalación de producción de energía térmica, por lo que el sistema de almacenamiento consistirá en un depósito.

A continuación se muestra la influencia del ángulo de inclinación (β) para captar la radiación incidente sobre un colector solar, para un día de verano y para un día de invierno.

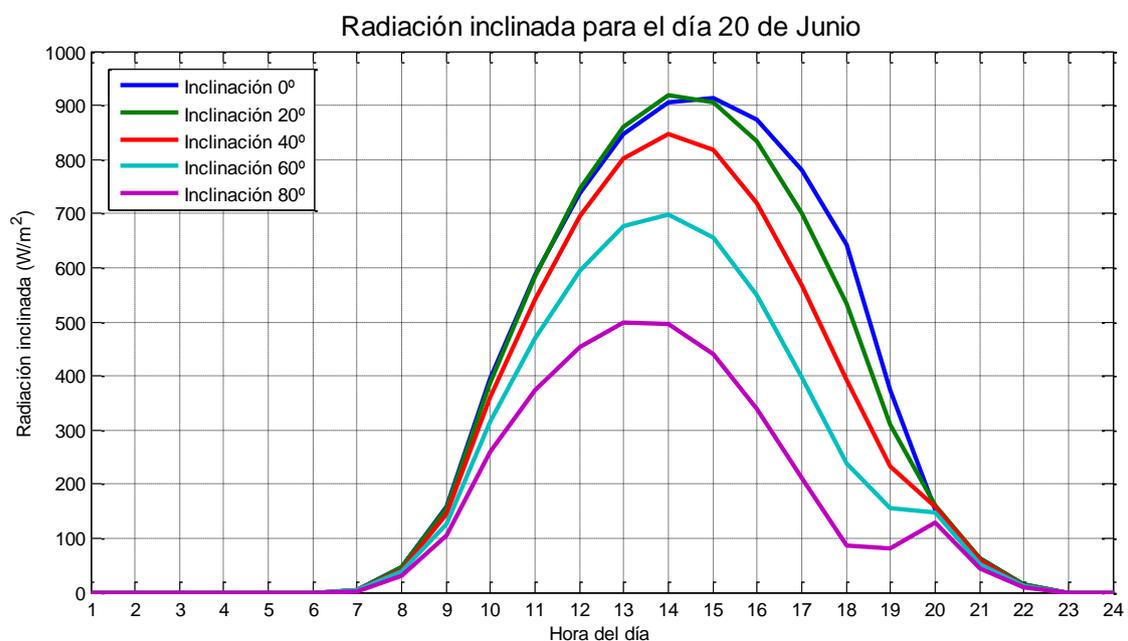


Figura 20.- Radiación en verano sobre una superficie inclinada en función del ángulo de inclinación.

En la figura 20 se observa cómo la radiación que incide sobre el colector es mayor para ángulos de inclinación pequeños, llegando a superar la radiación captada en el caso de una superficie horizontal, de forma que se maximiza así la radiación directa. Sin embargo, según se incrementa el ángulo de inclinación desde un ángulo óptimo, la radiación captada va disminuyendo. El ángulo de inclinación óptimo para conseguir la máxima radiación se puede calcular a partir de la declinación del día en concreto y la latitud del lugar de estudio, tal y como se ha explicado anteriormente.

En el caso de Leganés, para el día 20 de Junio el ángulo óptimo para un colector solar sería:

$$\beta_{opt} = |\phi - \delta| = 40,19 - 23,44 = 16,75^\circ$$

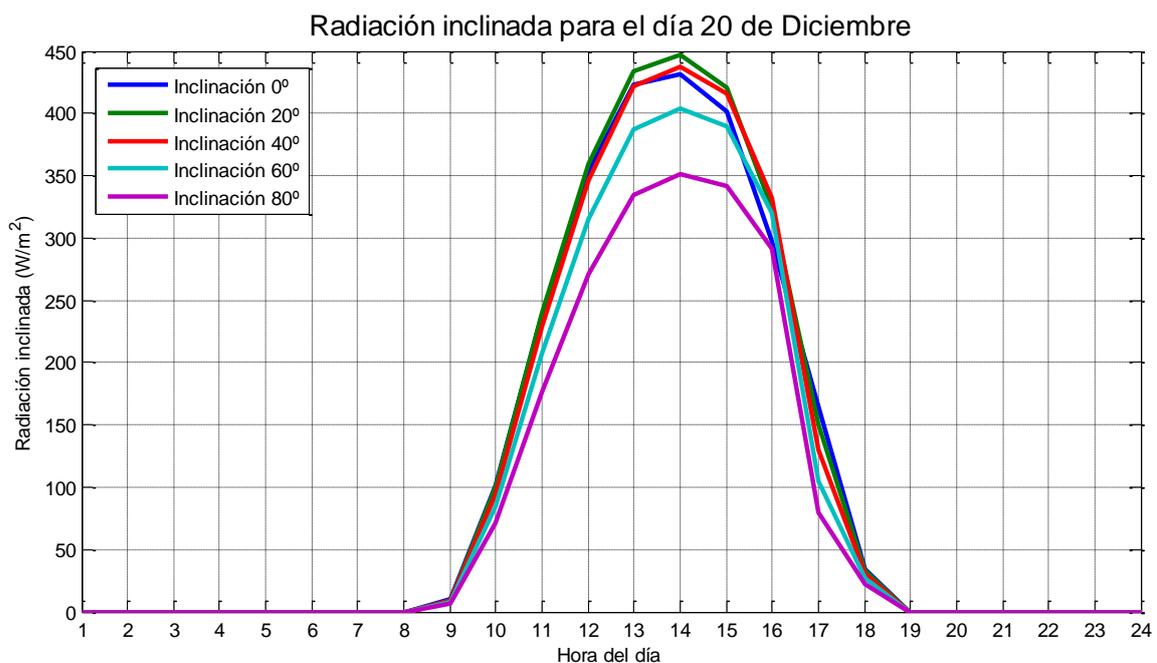


Figura 21.- Radiación en invierno sobre una superficie inclinada en función del ángulo de inclinación.

En invierno la variación de la radiación respecto a la inclinación del colector es similar al verano, siendo el ángulo óptimo de inclinación mayor en este caso. Esto es debido a un menor valor de la altura solar en invierno que en verano, teniendo por tanto que inclinar más el colector para captar la mayor radiación solar posible, como se representa en la figura 22. Una vez superado el ángulo determinado, para una mayor

inclinación la radiación captada disminuye. El ángulo óptimo para el día 20 de Diciembre en Leganés será:

$$\beta_{opt} = |\phi - \delta| = 40,19 - (-23,448) = 63,64^\circ$$

Según el valor de inclinación óptimo debería aumentar la radiación hasta esta inclinación y disminuir para mayores inclinaciones pero, como se aprecia en la figura, esto no ocurre exactamente así, sino que a partir de unos 40° de inclinación la radiación incidente comienza a disminuir. Esto se debe a que la radiación sobre una superficie inclinada es función tanto de la radiación directa como de la radiación difusa y la reflejada. El ángulo calculado β_{opt} únicamente tiene en cuenta la radiación directa, pero según se incrementa la inclinación del colector adquiere mayor importancia el factor de visión del suelo, aumentando por tanto el multiplicador de la radiación reflejada y disminuyendo el de la radiación difusa, lo que da lugar a que la suma de ambos valores se reduzca y el valor de la radiación global sea menor. Para el verano, dado que el ángulo de inclinación óptimo es pequeño, este hecho no llega a afectar ya que para esa inclinación aún prevalece la radiación directa. [16]

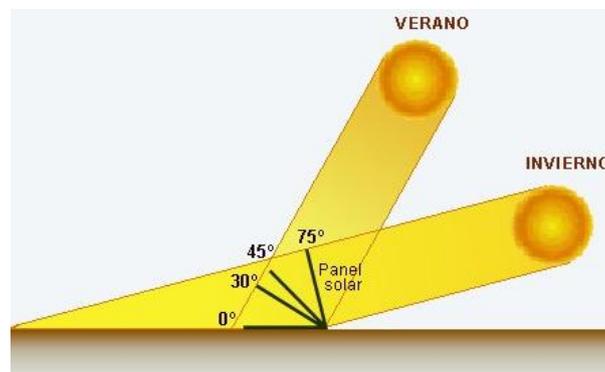


Figura 22.- Representación de la inclinación de un panel solar para verano e invierno.

En este proyecto se van a colocar una serie de colectores solares con el fin de cubrir la demanda de agua caliente sanitaria (ACS) para un edificio de viviendas. Dicha demanda se verá incrementada en los meses de invierno, no coincidiendo por tanto con los meses de mayor radiación solar. Para favorecer la producción de ACS en invierno es necesario inclinar los colectores un ángulo determinado que pueda captar el máximo de radiación solar directa durante estos meses.

Para ello se ha estudiado el ángulo de inclinación con el que la radiación incidente es mayor durante los meses de invierno. Se han considerado los meses comprendidos entre Enero y Marzo y entre Octubre y Diciembre. En la siguiente figura se muestra la energía incidente durante dichos meses para distintos ángulos de inclinación (β).

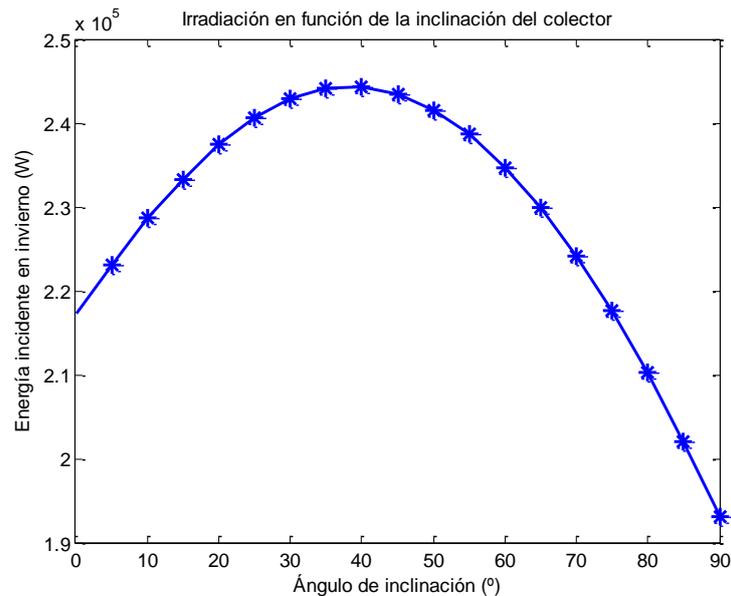


Figura 23.- Energía incidente sobre una superficie inclinada en función del ángulo de inclinación.

Como se puede apreciar en la figura 23 se da un determinado ángulo de inclinación para el cual la radiación incidente en invierno llega a un máximo, hecho que se ha explicado anteriormente con ayuda de la figura 21. Dicho máximo se alcanza para un valor $\beta = 40^\circ$, coincidiendo por tanto con el valor de la latitud del lugar de estudio. Para una inclinación del colector inferior o superior a este valor, no se conseguirá toda la radiación solar posible.

DESCRIPCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

Descripción del Emplazamiento

1. LOCALIZACIÓN

En este proyecto se va a diseñar una instalación solar térmica en un bloque de pisos situado en Leganés, en la Comunidad de Madrid. La localización geográfica del edificio de estudio afecta a los cálculos que se realizarán para determinar el número correcto de colectores solares, con el objetivo de cubrir las necesidades de agua caliente especificadas.

El edificio está ubicado en Leganés, concretamente en el barrio de San Nicasio. Los datos relativos a la situación geográfica habrá que tenerlos en cuenta para posteriores cálculos.

Latitud = $40^{\circ} 19' N$, Longitud = $3^{\circ} 45' O$. La elevación de la ciudad es de 665 m.



Figura 24.- Situación geográfica de Leganés en España.

El mapa de España se ha dividido en diferentes zonas climáticas según el CTE, en función de la radiación solar global media diaria anual sobre una superficie horizontal. Dichas zonas climáticas se numeran del I al V, como se aprecia en la siguiente figura:

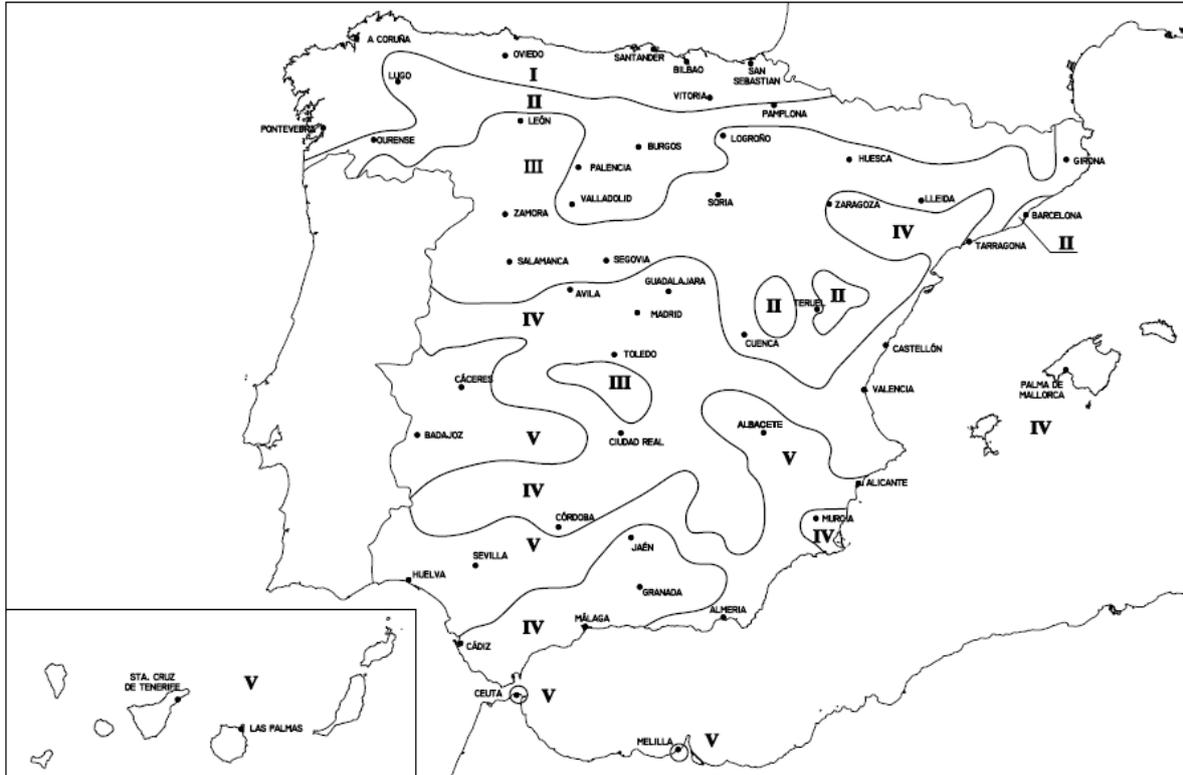


Figura 25.- Zonas climáticas. Fuente: DB-HE, CTE.

El inmueble está situado en la Comunidad de Madrid, por lo que la zona climática es IV.

2. DESCRIPCIÓN

El edificio de estudio consiste en un bloque de pisos de nueva construcción situado en el barrio de San Nicasio. El inmueble consta de un total de 176 viviendas repartidas en 5 plantas, 104 viviendas de 3 dormitorios, de las cuales 5 se han diseñado para personas con movilidad reducida, y 72 viviendas de 2 dormitorios.



Figura 26.- Vista delantera del edificio.



Figura 27.- Vista posterior del edificio.

Sabiendo el número de viviendas de 2 y 3 dormitorios del edificio de estudio, se puede obtener el número aproximado de habitantes con ayuda de la siguiente tabla:

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.- Número de personas en función del número de dormitorios de la vivienda. Fuente: DB-HE, CTE.

$$N_{personas} = 4 \text{ personas} \cdot 104 \text{ viviendas} + 3 \text{ personas} \cdot 72 \text{ viviendas} = 632 \text{ personas}$$

A continuación se representa el plano de una de las viviendas de 3 dormitorios del bloque de pisos como ejemplo.

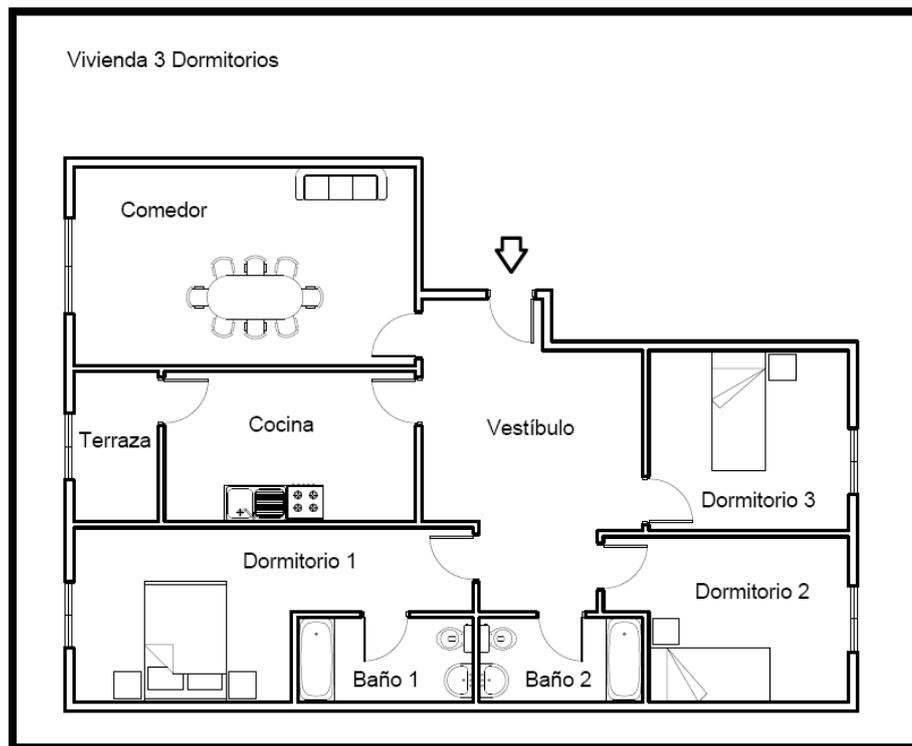


Figura 28.- Plano de una de las viviendas de 3 dormitorios.

Este modelo de vivienda se repite en las distintas plantas del edificio. Las dimensiones de la vivienda mostrada en la figura 28 se resumen en la tabla 3:

Dimensiones	
Vestíbulo	13,75 m ²
Cocina	10,35 m ²
Terraza	3,50 m ²
Comedor	18,15 m ²
Dormitorio 1	14,41 m ²
Dormitorio 2	10,25 m ²
Dormitorio 3	9,90 m ²
Baño 1	4,25 m ²
Baño 2	4,05 m ²
Superficie útil total	88,61 m²

Tabla 3.- Dimensiones de una de las viviendas de 3 dormitorios.

En el anexo al final del proyecto se adjunta un plano de una vivienda tipo de 2 dormitorios y de una vivienda tipo de 3 dormitorios.

Por último, gracias a la disposición del tejado, los colectores solares se colocarán con orientación al sur para favorecer la captación solar de los mismos.

3. DATOS PREVIOS

Los datos meteorológicos se obtienen a partir de estadísticas realizadas gracias a valores tomados por distintas estaciones meteorológicas y recogidos para las principales ciudades de España. Por ello, los valores de temperatura y radiación tomados como referencia para la Comunidad de Madrid se expresan como valores medios para los distintos meses del año.

3.1. Datos meteorológicos

A continuación se muestran recogidas en una tabla las horas de sol diarias para la ciudad estudiada, así como la temperatura media del agua de red y la temperatura ambiente media durante las horas de sol.

	Temperatura del agua de red (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Horas de sol diarias
Enero	8	6	8
Febrero	8	8	9
Marzo	10	11	9
Abril	12	13	9,5
Mayo	14	18	9,5
Junio	17	23	9,5
Julio	20	28	9,5
Agosto	19	26	9,5
Septiembre	17	21	9
Octubre	13	15	9
Noviembre	10	11	8
Diciembre	8	7	7,5
Media Anual	13	15,6	8,9

Tabla 4.- Datos meteorológicos de la ciudad de Leganés. Fuente: Censolar y UNE 94002.

3.2. Datos de radiación incidente

En el Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura se recogen varias tablas con la energía que incide sobre un metro cuadrado de superficie horizontal para un día medio de cada mes y con factores de corrección para superficies inclinadas en función de la latitud del lugar estudiado. Dicha corrección corresponde con el cociente entre la energía total incidente en un día sobre una superficie orientada hacia el ecuador e inclinada en un determinado ángulo, y otra horizontal. [17]

A partir de los datos de energía media H (MJ/m²) y aplicando el factor de corrección k para una latitud de 40° e inclinando la superficie 40°, valor máximo calculado en con ayuda de la gráfica 23 mostrada en el capítulo de Energía Solar, se puede obtener la energía media corregida H_c (MJ/m²). Estos datos se recogen en la tabla 6.

$$H_c = k \cdot H$$

LATITUD = 40°

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	1,05	1,03	1,02	1,01	1,02	1,03	1,05	1,08	1,09	1,09
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	1,2	1,16	1,12	1,07	1,03	1,02	1,04	1,08	1,14	1,21	1,25	1,24
20	1,25	1,2	1,14	1,08	1,03	1,02	1,03	1,09	1,17	1,26	1,32	1,3
25	1,3	1,23	1,16	1,08	1,02	1	1,02	1,09	1,19	1,3	1,38	1,36
30	1,34	1,26	1,17	1,07	1,01	0,98	1,01	1,09	1,2	1,34	1,43	1,41
35	1,37	1,28	1,17	1,06	0,98	0,95	0,98	1,07	1,21	1,37	1,47	1,45
40	1,39	1,29	1,16	1,04	0,95	0,92	0,95	1,05	1,21	1,39	1,5	1,48
45	1,4	1,29	1,15	1,01	0,91	0,88	0,92	1,03	1,2	1,39	1,52	1,5
50	1,41	1,28	1,13	0,98	0,87	0,83	0,87	0,99	1,18	1,39	1,54	1,52
55	1,4	1,27	1,1	0,94	0,82	0,78	0,82	0,95	1,15	1,38	1,54	1,52
60	1,39	1,24	1,07	0,89	0,77	0,72	0,77	0,9	1,12	1,36	1,53	1,51
65	1,37	1,21	1,03	0,84	0,71	0,66	0,71	0,85	1,07	1,34	1,51	1,5
70	1,34	1,17	0,98	0,78	0,64	0,59	0,64	0,79	1,02	1,3	1,49	1,47
75	1,3	1,13	0,92	0,72	0,57	0,52	0,57	0,73	0,97	1,25	1,45	1,44
80	1,25	1,08	0,86	0,65	0,5	0,45	0,5	0,66	0,9	1,2	1,41	1,4
85	1,2	1,02	0,8	0,58	0,43	0,37	0,42	0,58	0,84	1,14	1,35	1,35
90	1,14	0,95	0,73	0,5	0,35	0,29	0,34	0,5	0,76	1,07	1,29	1,29

Tabla 5.- Factor de corrección k para superficies inclinadas con una latitud=40°.

	Energía media (MJ/m ²)	k	Energía media corregida (MJ/m ²)
Enero	6,7	1,39	9,3
Febrero	10,6	1,29	13,7
Marzo	13,6	1,16	15,8
Abril	18,8	1,04	19,6
Mayo	20,9	0,95	19,9
Junio	23,5	0,92	21,6
Julio	26	0,95	24,7
Agosto	23,1	1,05	24,3
Septiembre	16,9	1,21	20,4
Octubre	11,4	1,39	15,8
Noviembre	7,5	1,50	11,3
Diciembre	5,9	1,48	8,7
Media Anual	15,4	1,19	18,4

Tabla 6.- Datos de energía media para la ciudad de Leganés. Fuente: Censolar.

4. DEMANDA DE AGUA CALIENTE SANITARIA

Para determinar el consumo total de agua en el edificio se hace uso del DB-HE Ahorro de Energía, del CTE.

Criterio de demanda	Demanda de referencia a 60°C	
	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 7.- Demanda de ACS. Fuente: DB-HE, CTE.

Debido a que se trata de viviendas multifamiliares y sabiendo el número de habitantes total del edificio, la demanda de ACS se obtiene como:

$$D_{ACS} = 632 \text{ personas} \cdot 22 L_{ACS}/\text{persona al día} = 13.904 L_{ACS}/\text{día}$$

La demanda de ACS no se mantiene constante a lo largo del año, sino que cambia para todos los meses debido a la variación de la temperatura de red que se da entre los meses de invierno y verano, y con ello la consecuente variación en la demanda de ACS. En el documento DTIE 1.01 relativo a la preparación de agua caliente para usos sanitarios se muestra la desviación media del consumo mensual. [18]

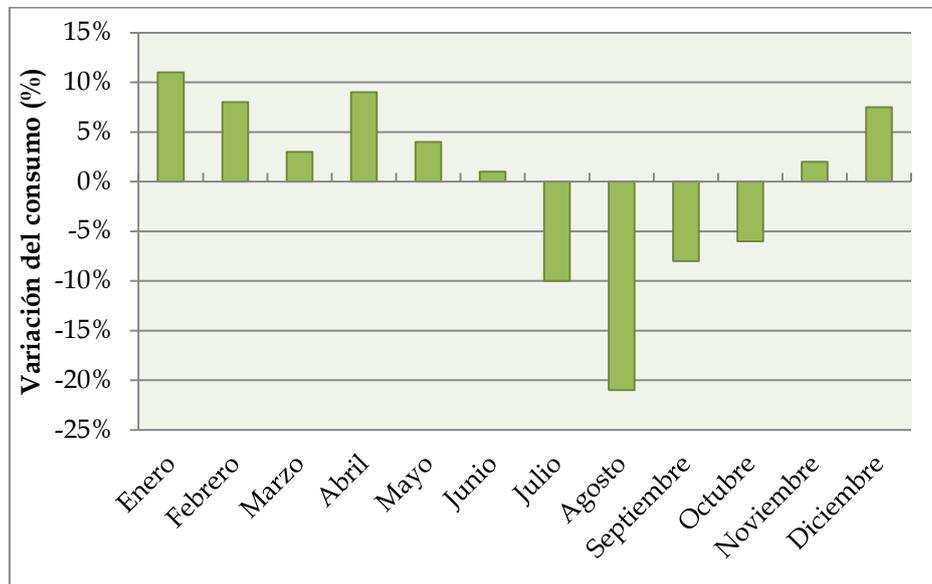


Figura 29.- Variación del consumo de ACS. Fuente: DTIE 1.01.

En la figura 29 se aprecia cómo el consumo de ACS es mucho menor para los meses de verano que para los meses de invierno, por lo que con el fin de acercarse más a la realidad, se ha utilizado un factor de corrección en el consumo mensual mostrado a continuación:

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Δ_{ACS}	1,12	1,08	1,03	1,09	1,04	1,01	0,90	0,79	0,92	0,94	1,02	1,08

Tabla 8.- Factor de corrección del consumo mensual de ACS.

El consumo medio mensual puede calcularse a partir del consumo total de agua y de la variación de ésta para cada mes. La ecuación para obtener dicho consumo es la siguiente:

$$\dot{m} [kg/s] = \frac{D_{ACS} [L/día] \cdot \Delta_{ACS} \cdot \rho_{agua} [kg/L]}{24 [h/día] \cdot 3600 [s/h]}$$

La demanda energética de ACS se obtiene a partir de la siguiente expresión, considerando la temperatura de suministro del ACS como 60°C, tal y como indica el CTE.

$$\dot{Q}_{ACS}[W] = \dot{m}[kg/s] \cdot Cp[J/kg \cdot K] \cdot (T_{ACS} - T_{red})[K]$$

La tabla mostrada a continuación recoge los valores de consumo medio y demanda energética para todos los meses del año, teniendo en cuenta el factor corrector de la tabla 8.

	Consumo medio (kg/s)	Demanda ACS (kW)
Enero	0,180	39,18
Febrero	0,174	37,78
Marzo	0,166	34,64
Abril	0,175	35,19
Mayo	0,167	32,18
Junio	0,163	29,21
Julio	0,145	24,22
Agosto	0,127	21,79
Septiembre	0,148	26,61
Octubre	0,151	29,72
Noviembre	0,164	34,31
Diciembre	0,174	37,78

Tabla 9.- Consumo medio y demanda energética de ACS mensuales.

5. CONTRIBUCIÓN SOLAR MÍNIMA

Como ya se comentó en la introducción, el CTE exige a los edificios de nueva construcción o rehabilitados una contribución solar mínima para la producción de ACS. Dicha contribución solar mínima anual es la fracción entre los valores anuales de la energía solar aportada exigida y la demanda energética anual, obtenidos a partir de los valores mensuales. Es función, por tanto, de la zona climática estudiada, que en este caso corresponde a la zona climática IV, y de la demanda total de ACS, que en este proyecto es de 13.904 L_{ACS}/día al no tener en cuenta la corrección para cada mes.

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

Tabla 10.- Contribución solar mínima. Fuente: DB-HE, CTE.

Para este proyecto la contribución solar mínima será, por tanto, del 70%.

$$\text{Aporte solar anual} \geq 70\%$$

Para cumplir la normativa, la instalación estará limitada por la condición de que ningún mes del año la energía producida por la instalación supere el 110% de la demanda energética y además no supere el 100% de la demanda en más de 3 meses consecutivos. En el caso de sobrepasar lo estipulado, el CTE propone distintas medidas:

- Disipar los excedentes en la instalación con ayuda de equipos específicos o con la circulación nocturna del circuito primario.
- Tapado parcial de captadores, lo que permite evacuar los excedentes residuales ya que el fluido del circuito primario continúa atravesando el captador aunque éste se encuentre tapado.



- c) Vaciado parcial de captadores, con lo que se debe reponer el fluido perdido del circuito primario por otro fluido de características similares.
- d) Desvío de los excedentes energéticos a otras aplicaciones existentes.

Para instalaciones de uso residencial el CTE aconseja disipar el excedente energético de los meses donde se produzca sobrecalentamiento. En este proyecto no se llega a dar un problema de sobrecalentamiento, por lo que no es necesario disipar dicha energía sobrante.

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

Descripción de la Instalación

1. INTRODUCCIÓN

Para la energía solar térmica, especialmente a baja temperatura, prácticamente la totalidad de los sistemas de captación están basados en colectores solares planos junto con un acumulador, bien integrado con los colectores o separado de ellos. Dicho acumulador consigue un funcionamiento más homogéneo que al emplearse una producción instantánea, además de reducir la potencia necesaria en producción.

En estas instalaciones se pueden distinguir varios sistemas:

- **Sistema de captación:** Cuya finalidad es la captación de la energía solar.
- **Sistema de acumulación:** Almacena el agua caliente en uno o varios depósitos hasta que se requiere su uso.
- **Sistema de intercambio de calor:** Realiza la transferencia de energía térmica desde el circuito primario al circuito secundario.
- **Sistema auxiliar:** Aporta energía al sistema en el caso de que el aporte de energía solar no sea el suficiente.
- **Sistema de distribución:** Consiste en transportar el agua caliente desde el colector al acumulador y de allí a los puntos de consumo.
- **Sistema de regulación y control:** Su finalidad es poner en funcionamiento los diferentes circuitos y garantizar el correcto funcionamiento de éstos.

Por otra parte, pueden aplicarse dos tipos de tecnologías a la producción de ACS:

- Circulación natural o termosifón: Utilizada en instalaciones de menos de 10m², reduciendo la pérdida de carga.
- Circulación forzada: Se emplea en instalaciones de mayor tamaño permitiendo colocar el acumulador alejado de los paneles solares. En el proyecto se trabaja con este tipo de circulación.

Las instalaciones donde se emplea una circulación forzada pretenden optimizar el ahorro energético, así como garantizar la calidad de la instalación y un uso prolongado sin una degradación significativa. [19]

La instalación de producción de ACS mediante energía solar consta de dos circuitos, un circuito primario donde se calienta un fluido gracias a los captadores solares, y uno secundario donde se trabaja para conseguir una temperatura óptima de consumo, con ayuda de un acumulador y un sistema auxiliar.

A continuación se analizan los distintos sistemas que forman parte de una instalación de ACS.

2. SISTEMA DE CAPTACIÓN

El sistema de captación está formado por los colectores solares, encargados de captar la energía proveniente de la radiación solar y transferirla a un fluido calentándolo. El tipo de colectores más extendido es el sistema de captación con colectores solares planos. Éstos aprovechan tanto la radiación directa como la difusa y no poseen mecanismos de seguimiento de la posición del Sol.

Los colectores solares funcionan siguiendo el principio del llamado “efecto invernadero”, es decir, captan la energía solar en su interior transformándola en energía térmica e impiden su salida al exterior. Esto se debe a que el vidrio del colector es transparente a la longitud de onda de la radiación visible, por lo que deja pasar la mayor parte de la energía del Sol. Dicha energía calienta la placa colectora y se convierte en emisora de radiación de infrarrojos, los cuales no pueden atravesar el vidrio ya que es opaco para esas longitudes de onda. En los colectores solares, por tanto, aumenta la temperatura del fluido de trabajo superando la temperatura exterior, a pesar de las pérdidas producidas por transmisión.

2.1. Componentes de un colector solar

Los componentes principales de un colector solar son los detallados a continuación:

❖ Cubierta

La cubierta del colector es prácticamente transparente a la radiación solar, permitiendo su paso hasta el convertidor pero protegiendo a éste del contacto con el exterior y, por tanto, de las pérdidas por convección. La principal función de la cubierta es impedir el paso de la radiación que emite el convertidor, de modo que quede atrapada entre la placa y la cubierta y no permita la transmisión de la radiación térmica desde la placa hacia el exterior del colector.

Las cubiertas pueden ser de plástico o de vidrio. El plástico presenta los inconvenientes de envejecer bajo la acción de los rayos ultravioleta y se puede rayar fácilmente; por otra parte, el vidrio es frágil y sensible a agentes meteorológicos como el granizo. Actualmente se emplean colectores cuya cubierta está formada por vidrio templado capaz de resistir impactos.

❖ Convertidor o absorbedor

El convertidor está compuesto por la placa absorbente y los conductos de fluido térmico. La radiación solar recibida en la cubierta se transmite alcanzando la placa absorbente, donde se transforma en calor. Este calor se transfiere al fluido caloportador que circula por los conductos.

La placa absorbente puede alcanzar temperaturas entre 40°C y 100°C al circular el fluido, lo que la convierte en un emisor de radiación infrarroja, es decir, en energía perdida debido al sistema de funcionamiento del captador solar. Se pretende que dicha emisión sea mínima y que, sin embargo, la absorción de radiación solar sea la máxima posible. Para ello se utilizan recubrimientos selectivos con un gran coeficiente de absorción para las longitudes de onda del espectro solar y un bajo poder de emisión para los infrarrojos que emite la placa absorbente. Estas superficies selectivas están formadas por una delgada capa de un óxido metálico de color negro sobre un metal brillante, ya que tiene un coeficiente de absorción en torno a 0,95 para la radiación solar y baja emisividad en el infrarrojo.

❖ Aislamiento térmico

La lámina de aislamiento térmico va situada entre el absorbedor y la carcasa y su función es reducir la emisión de calor desde la placa absorbente hacia el exterior. Las propiedades físicas del aislante determinan la capacidad de impedir posibles fugas de calor.

El tipo de colector empleado en el proyecto tiene un aislamiento térmico de 40mm de lana de roca, fabricado a partir de lana volcánica de estructura fibrosa.

❖ Carcasa

Es el elemento donde se alojan los componentes que constituyen el colector. La función más importante es asegurar la estanqueidad del colector, uniéndose perfectamente a la cubierta y al fondo del colector para evitar la entrada de aire del exterior, lo que al circular entre la cubierta y el absorbedor genera pérdidas por convección. Además, la estanqueidad impide la penetración de partículas de polvo o humedad, que deterioran el colector y disminuyen su rendimiento.

La carcasa debe soportar el paso del tiempo sufriendo el mínimo deterioro posible, por lo que los materiales empleados deben ser de buena calidad, resistentes a la corrosión propia de la atmósfera y a las tensiones térmicas originadas por los cambios de temperatura durante las distintas épocas del año. [13]

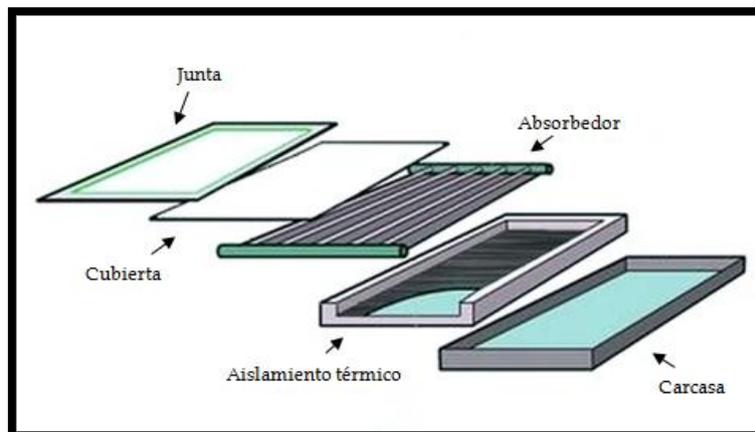


Figura 30.- Elementos de un colector solar plano.

2.2. Modelo de colector empleado

El colector solar escogido para atender la demanda de ACS de la edificación es el modelo AuroTHERM VFK 145, de Vaillant. Dentro de este modelo se distinguen dos configuraciones, 145V para instalaciones en posición vertical y 145H para instalaciones en posición horizontal. Se ha seleccionado concretamente el modelo 145V en este proyecto.

Según el fabricante consiste en un “captador solar plano de alto rendimiento diseñado para instalaciones en las que se necesite el máximo ahorro con el mínimo número de colectores”, gracias a la gran superficie de captación. [23]



Figura 31.- Captador solar plano marca Vaillant.

A continuación se muestra una tabla de características técnicas del captador solar utilizado.

Datos Técnicos	
Descripción	Plano con cubierta. Estructura de serpentín de 4 tomas
Posición	Vertical
Área bruta / Área de apertura	2,51 m ² / 2,35 m ²
Alto	2033 mm
Ancho	1233 mm
Fondo	80 mm
Peso en vacío	38 kg
Contenido del fluido	1,85 L
Rendimiento óptico η_0	0,79
Coefficiente lineal de pérdidas térmicas a_1	2,414 W/(m ² K)
Coefficiente cuadrático de pérdidas térmicas a_2	0,049 W/(m ² K ²)
Temperatura de estancamiento	170,6 °C
Presión máxima de operación	10 bar
Pérdida de carga	117 mbar
Caudal recomendado	45 L/(h m ²)
Cubierta	3,2 mm vidrio solar de seguridad ($\tau = 91\%$)
Material de la carcasa	Aluminio anodizado, marco oscuro
Material del serpentín	Cobre soldado a la lámina absorbadora
Material del absorbedor	Aluminio con recubrimiento altamente selectivo
Absortancia del absorbedor	$\alpha = 95\%$
Emitancia	$\varepsilon = 5\%$
Aislamiento posterior	40 mm lana de roca $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ / $\rho = 55 \text{ kg}/\text{m}^3$
Conexiones	4 x \varnothing ext 3/4 "

Tabla 11.- Datos técnicos del colector solar AuroTHERM VFK 145 V, Vaillant.

La pérdida de carga está medida en un captador para el caudal recomendado y usando el líquido solar Vaillant como fluido de trabajo (propilenglicol al 45%). En instalaciones solares con más de 10m² se puede hacer funcionar la instalación a bajo caudal, condiciones de low flow (25L/(h m²)) según el fabricante.

La curva de rendimiento del captador solar responde a la siguiente ecuación:

$$\eta = \eta_0 - F_R \cdot \frac{U \cdot (T_e - T_a)}{I}$$

Siendo U el coeficiente lineal de pérdidas térmicas y F_R la relación entre la energía cedida al fluido y la energía absorbida por la placa. La figura 32 representa la curva de rendimiento para el colector empleado, atendiendo a la ecuación anterior.

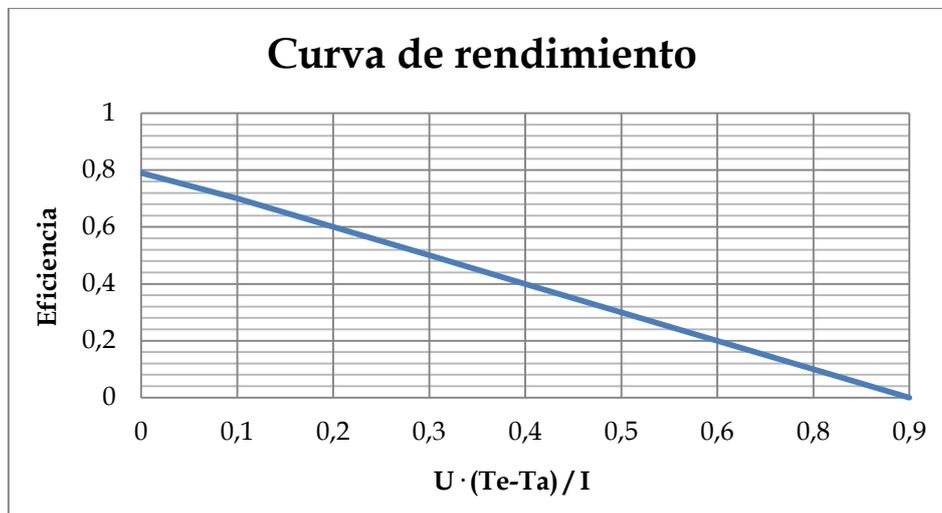


Figura 32.- Curva de rendimiento para el colector solar AuroTHERM VFK 145 V, Vaillant.

2.3. Fluido caloportador

El fluido que circula por el captador solar debe ser capaz de soportar las posibles temperaturas adversas del ambiente. Por este motivo el fluido de trabajo no suele ser agua, ya que podría congelarse en la época de invierno, sino que se trabaja con una disolución de agua con anticongelante, concretamente el captador solar empleado utiliza una disolución de propilenglicol al 45% en agua. Las propiedades de dicho fluido dependen la concentración, por lo que se calculan con ayuda de las siguientes gráficas.

En primer lugar hay que comprobar que el fluido caloportador supera la temperatura de congelación en el lugar donde se encuentra el edificio. Para ello se toma como referencia la temperatura mínima histórica registrada en la ciudad de estudio, en este caso Madrid.

Provincia	Altitud de la capital	Latitud de la capital	Longitud de la capital	Temperatura mínima histórica
Madrid	667m	40,4°	3,7° W	-16°C

Tabla 12.- Datos de la provincia de Madrid. Fuente: Censolar.

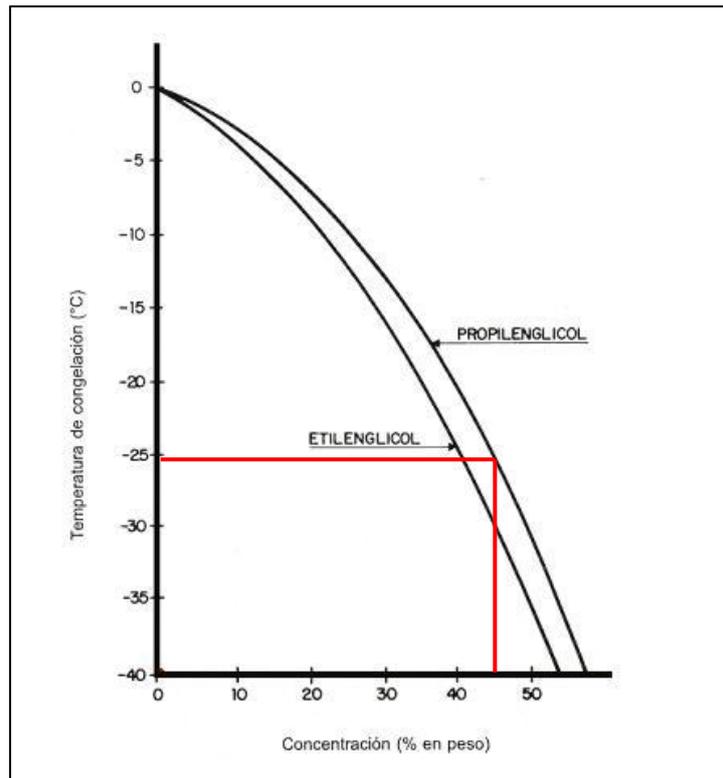


Figura 33.- Temperatura de congelación en función de la concentración en peso.

Según se aprecia en la gráfica, para la concentración utilizada de propilenglicol la temperatura de congelación está en los -25°C , prácticamente 10°C por debajo de la temperatura mínima para Madrid, por lo que se puede trabajar con esta disolución sin riesgo de congelación en el fluido.

A continuación se obtienen las propiedades físicas del propilenglicol para una concentración en peso del 45% ($\xi = 0,45$) trabajando a una temperatura de 40°C , tomada como referencia a pesar de no corresponder con la temperatura real de trabajo, ya que las propiedades de la disolución no se ven afectadas en gran medida por la temperatura.

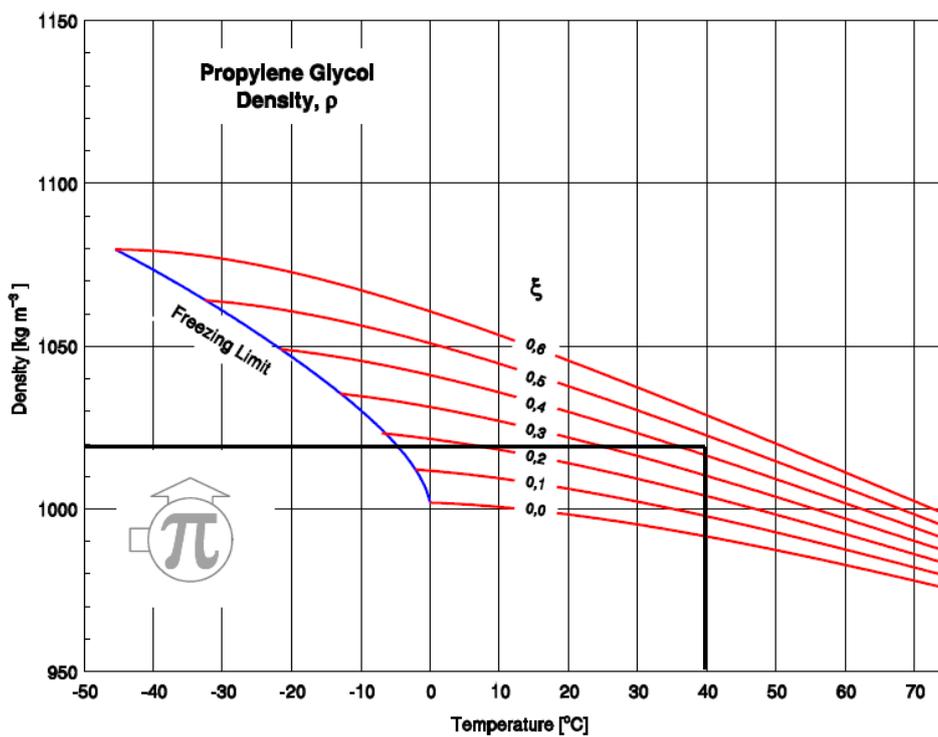


Figura 34.- Valores de densidad para distintas concentraciones de propilenglicol. [20]

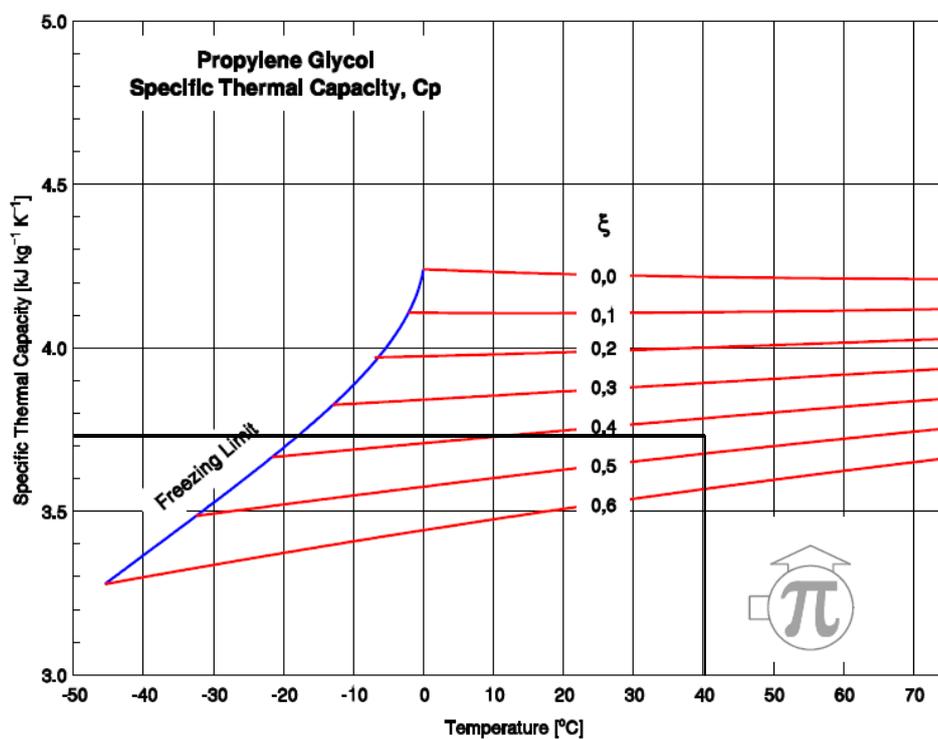


Figura 35.- Valores de calor específico para distintas concentraciones de propilenglicol. [20]

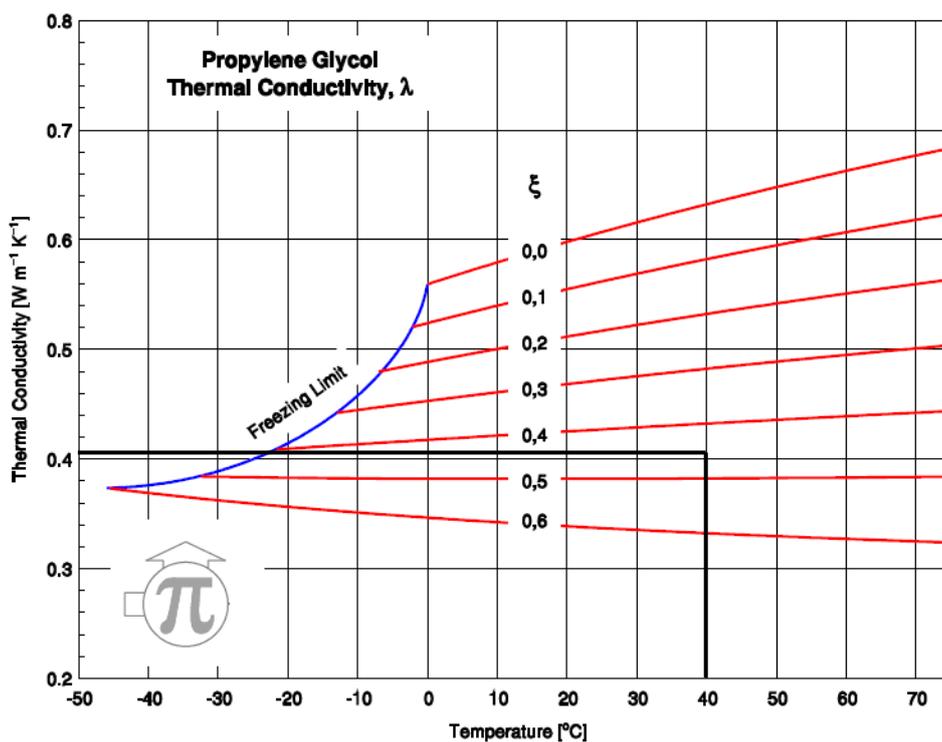


Figura 36.- Valores de conductividad térmica para distintas concentraciones de propilenglicol. [20]

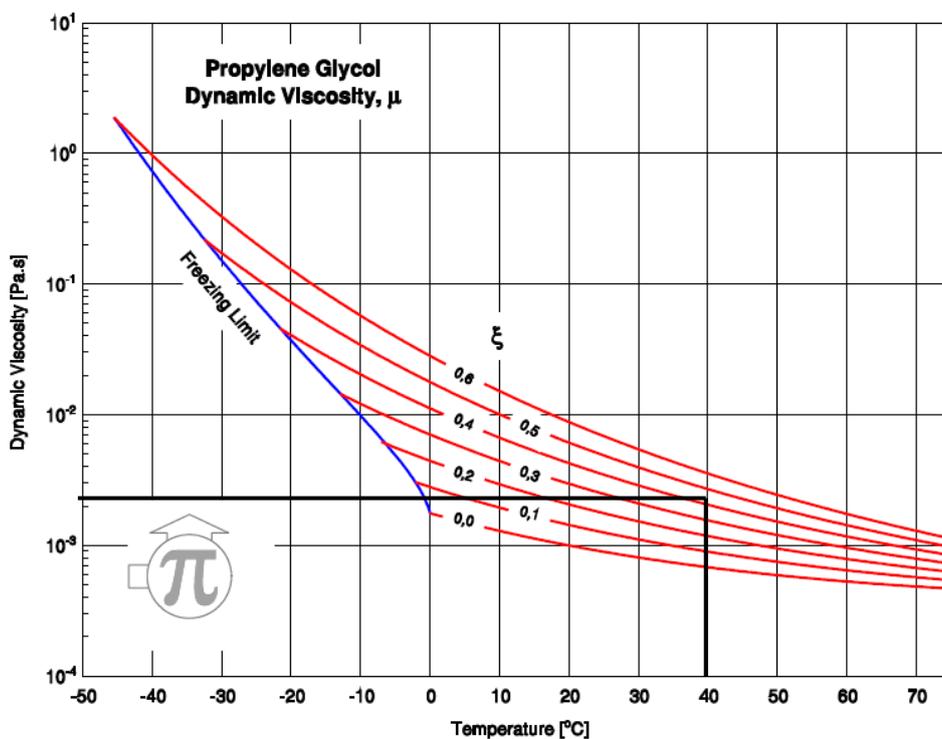


Figura 37.- Valores de viscosidad dinámica para distintas concentraciones de propilenglicol. [20]

En la siguiente tabla se recogen las distintas propiedades del propilenglicol al 45%.

Propiedades físicas	
Densidad (ρ)	1020 Kg/m ³
Calor específico (C_p)	3,73 KJ/(kg K)
Conductividad térmica (λ)	0,41 W/(m K)
Viscosidad dinámica (μ)	2,2 · 10 ⁻³ Pa s

Tabla 13.- Propiedades del propilenglicol al 45% para una temperatura de 40°C.

2.4. Disposición del sistema de captación

Para diseñar correctamente el sistema de captación hay que tener en cuenta la orientación e inclinación de los colectores, las posibles sombras y el conexionado de éstos.

➤ Orientación e inclinación

La estructura del tejado permite situar los colectores solares orientados hacia el sur, favoreciendo por tanto la captación. Además, como se ha estudiado previamente, la inclinación óptima de los colectores para maximizar la energía de captación en invierno en este caso es de 40°, por lo que ésta será la inclinación durante todo el año al no poder modificarla, como sería deseable.

➤ Sombras

Debido al elevado número de colectores solares que es necesario instalar en la vivienda dadas las características de ésta, se sitúan distintas filas de colectores en el tejado orientadas todas ellas al sur. Para evitar que se produzcan sombras entre las filas de colectores se calcula la distancia de separación mínima entre una fila y otra. Este cálculo se realiza el día más desfavorable del año, el 21 de diciembre, al mediodía.

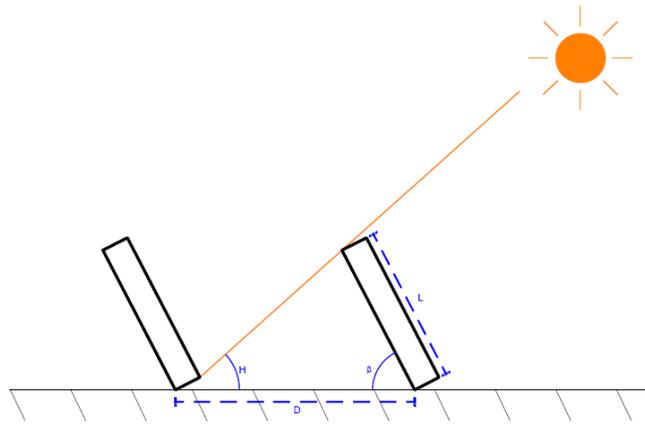


Figura 38.- Separación entre filas de colectores.

La distancia de separación D se obtiene con la siguiente expresión:

$$D = L \cdot \left(\text{sen}(\beta) \cdot \left(\frac{1}{\text{tg}(H)} + \frac{1}{\text{tg}(\beta)} \right) \right)$$

Donde:

L : Longitud del colector (2,033m).

β : Inclinación del colector (40°).

H : Altura solar máxima, calculada como:

$$H = 90^\circ - \text{Latitud} - 23,5^\circ = 26,31^\circ$$

La distancia mínima resultante es: $D = 4,2m$

Si no hay problemas de espacio en el tejado se recomienda aumentar la separación entre colectores. En este caso se toma un margen del 20%, por lo que la distancia entre las filas de colectores será de 5m.

➤ Conexionado

Los colectores se disponen en filas formadas por el mismo número de elementos si es posible. Se deben instalar unas válvulas de cierre en la entrada y salida de cada fila de colectores y entre las bombas para realizar correctamente el mantenimiento o sustitución de algún elemento. Para proteger la instalación, además se instala una válvula de seguridad por fila.

Estas baterías de colectores pueden conectarse entre sí en serie, en paralelo o en serie-paralelo; las limitaciones en cada caso vienen expuestas en el CTE o proporcionadas por el fabricante. La conexión en serie de los colectores para ACS es función de la zona climática, pudiendo conectarse hasta 10m² en las zonas climáticas I y II, hasta 8m² en la zona climática III y hasta 6m² en las zonas climáticas IV y V. Debido a dicha limitación, en el proyecto las conexiones en serie no pueden superar los dos colectores, por lo que el conexionado debe ser en serie-paralelo, constituida cada batería por un número de elementos función del número de colectores total necesario.

3. SISTEMA DE ACUMULACIÓN

Los sistemas que funcionan con acumulación en depósitos consiguen reducir la potencia necesaria en producción y se obtiene un funcionamiento más homogéneo del sistema, ya que en el depósito se mantiene el agua caliente hasta el momento de uso, utilizando dicho agua almacenada en las puntas de demanda. Gracias a ello se necesita una potencia inferior que en el caso de utilizar una producción instantánea.

Los depósitos de acumulación de ACS se clasifican en interacumuladores o acumuladores, en función de si contienen o no un intercambiador. En el caso de que la función sea únicamente almacenar agua, el sistema requiere un intercambiador exterior y una bomba para circular el agua a calentar entre ambos dispositivos.

El volumen de acumulación puede variar en cada instalación, dependiendo del diseño que se lleve a cabo. Puede diseñarse el sistema para cubrir toda la demanda punta mediante el agua almacenada en el depósito de acumulación, o puede diseñarse el depósito para atender únicamente a una parte de esa demanda, requiriendo el apoyo de la producción para cubrir toda la demanda. El segundo caso es lo conocido como sistema de semiacumulación.

Normalmente se emplean depósitos verticales facilitando la estratificación del mismo. Gracias a este fenómeno se sitúa el líquido a mayor temperatura en la zona superior del depósito y a menor temperatura en la zona inferior, debido a la diferencia de densidad existente ambos. La estratificación consigue enviar agua al consumo lo

más caliente posible y devolver agua a los colectores lo más fría posible para aumentar su rendimiento. Para facilitar la distribución de temperaturas en el depósito, además de colocar las tuberías de entrada con agua de red en la parte inferior y las tuberías que van al consumo en la parte superior, se dispone de elementos deflectores en la zona de entrada para reducir la velocidad de entrada de agua y así disminuir la zona de mezcla dentro del tanque.

3.1. Modelo de depósito de acumulación empleado

La capacidad de almacenamiento depende de la demanda de ACS requerida en la vivienda. Según el CTE el volumen de acumulación se relaciona directamente con el área de captación solar de modo que cumpla lo siguiente:

$$50 < \frac{V}{A} < 180$$

Siendo:

A: La suma de las áreas de los captadores (m²).

V: El volumen del depósito de acumulación solar (L).

Para cumplir dicha restricción se han necesitado varios depósitos de las mismas características debido a las dimensiones de la instalación. El depósito empleado es el modelo MV4000I de la marca Lapesa, con una capacidad de almacenamiento de 4000L. Se trata de un acumulador de inercia fabricado en acero al carbono y cuyas características se muestran en el anexo al final del proyecto. [24]

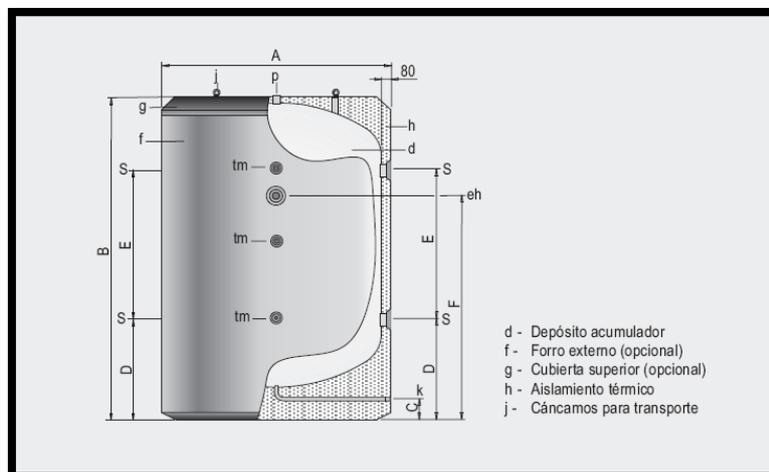


Figura 39.- Acumulador MV4000I, Lapesa.

3.2. Disposición del sistema de acumulación

En el proyecto de estudio es necesario utilizar varios depósitos para cubrir las necesidades de acumulación. La conexión hidráulica de estos tanques puede hacerse en paralelo o en serie. La conexión en paralelo es más sencilla y provoca menores pérdidas de carga, sin embargo se da la misma zona de mezcla en todos los depósitos, aprovechando menos el volumen acumulado. La conexión en serie reduce la zona de mezcla, aprovechando la estratificación de los depósitos, y se reduce el riesgo de desarrollo de legionelosis, por lo que es más aconsejable este conexionado de los depósitos. Las conexiones hidráulicas en este caso son más complejas ya que hay que prever conexiones que permitan inhabilitar algún depósito en caso de avería sin afectar a todo el circuito.

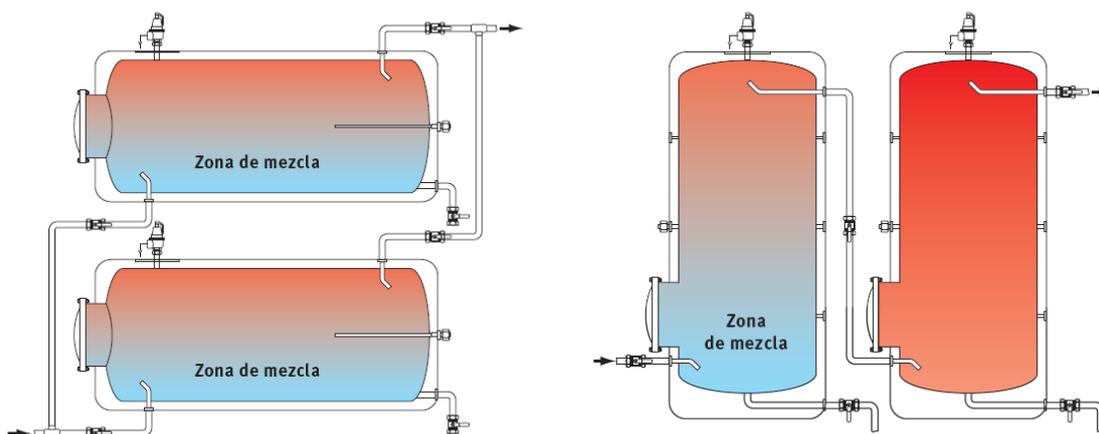


Figura 40.- Conexión en paralelo (izq.) y en serie (drcha.) de los depósitos de acumulación.

4. SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR

Se utiliza un intercambiador de calor, normalmente de placas, por el que se transfiere energía térmica desde el sistema de captación solar al sistema de acumulación. Por una parte del intercambiador circula el fluido de los colectores mientras que por la otra circula el fluido de almacenamiento con ayuda de una bomba, por lo que es muy importante que ambos fluidos no se mezclen.

Los intercambiadores de calor de placas están formados por numerosas placas corrugadas, empaquetadas y desmontables o bien soldadas, apretadas entre sí dentro de un bastidor, donde el flujo de trabajo se hace circular a través de unos canales

interconectados. Estas placas tienen un espesor que varía entre 0,5mm y 1,2mm dependiendo del material y del fabricante, y presentan un relieve corrugado para favorecer la transferencia de calor. Una de las principales ventajas de estos intercambiadores es la posibilidad de escoger el número de placas del intercambiador, con lo que se satisfacen las necesidades de transferencia de calor.

El principio de funcionamiento de este tipo de intercambiadores de calor se muestra en la siguiente figura:

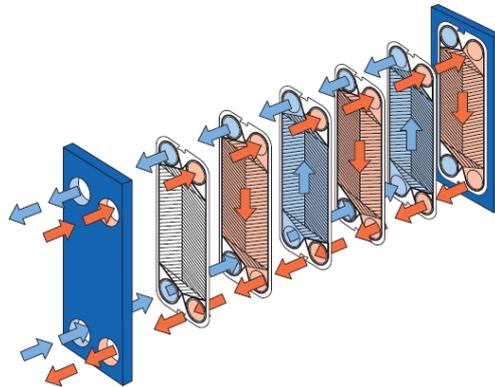


Figura 41.- Principio de funcionamiento en un intercambiador de calor de placas.

4.1. Modelo de intercambiador de calor empleado

El intercambiador seleccionado es un intercambiador de placas soldadas de altas cualidades, concretamente el CB60, de la marca Alfa Laval, cuyas características se muestran en el anexo. [25]



Figura 42.- Intercambiador CB60, marca Alfa Laval.

Para un correcto funcionamiento se escoge el número de placas necesarias para el sistema. Las dimensiones del intercambiador para determinar el área útil son las siguientes:

Datos Técnicos	
Altura	466 mm
Ancho del canal	1,85 mm
Volumen del canal	0,10 L
Espesor de la placa	0,5 mm

Tabla 14.- Características intercambiador CB60.

La anchura útil se calcula como:

$$Ancho = \frac{V_{canal}}{a_{canal} \cdot Altura} = 116 \text{ mm}$$

El área de transferencia de calor por placa es:

$$A_{placa} = Ancho \cdot Altura = 0,054 \text{ m}^2$$

Para obtener el área útil total es necesario multiplicar el área de cada placa por el número de placas (N_p).

En los extremos del intercambiador no se da transferencia de calor, por lo que estas placas no se tienen en cuenta para el cálculo. De este modo, el número total de placas será ($N_p + 2$) y el de canales ($N_p + 1$). Se supone que el número de canales es par, teniendo ($N_p + 1$)/2 canales para cada fluido. La sección de paso para cada fluido se calcula entonces como:

$$S_{1\ canal} = a_{canal} \cdot Ancho = 2,146 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$S_{canal} = S_{1\ canal} \cdot \frac{N_p + 1}{2} = 1,073 \cdot 10^{-4} \cdot (N_p + 1) \text{ m}^2$$

La longitud característica se calcula con la siguiente expresión:

$$l_c = \frac{4 \cdot S_{canal}}{P_{canal}} = \frac{4 \cdot a_{canal} \cdot Ancho}{2 \cdot (a_{canal} + Ancho)} \cong 2 \cdot a_{canal} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Para determinar el número de placas son necesarias dos ecuaciones, por lo que se calcula el número de unidades de transmisión NTU y el coeficiente global de transmisión de calor, como se explica a continuación.

- Método del NTU

En primer lugar se calcula cual de los dos fluidos presenta el $(\dot{m} \cdot C_p)_{min}$. Se considera que el caudal que circula por el intercambiador es el mismo para ambos fluidos, por lo que:

$$\dot{m} = \dot{m}_c = \dot{m}_f = \dot{m}_{colector} = 1,5 \text{ kg/s}$$

Como el fluido con menor capacidad calorífica es el caliente, el valor de NTU se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$NTU = \frac{\ln \left[\frac{1 - C_r \cdot \varepsilon}{1 - \varepsilon} \right]}{1 - C_r} = 1,39$$

Donde:

$$C_r = \frac{(\dot{m} \cdot C_p)_{min}}{(\dot{m} \cdot C_p)_{max}} = \frac{(\dot{m} \cdot C_p)_c}{(\dot{m} \cdot C_p)_f} = 0,89$$

$$\varepsilon = 0,6$$

- Método de la diferencia de temperaturas efectivas

En este apartado se calcula el coeficiente global de transmisión de calor (U) para después poder despejar el número de placas con la siguiente ecuación:

$$NTU = \frac{U \cdot A_{placa} \cdot N_p}{(\dot{m} \cdot C_p)_{min}}$$

El valor de U se obtiene como:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e_{placa}}{k_{placa}} + \frac{1}{h_f}}$$

Donde:

e_{placa} : Espesor de las placas.

k_{placa} : Conductividad de las placas (15 W/m ·K).

h_c y h_f son los coeficientes de convección del fluido caliente y frío respectivamente, calculados a continuación.

La correlación empleada para calcular los coeficientes de convección es la siguiente:

$$Nu = 0,4 \cdot Re^{0,64} \cdot Pr^{0,4}$$

- **Fluido caliente (propilenglicol-agua) :**

En primer lugar se calcula la velocidad del fluido:

$$v_c = \frac{\dot{m}}{\rho_c \cdot S_{canal}} = \frac{13,69}{(N_p + 1)}$$

El número de Reynolds y el Prandtl se calculan como:

$$Re_c = \frac{v_c \cdot l_c \cdot \rho_c}{\mu_c} = \frac{23484,57}{(N_p + 1)}$$

$$Pr_c = \frac{\mu_c \cdot C_{p,c}}{k_c} = 20,015$$

$$Nu_c = 0,4 \cdot Re^{0,64} \cdot Pr^{0,4} = \frac{831,58}{(N_p + 1)^{0,64}}$$

A partir del Nusselt se puede calcular el coeficiente de convección con la ecuación:

$$h_c = \frac{Nu_c \cdot k_c}{l_c} = \frac{92148}{(N_p + 1)^{0,64}}$$

- **Fluido frío (agua) :**

$$v_f = \frac{\dot{m}}{\rho_f \cdot S_{canal}} = \frac{13,96}{(N_p + 1)}$$

El número de Reynolds y el Prandtl se calculan como:

$$Re_f = \frac{v_f \cdot l_c \cdot \rho_f}{\mu_f} = \frac{147577}{(N_p + 1)}$$

$$Pr_f = \frac{\mu_f \cdot C_{p,f}}{k_f} = 2,52$$

$$Nu_f = 0,4 \cdot Re^{0,64} \cdot Pr^{0,4} = \frac{1177}{(N_p + 1)^{0,64}}$$

El coeficiente de convección para el fluido frío es:

$$h_f = \frac{Nu_f \cdot k_f}{l_c} = \frac{184502,7}{(N_p + 1)^{0,64}}$$

El coeficiente de transmisión de calor es por tanto:

$$U = \frac{1}{(N_p + 1)^{0,64} \cdot \left(\frac{1}{92148} + \frac{1}{184502,7} \right) + 3,33 \cdot 10^{-5}}$$

Igualando las ecuaciones, la expresión resultante es:

$$NTU = \frac{U \cdot A_{placa} \cdot N_p}{(\dot{m} \cdot C_p) \min} = \frac{10^5}{1,627 \cdot (N_p + 1)^{0,64} + 3,33} \cdot 0,054 \cdot N_p = 1,39$$

$$2,34 \cdot (N_p + 1)^{0,64} + 4,79 = N_p$$

Mediante una iteración se obtiene el número de placas: $N_p = 22$

El intercambiador constará de 24 placas, contando las de los extremos.

Por último se calcula el calor intercambiado en dicho intercambiador, con los valores de las temperaturas de entrada y salida del colector en el momento de mayor irradiación.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_{p_c} \cdot (T_{s_{colector}} - T_{e_{colector}}) = 1,5 \cdot 3730 \cdot (129,83 - 102,47)$$

$$\dot{Q} = 152880 \text{ W}$$

Dicho calor intercambiado debe cumplir la restricción del CTE:

$$P \geq 500 \cdot A = 117500 \text{ W}$$

Siendo:

P: Potencia mínima del intercambiador (W).

A: Área total de captadores (m²).

5. SISTEMA AUXILIAR

El sistema de energía auxiliar es imprescindible en este tipo de instalaciones, ya que garantiza poder cubrir la demanda en el caso de que la radiación solar no sea suficiente, se den condiciones climatológicas adversas u ocurra una posible avería del sistema.

La fuente de apoyo auxiliar consiste en una caldera convencional que permita mantener la temperatura de consumo a 60°C, como establece el CTE, cuando no sea posible conseguirla con el sistema solar. La caldera se diseña para cubrir la demanda de ACS en la situación más desfavorable, es decir, en el caso de que tenga que cubrir toda la demanda como si no existiera aporte solar, sin embargo sólo funcionará cuando sea necesario de modo que se aproveche al máximo la energía del sistema de captación.

5.1. Dimensionado de la caldera

Para dimensionar la caldera correctamente hay que tener en cuenta el caudal de todos los aparatos del edificio, así como la demanda de ACS calculada anteriormente.

En primer lugar se calcula el caudal total de los aparatos del edificio con ayuda de la siguiente tabla recogida en el CTE, en el documento HS4: Salubridad, suministro de agua.

Tipo de aparato	Caudal instantáneo mínimo de agua fría [dm ³ /s]	Caudal instantáneo mínimo de ACS [dm ³ /s]
Lavamanos	0,05	0,03
Lavabo	0,10	0,065
Ducha	0,20	0,10
Bañera de 1,40 m o más	0,30	0,20
Bañera de menos de 1,40 m	0,20	0,15
Bidé	0,10	0,065
Inodoro con cisterna	0,10	-
Inodoro con fluxor	1,25	-
Urinarios con grifo temporizado	0,15	-
Urinarios con cisterna (c/u)	0,04	-
Fregadero doméstico	0,20	0,10
Fregadero no doméstico	0,30	0,20
Lavavajillas doméstico	0,15	0,10
Lavavajillas industrial (20 servicios)	0,25	0,20
Lavadero	0,20	0,10
Lavadora doméstica	0,20	0,15
Lavadora industrial (8 kg)	0,60	0,40
Grifo aislado	0,15	0,10
Grifo garaje	0,20	-
Vertedero	0,20	-

Tabla 15.- Caudal instantáneo mínimo para cada tipo de aparato. Fuente: DB-HS, CTE.

Teniendo en cuenta que en el proyecto se dispone de 72 viviendas de 2 dormitorios dotadas de un baño completo, y de 104 viviendas de 3 dormitorios dotadas de 2 baños completos, el caudal total (Q_T) en el edificio será:

Cocina	
Fregadero	0,1 L/s
Lavadora	0,15 L/s
Lavavajillas	0,1 L/s
Baño	
Bañera	0,2 L/s
Lavabo	0,065 L/s
Bidé	0,065 L/s
Inodoro con cisterna	-

Tabla 16.- Caudales instantáneos en el edificio de estudio.

$$Q_T = 154 \text{ L/s}$$

El caudal máximo de los aparatos unitarios corresponde con la bañera, $Q_U = 0,2 \text{ L/s}$.

El caudal simultáneo (Q_C) se calcula a partir de la siguiente tabla:

Tipo de edificio	Caudales (l/s)		Coeficientes		
	Q_U	Q_T	A	B	C
Viviendas	< 0,5	≤ 20	0,682	0,450	-0,140
	≥ 0,5	≤ 1	1,000	1,000	0,000
	≥ 0,5	≤ 20	1,700	0,210	-0,700
	Sin Límite	> 20	1,700	0,210	-0,700

Tabla 17.- Cálculo de los coeficientes de simultaneidad. Fuente: UNE 149.201/07.

$$Q_C = A \cdot (Q_T)^B + C = 1,7 \cdot (154)^{0,21} - 0,7 = 4,196 \text{ L/s}$$

El consumo en hora punta sostenido se obtiene como la relación entre la demanda total de ACS del edificio y el caudal simultáneo:

$$\text{Consumo}_{hp} = \frac{D_{ACS}}{Q_C} = \frac{13.904 \text{ L}_{ACS}/\text{día}}{4,196 \text{ L/s}} = 3.313,6 \text{ s/día}$$

La energía demandada de ACS suponiendo la temperatura de consumo a 60°C y tomando como referencia la temperatura de red mínima para un año en Madrid, 8°C, se calcula con la siguiente expresión:

$$E_{ACS} = D_{ACS} \cdot \rho_{agua} \cdot C_{p_{agua}} \cdot (T_{ACS} - T_{red}) = 3.022 \text{ MJ/día}$$

A continuación se determina la potencia de diseño de la caldera para una producción instantánea:

$$P = Q_C \cdot \rho_{agua} \cdot Cp_{agua} \cdot (T_{ACS} - T_{red}) = 912 \text{ kW}$$

$$P_{vivienda} = 5182 \text{ W}$$

En esta instalación no se trabaja con una producción instantánea, sino que se dispone de una acumulación del 50%. Por ello es necesario calcular la energía de hora punta y la energía acumulada, mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_{hp} = Q_{punta} \cdot \rho_{agua} \cdot Cp_{agua} \cdot (T_{ACS} - T_{red}) = 1511 \text{ MJ}$$

$$E_{acum} = V_{acum} \cdot \rho_{agua} \cdot Cp_{agua} \cdot (T_{acum} - T_{red}) \cdot F_{uso,acum} = 558 \text{ MJ}$$

$$E_{hp} = E_{prod} + E_{acum}$$

Siendo:

Q_{punta} : El caudal de hora punta, supuesto como el 50% de la demanda (6.952 L/día).

V_{acum} : Volumen de acumulación. $V_{Acum} = 0,5 \cdot Q_{punta} = 3.476 \text{ L}$

T_{acum} : Temperatura de acumulación (60°C).

$F_{uso,acum}$: Factor de uso de acumulación, calculado a partir de las dimensiones del acumulador utilizado, en este caso un depósito de 3500L cuyo diámetro y altura son $D = 1,5 \text{ m}$ y $H = 2,58 \text{ m}$, respectivamente.

$$F_{uso,acum} = 0,63 + 0,14 \cdot \frac{H}{D} = 0,8708$$

La potencia de la caldera considerando este porcentaje de acumulación, se calcula con la siguiente expresión, considerando un rendimiento de la producción del 75%:

$$P_{caldera} = \frac{[Q_{punta} \cdot (T_{ACS} - T_{red}) - V_{acum} \cdot (T_{acum} - T_{red}) \cdot F_{uso,acum}] \cdot \rho_{agua} \cdot Cp_{agua}}{3600 \cdot \eta_{prod ACS}}$$

$$P_{caldera} = 315,98 \text{ kW}$$

$$P_{caldera \text{ vivienda}} = 1,8 \text{ kW}$$

Por último hay que calcular el tiempo de recuperación para el calentamiento del depósito, el cual no debe superar 3 horas.

$$t_r = \frac{V_{acum} \cdot \rho_{agua} \cdot C_{p_{agua}} \cdot (T_{acum} - T_{red})}{P_{caldera} \cdot \eta_{prod ACS} \cdot 60} = 53,13 \text{ minutos}$$

5.2. Modelo de caldera empleado

Una vez dimensionada la caldera se ha seleccionado el modelo de caldera Logano SK 645 con una potencia de 360 kW, de la marca Buderus, capaz de abastecer a todo el edificio de ACS. La hoja de características de esta caldera está recogida en el anexo al final del proyecto. [26]

6. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Este sistema agrupa todos los elementos encargados de la distribución y acondicionamiento para el consumo. Transporta la energía térmica captada desde el circuito primario hasta el punto de consumo, siguiendo las restricciones técnicas, como el caudal de fluido o la pérdida de carga.

La distribución debe diseñarse para los caudales máximos, de forma que se garantice el caudal y presión mínima fijado en el CTE en los puntos de consumo.

6.1. Componentes del sistema de distribución

Los principales componentes de este sistema son descritos a continuación.

❖ Tuberías

Se debe seleccionar el sistema de tuberías y sus materiales de modo que no se formen obturaciones o depósitos de cal para las condiciones de trabajo. Además, la longitud de las tuberías del sistema debe ser lo más corta posible y evitando al máximo los codos y pérdidas de carga, con el fin de evitar las posibles pérdidas térmicas. Los materiales permitidos en las tuberías de agua para el consumo son cobre, acero inoxidable o termoplásticos.

Es de especial importancia aislar correctamente las tuberías para minimizar las pérdidas de calor a lo largo del recorrido de éstas. Las características que debe cumplir el aislante utilizado, como el espesor mínimo, vienen contempladas en el RITE en función del diámetro de tubería empleado.

❖ Válvulas

Son las encargadas de regular el paso de los fluidos por las tuberías. En la instalación pueden distinguirse distintos tipos de válvulas:

- Válvulas de corte: Utilizadas para interrumpir la circulación del fluido, para operaciones de mantenimiento o reparación, por ejemplo.
- Válvulas de equilibrado de circuitos: Para regular el caudal en los distintos sistemas.
- Válvulas antirretorno: Cuya función es impedir la circulación del fluido en sentido contrario al deseado.
- Válvulas de seguridad: Limitan la presión máxima del circuito. Se sitúan en los diferentes circuitos para garantizar la presión de trabajo.
- Válvulas termostáticas: Se emplean para regular la temperatura de salida hacia el consumo, protegiendo los materiales y a los usuarios.

❖ Bombas

La función de las bombas de circulación es impulsar el fluido a lo largo de todos los circuitos, contrarrestando la pérdida de carga producida por la fricción del fluido con los distintos elementos del circuito.

Se emplean bombas en el circuito primario, en el circuito secundario y bombas de recirculación para asegurar la circulación del fluido por todo el edificio. Para garantizar la producción de ACS se colocan dos bombas en paralelo, dejando una como reserva en cada circuito.

❖ Vasos de expansión

Los vasos de expansión son depósitos situados en sistemas cerrados capaces de absorber el aumento de volumen que puede sufrir el fluido al calentarse. Se instalan en

la aspiración de la bomba y se dimensionan de forma que puedan compensar todo el volumen más un margen del 10%.

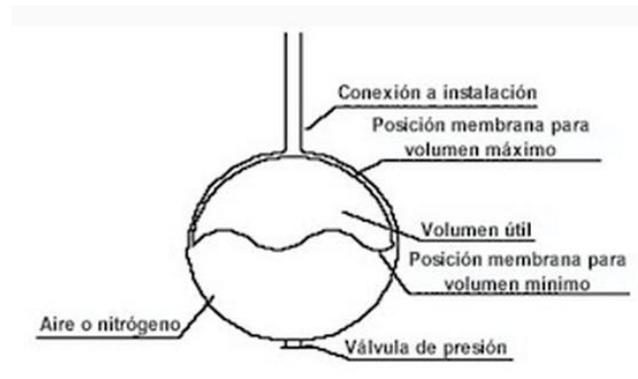


Figura 43.- Esquema de un vaso de expansión.

7. SISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL

Este sistema es el encargado de asegurar el correcto funcionamiento de las instalaciones, obteniendo un buen aprovechamiento de la energía solar y controlando un uso adecuado de la energía convencional. Se lleva a cabo un control de funcionamiento de los circuitos y de los sistemas de protección y seguridad contra sobrecalentamientos, heladas, etc.

El control de funcionamiento normal se hace de forma diferencial. Se mide la temperatura con ayuda de sondas y se actúa sobre las válvulas en función del resultado de la medición.

En el caso del intercambiador de calor situado entre el sistema de captación y los tanques de acumulación, el sistema de control mide la temperatura de salida del grupo de colectores y la temperatura de salida inferior del primer depósito, y actúa impidiendo el paso de los fluidos por el intercambiador cuando esta diferencia de temperaturas sea inferior a 2°C y permitiéndolo cuando la diferencia sea mayor de 7°C. De esta forma se impide la entrada de fluido frío a los depósitos de acumulación, manteniendo una temperatura alta en el interior.

En el circuito auxiliar de energía se coloca un sistema de control de forma que el agua procedente de los tanques de acumulación se mezcle con agua de red si la temperatura es superior a 60°C, o bien se caliente con ayuda del sistema auxiliar en

caso de que sea inferior a 60°C, con el fin de hacer llegar el agua al consumo a la temperatura deseada.

De forma general, el sistema de control asegura que en ningún punto del circuito se alcancen temperaturas superiores a las máximas permitidas por los materiales, componentes y tratamientos de los circuitos, al igual que no descienda la temperatura por debajo de la temperatura de congelación del fluido.

8. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN

Una vez se han explicado los diferentes sistemas de la instalación y se ha definido el conexionado de todos los circuitos, así como la necesidad de diferentes elementos como bombas o válvulas a lo largo de la instalación, se puede definir un esquema de producción de ACS representativo. [21]

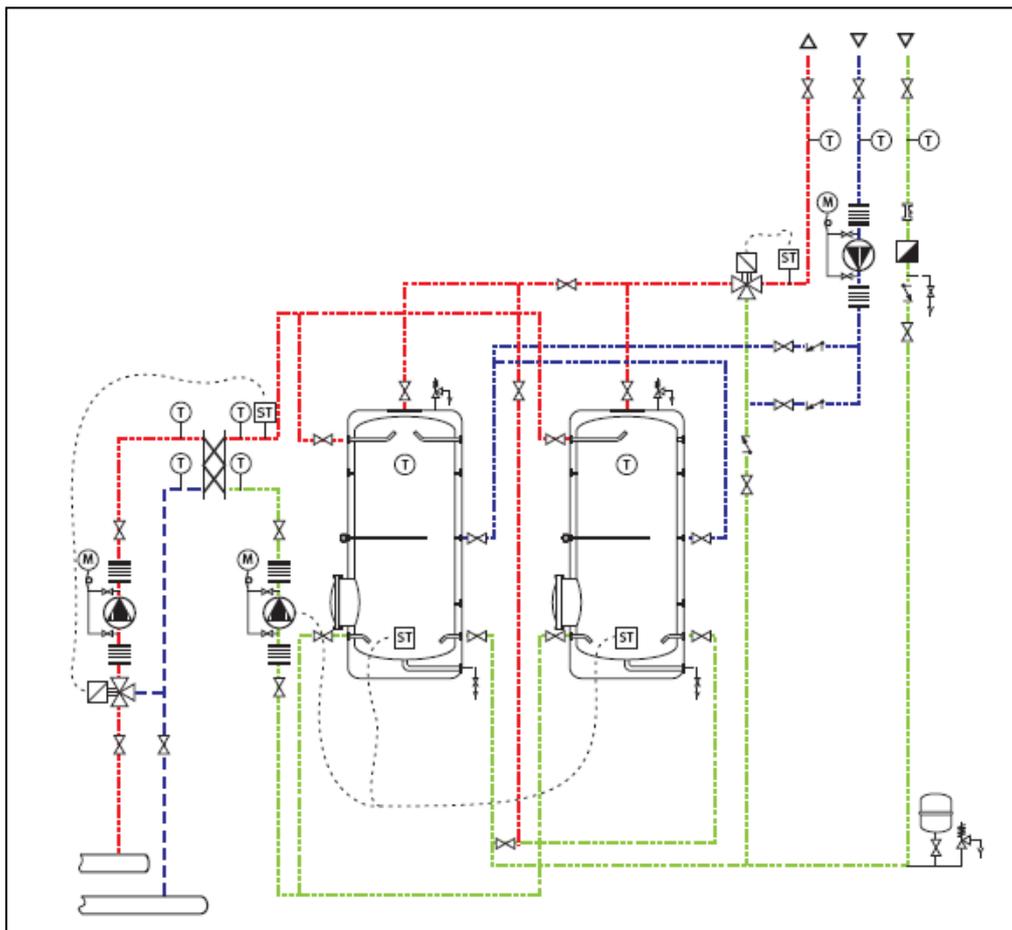


Figura 44.- Producción de ACS con acumuladores conectados en serie e intercambiador exterior.



En la figura 44 se muestra el conexionado del sistema con dos depósitos de acumulación conectados en serie, como se ha realizado en este proyecto. La línea roja del esquema representa la tubería que va hacia el consumo, la línea azul representa la recirculación del circuito y la línea verde corresponde con el agua de red del circuito. En el esquema puede apreciarse el sistema de control de la temperatura de los colectores y los depósitos para hacer funcionar el intercambiador externo.

MÉTODO f -CHART

Método *f*-chart

El método *f*-chart consiste en un proceso de cálculo mediante el cual se obtiene la aportación de calor total necesario para cubrir las cargas térmicas y su rendimiento medio en un largo período de tiempo.

Este método sigue la reglamentación vigente en España y emplea los datos mensuales medios meteorológicos para determinar el factor de cobertura solar en instalaciones de calentamiento con el uso de captadores solares, para todo tipo de edificios. [15]

La secuencia de cálculo a seguir es la siguiente:

- 1) Evaluación de las cargas caloríficas para el calentamiento de agua destinada a la producción de ACS o calefacción.
- 2) Evaluación de la radiación solar incidente en la superficie inclinada de los captadores.
- 3) Cálculo del parámetro D_1 .
- 4) Cálculo del parámetro D_2 .
- 5) Determinación de f .
- 6) Valoración de la cobertura solar mensual.
- 7) Valoración de la cobertura solar anual.

Los pasos para obtener la cobertura solar en el proyecto de estudio se detallan a continuación:

1) Evaluación de la carga calorífica

Para obtener la carga calorífica para la producción de ACS es necesario conocer el consumo total de agua en el edificio de viviendas, a partir del número de personas estimadas para vivir en él y de la demanda de ACS por persona al día, como se ha

calculado en el apartado de la descripción del emplazamiento. La demanda de ACS resultante es en este caso:

$$D_{ACS} = 13.904 L_{ACS}/día$$

Por otra parte, también es necesario conocer la temperatura del agua de red mensual, mostrada en la tabla 4 de la descripción del emplazamiento, y la temperatura de ACS, para la que se ha tomado la temperatura de referencia 60°C.

La carga calorífica se calcula con la siguiente expresión:

$$Q_c = D_{ACS} \cdot \rho_{agua} \cdot C_{p_{agua}} \cdot (T_{ACS} - T_{red}) \cdot N_{día}$$

Siendo $N_{día}$ el número de días que tiene cada mes.

En la tabla 18 se recogen los datos necesarios para el cálculo y el resultado de la carga calorífica mensual.

	Días	Temperatura del agua de red (°C)	Q _c (MJ)
Enero	31	8	93.687
Febrero	28	8	84.621
Marzo	31	10	90.084
Abril	30	12	83.691
Mayo	31	14	82.877
Junio	30	17	74.973
Julio	31	20	72.067
Agosto	31	19	73.869
Septiembre	30	17	74.973
Octubre	31	13	84.679
Noviembre	30	10	87.178
Diciembre	31	8	93.687

Tabla 18.- Cálculo de la carga calorífica Q_c.

El cálculo de la fracción solar anual depende del modelo de colector solar que se vaya a emplear, ya que las características varían en cada colector. En este caso se ha utilizado el modelo de colector solar AuroTHERM VFK 145V, de la marca Vaillant, cuya hoja de diseño se añade en el anexo, además de comentarse en el capítulo

destinado a la descripción de la instalación. Para el método *f*-chart las características que determinan la cobertura solar son las siguientes:

- Área de apertura: $A_{col} = 2,35 \text{ m}^2$
- Coeficiente lineal de pérdidas térmicas: $U = 2,414 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Rendimiento óptico: $F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n = 0,79$

El procedimiento de cálculo consiste en suponer un número de colectores a partir de los cuales se obtiene tanto la fracción solar mensual como la fracción solar anual, e iterar variando dicho número de colectores hasta superar el aporte solar anual necesario para la vivienda, que en este caso es del 70%, calculado anteriormente.

A partir del número de colectores utilizados se puede calcular la superficie de captación total, así como el volumen de almacenamiento necesario para cubrir la demanda, cumpliendo la condición impuesta en el CTE:

$$50 < \frac{V}{A} < 180$$

Donde *A* es la superficie total de los colectores (m²) y *V* es el volumen del depósito de acumulación solar (L).

Por otra parte, con el rendimiento óptico y conociendo la absorptancia ($\alpha = 0,95$) y la transmitancia ($\tau = 0,91$) del colector se puede calcular la capacidad de transferencia de calor que se produce de la placa al fluido.

$$F_R = \frac{F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n}{\alpha \cdot \tau} = 0,914$$

2) Evaluación de la radiación solar incidente

Se toman valores de temperatura ambiente mensual y de energía solar diaria media para la ciudad del emplazamiento, ambos comentados en las tablas 4 y 6 respectivamente.

	Temperatura ambiente (°C)	Energía solar diaria media (MJ/m ²)
Enero	6	9,3
Febrero	8	13,7
Marzo	11	15,8
Abril	13	19,6
Mayo	18	19,9
Junio	23	21,6
Julio	28	24,7
Agosto	26	24,3
Septiembre	21	20,4
Octubre	15	15,8
Noviembre	11	11,3
Diciembre	7	8,7

Tabla 19.- Datos de temperatura ambiente y energía solar media para Madrid.

3) Cálculo del parámetro D_1

El parámetro D_1 se expresa como la relación entre la energía absorbida por la instalación y la energía total necesaria (Q_c).

$$D_1 = \frac{E_a}{Q_c}$$

La energía absorbida se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E_a = S \cdot F_R' \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot E_{\text{día}} \cdot N_{\text{día}}$$

Donde:

$E_{\text{día}}$: Energía solar media diaria.

S : Superficie de captación total.

El valor $F_R' \cdot (\tau \cdot \alpha)$ se calcula como:

$$F_R' \cdot (\tau \cdot \alpha) = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n \cdot \frac{(\tau \cdot \alpha)}{(\tau \cdot \alpha)_n} \cdot \frac{F_R'}{F_R}$$

Siendo:

$F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n$: Eficiencia óptima del captador.

$\frac{(\tau \cdot \alpha)}{(\tau \cdot \alpha)_n}$: Modificador del ángulo de incidencia. Se toma un valor de 0,96

$\frac{F_R'}{F_R}$: Corrección del conjunto captador-intercambiador. Se toma un valor de 0,95.

4) Cálculo del parámetro D_2

El parámetro D_2 se conoce como la energía perdida (E_p) entre la energía total necesaria (Q_c).

$$D_2 = \frac{E_p}{Q_c}$$

La energía perdida se obtiene con la siguiente expresión:

$$E_p = S \cdot F_R' \cdot U \cdot (T_{ref} - T_a) \cdot \Delta t \cdot K_1 \cdot K_2$$

Donde:

T_{ref} : Temperatura de referencia, normalmente se toma 100°C.

T_a : Temperatura ambiente.

Δt : Intervalo de tiempo estudiado (horas).

$$F_R' \cdot U = F_R \cdot U \cdot \frac{F_R'}{F_R}$$

K_1 es el factor de corrección por almacenamiento y se calcula con la ecuación:

$$K_1 = \left[\frac{\text{masa de fluido acumulada}}{75 \cdot S} \right]^{-0,25} = \left[\frac{V_{alm} \cdot \rho_{agua}}{75 \cdot S} \right]^{-0,25}$$

El factor corrector K_2 relaciona la temperatura de ACS, tomada como 60°C, con la temperatura de red y la temperatura ambiente según la siguiente ecuación:

$$K_2 = \frac{1,16 + 1,18 \cdot T_{ACS} + 3,86 \cdot T_{red} - 2,32 \cdot T_a}{T_{ref} - T_a}$$

5) Determinación de *f*

El valor *f* se obtiene a partir de los parámetros D_1 y D_2 calculados anteriormente con la expresión:

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

6) Cobertura solar mensual

Una vez se tiene el parámetro *f* se puede calcular el calor útil captado como:

$$Q_u = f \cdot Q_c$$

Se conoce el aporte solar mensual como la relación entre este calor útil y la carga calorífica:

$$AS_{mes} = \frac{Q_u}{Q_c} = f$$

7) Cobertura solar anual

Por último, el aporte solar anual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$AS_{anual} = \frac{\sum_{m=1}^{12} Q_{u,m}}{\sum_{m=1}^{12} Q_{c,m}}$$

Como ya se ha mencionado anteriormente, el aporte solar anual en este proyecto es del 70%, para lo que ha sido necesario iterar con el número de colectores hasta llegar a un óptimo. El número de colectores con el cual se consigue la cobertura solar deseada ha sido de 100 colectores solares. Para este valor, la cobertura solar anual es:

$$AS_{anual} = 72,84 \%$$

A continuación se muestra una tabla donde se recogen los parámetros D_1 y D_2 para cada mes, así como el valor de *f*, es decir, el aporte solar mensual.

	D ₁	D ₂	Aporte solar mensual (%)
Enero	0,521	1,219	39,6%
Febrero	0,768	1,162	58,2%
Marzo	0,921	1,219	68,0%
Abril	1,190	1,310	83,1%
Mayo	1,260	1,313	86,8%
Junio	1,463	1,405	96,1%
Julio	1,799	1,510	108,9%
Agosto	1,727	1,485	106,4%
Septiembre	1,382	1,474	91,9%
Octubre	0,979	1,328	71,0%
Noviembre	0,658	1,219	50,1%
Diciembre	0,487	1,191	37,1%

Tabla 20.- Cálculo del aporte solar mensual según el método *f*-chart.

En la siguiente gráfica se representa el porcentaje de aporte solar para los distintos meses del año y el aporte anual.

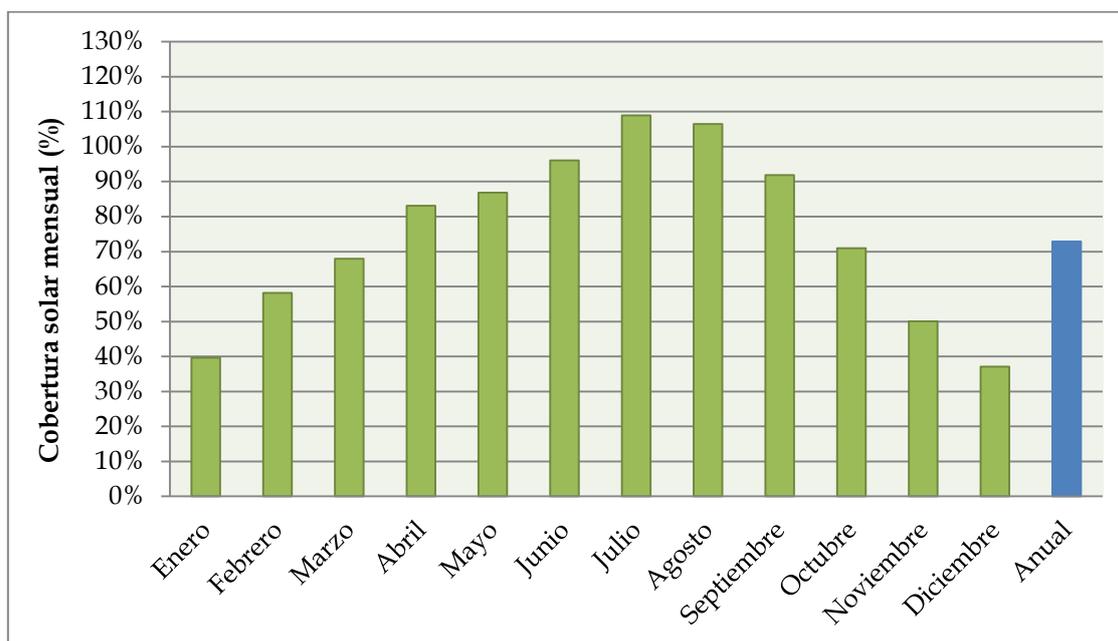


Figura 45.- Cobertura solar mensual y anual según el método *f*-chart.

En la gráfica se aprecia cómo en los meses de Julio y Agosto el aporte solar supera el 100% de la demanda, sin embargo cumplen la norma impuesta en el CTE de no sobrepasar ningún mes el 110% ni de superar el 100% durante tres meses consecutivos, por lo que no es necesario disipar la energía en los meses centrales del año.

SIMULACIÓN

Simulación

1. DATOS PREVIOS

En este capítulo se pretende realizar una simulación lo más real posible de una instalación solar para la producción de ACS, con el fin de obtener resultados que se puedan comparar con el método f -chart propuesto en el capítulo anterior. La siguiente figura representa un esquema del diseño de la instalación:

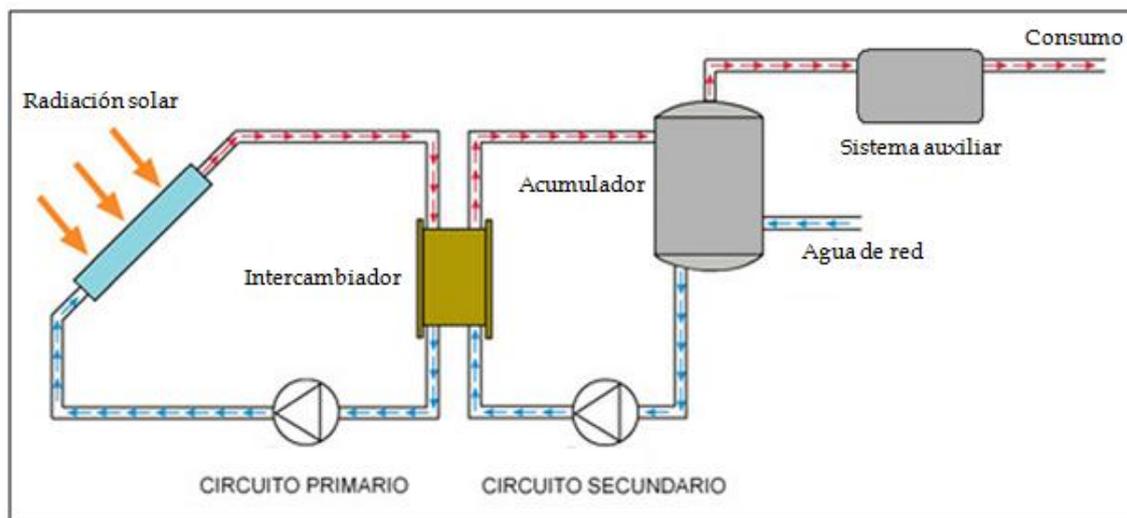


Figura 46.- Esquema de una instalación de ACS.

En la figura pueden diferenciarse dos circuitos, uno primario donde se calienta un fluido mediante el sistema de captación y uno secundario donde con ayuda del intercambiador, se calienta agua sanitaria y se almacena en un depósito acumulador hasta que se requiera para su uso. Además, como ya se ha comentado anteriormente, en estos sistemas es imprescindible el uso de un sistema auxiliar encargado de asegurar la temperatura deseada de consumo.

Los datos de partida utilizados son la temperatura ambiente y la radiación global sobre una superficie horizontal en un intervalo de tiempo de una hora, proporcionados por el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. A partir de éstos, se ha determinado la radiación inclinada para un ángulo de inclinación óptimo, calculado en el apartado de energía solar. Con dichos resultados y con la temperatura

de red obtenida en estadísticas es posible realizar una simulación que determine la temperatura del tanque durante todo un año, con un intervalo de una hora.

Para realizar la simulación, en primer lugar es necesario especificar el caudal de fluido que circula por cada uno de los circuitos, ya que se tendrá en cuenta para los cálculos posteriores. Por el intercambiador circula el fluido procedente de los colectores (propilenglicol-agua) y el fluido del depósito de acumulación (agua) ambos con el mismo caudal (\dot{m}_{col}) y sin mezclarse estos fluidos. El caudal que fluye hacia el consumo se ha denominado \dot{m}_{cons} . Ambos caudales se obtienen con las siguientes ecuaciones:

- Caudal de los colectores

$$\dot{m}_{col} = \frac{\rho_{prop} \cdot V \cdot A_{col} \cdot N_{col}}{3600 \cdot 2} = 1,498 \text{ kg/s}$$

Siendo:

ρ_{prop} : Densidad de la mezcla propilenglicol-agua (1,02 kg/L).

V: Caudal recomendado de fluido por el colector (45L/hm²).

A_{col} : Área del colector (2,35 m²).

N_{col} : Número de colectores empleados, determinado según el método *f-chart* (100 colectores).

El caudal que circula por los colectores se divide entre 2 debido al conexionado de éstos, serie-paralelo, situando un máximo de 2 colectores en serie seguidos.

- Caudal de consumo

$$\dot{m}_{cons} = \frac{D_{ACS} \cdot \rho_a}{24 \cdot 3600} = 0,161 \text{ kg/s}$$

Considerando toda la demanda de ACS, 13.904 L_{ACS}/día, y un consumo similar para todas las épocas del año.

Por otra parte, para cumplir con los requisitos de acumulación ($V = 31.160 \text{ L}$) se han empleado 8 depósitos de 4000L cuyas dimensiones son $D = 1750\text{mm}$ y $H = 2310\text{mm}$. Dichos depósitos se han colocado en serie para mejorar la estratificación, por lo que el área a tener en cuenta para la simulación es la siguiente:

$$S_{tanque} = \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} + \pi \cdot D \cdot H \right) \cdot 8 = 140,08 \text{ m}^2$$

La transmisión de calor del depósito se obtiene a partir de los datos del fabricante:

$$U_{tanque} = \frac{k}{e} = \frac{0,025 \text{ W/mK}}{0,08 \text{ m}} = 0,3125 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Por último, la masa del tanque en movimiento se obtiene como resultado de la siguiente ecuación:

$$m_{tanque} = V_{almacenamiento} \cdot \rho_a = 32000 \text{ kg}$$

2. SIMULACIÓN

2.1. Sistema de captación

Para calcular la temperatura que se alcanza en el tanque a lo largo del año, en primer lugar es necesario determinar la temperatura a la salida del sistema de captación. Para ello hay que tener en cuenta la disposición de los colectores y el rendimiento de éstos. Además se considera una radiación mínima a partir de la cual se pone en funcionamiento el sistema de captación. Este valor mínimo se calcula con la siguiente expresión, en función de la hora de estudio:

$$I_{min} = \frac{U_{col} \cdot F_R \cdot (T_e - T_a)}{\eta_0} = \frac{2,414 \cdot 0,914 \cdot (T_e - T_a)}{0,79}$$

Siendo T_e la temperatura de entrada al colector y T_a la temperatura ambiente en esa hora. Si la radiación en cada hora no supera el valor mínimo, el rendimiento del colector en ese momento será cero, en cambio si el valor es superior, se puede calcular el rendimiento de cada colector como:

$$\eta = \eta_0 - F_R \cdot \frac{U \cdot (T_e - T_a)}{I} = 0,79 - 0,914 \cdot \frac{2,414 \cdot (T_e - T_a)}{I}$$

El calor útil del colector se calcula con la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_u = \eta \cdot I \cdot \frac{S_{col}}{2}$$

Siendo S_{col} el área total de los colectores, 235m². A partir del valor del calor útil se puede obtener la temperatura de salida del colector despejando de la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{col} \cdot C_{p_{prop}} \cdot (T_s - T_e)$$

Debido a la disposición del sistema de captación, se tienen 2 colectores conectados en serie, por lo que el rendimiento de ambos no será el mismo, de modo que es necesario calcular los dos rendimientos cada hora.

2.2. Sistema de acumulación

Se realiza un balance de energía en el tanque de acumulación con el propósito de calcular la temperatura en dicho tanque. Para ello es necesario en primer lugar suponer una temperatura de entrada al sistema de colectores y calcular con ella la temperatura de salida de dicho sistema. Una vez calculada la temperatura del tanque es necesario iterar para obtener la temperatura de entrada supuesta anteriormente.

El balance de energía en el depósito de acumulación es el siguiente:

$$m_{tanque} \cdot C_{p_a} \cdot \frac{dT_{tanque}}{dt} = m_{tanque} \cdot C_{p_a} \cdot \frac{T_{tanque}^{t+1} + T_{tanque}^t}{dt} = \dot{Q}_e - \dot{Q}_s - \dot{Q}_{pérd}$$

Donde:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{col} \cdot C_{p_a} \cdot (T_s^{t+1} - T_{tanque}^{t+1})$$

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_{cons} \cdot C_{p_a} \cdot (T_{tanque}^{t+1} - T_{red})$$

$$\dot{Q}_{pérd} = U_{tanque} \cdot S_{tanque} \cdot (T_s^{t+1} - T_{tanque}^{t+1})$$

Igualando las expresiones y despejando la temperatura del tanque en $t+1$ el sistema queda de la siguiente forma:

$$\left[\frac{m_{tanque} \cdot C_{p_a}}{dt} + \dot{m}_{col} \cdot C_{p_a} + \dot{m}_{cons} \cdot C_{p_a} + U_{tanque} \cdot S_{tanque} \right] \cdot T_{tanque}^{t+1} =$$

$$= \frac{m_{tanque} \cdot C_{p_a}}{dt} \cdot T_{tanque}^t + \dot{m}_{cons} \cdot C_{p_a} \cdot T_s^{t+1} + \dot{m}_{cons} \cdot C_{p_a} \cdot T_{red} + U_{tanque} \cdot S_{tanque} \cdot T_{amb}$$

Manteniendo constante T_{amb} con un valor de 20°C . En el programa se ha definido con la letra A el primer término de la ecuación y con la letra B el segundo término, de modo que el sistema queda:

$$A \cdot T_{tanque}^{t+1} = B \rightarrow T_{tanque}^{t+1} = B/A$$

2.3. Sistema de intercambio de calor

A partir de la eficiencia del intercambiador es posible calcular la temperatura de entrada al colector y la temperatura de entrada al tanque, con ayuda de los datos conocidos de temperatura de salida del colector y temperatura del tanque, como se muestra en la siguiente figura.

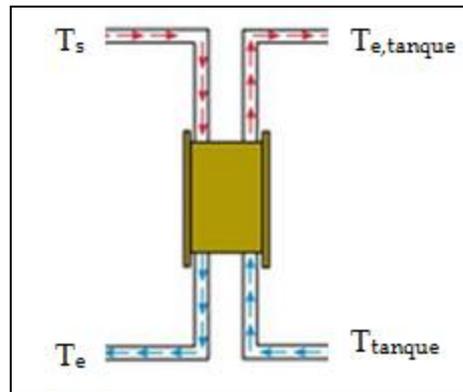


Figura 47.- Intercambiador de calor.

$$\varepsilon = \frac{T_s - T_e}{T_s - T_{tanque}} \rightarrow T_e = T_s - \varepsilon \cdot (T_s - T_{tanque})$$

$$m_{col} \cdot Cp_p \cdot (T_s - T_e) = m_{col} \cdot Cp_a \cdot (T_{e,tanque} - T_{tanque})$$

$$T_{e,tanque} = \frac{m_{col} \cdot Cp_p}{m_{col} \cdot Cp_a} \cdot (T_s - T_e) + T_{tanque}$$

Una vez se han calculado estas temperaturas es necesario iterar para obtener el valor correcto de la temperatura de entrada a los colectores, así como el de la temperatura del tanque, calculada de forma similar a lo explicado anteriormente pero sustituyendo el valor de temperatura de salida por la temperatura de entrada al tanque.

2.4. Sistema de control

Con el fin de cumplir lo estipulado en el CTE, en la programación se ha diseñado un control de temperatura que mide la temperatura de salida del sistema de captación y la temperatura del tanque en la hora anterior para determinar si permite o no el acceso de agua caliente procedente del intercambiador. El control de temperatura determina lo siguiente:

- $(T_s^{t+1} - T_{tanque}^t) < 2^\circ C$

El funcionamiento de entrada al depósito no se pone en marcha, por lo que la temperatura del tanque en el momento de cálculo se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$T_{tanque}^{t+1} = \frac{m_{cons} \cdot T_{red} + \left(\frac{m_{tanque}}{dt} - m_{cons} \right) \cdot T_{tanque}^t}{\left(m_{tanque} / dt \right)}$$

Donde se calcula la temperatura del tanque teniendo en cuenta el caudal que se ha empleado para el consumo y el caudal que permanece almacenado en el depósito.

- $(T_s^{t+1} - T_{tanque}^t) > 7^\circ C$

El sistema de control permite la entrada al depósito de acumulación de agua calentada en el intercambiador previo, por lo que el cálculo de la temperatura en el tanque se realiza siguiendo el paso descrito en el punto 2.2 de este capítulo.

Por último, para asemejarse más a la realidad del funcionamiento de una instalación solar, se ha calculado un gradiente térmico nocturno en función de la temperatura ambiente, de modo que cuando no hay irradiación la temperatura de entrada y salida de los colectores disminuye progresivamente según la temperatura ambiente que se dé en esa época del año.

3. RESULTADOS

La simulación se ha realizado con intervalos de una hora, por lo que se obtienen resultados de cada temperatura para cada hora durante todos los días de un año. En las siguientes gráficas se muestra la variación de las temperaturas, así como el aporte solar que puede ofrecer el sistema.

3.1. Temperaturas obtenidas en la simulación

En primer lugar se representa la variación de la temperatura de entrada a los colectores, la temperatura de salida de éstos y la temperatura del tanque para un día de invierno y para un día de verano.

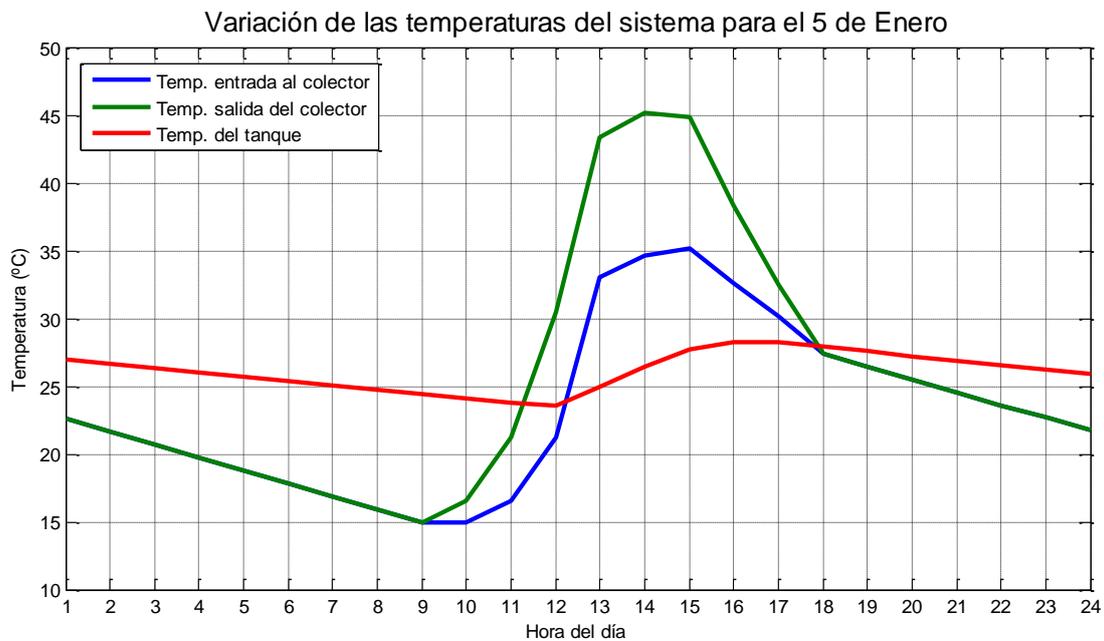


Figura 48.- Variación de las distintas temperaturas del sistema en invierno.

En la figura 48 se aprecia cómo al tratarse de un día de invierno las temperaturas del sistema son bajas, de modo que no pueden cubrir la demanda de ACS. Las primeras y últimas horas del día, cuando no hay irradiación, el sistema de captación solar se encuentra inutilizado, por lo que la temperatura de entrada a los colectores es la misma que la temperatura de salida. Además al ser ambas temperaturas inferiores a la del tanque, la válvula de acceso al tanque se encuentra cerrada para no enfriar dicha temperatura. En la gráfica puede verse una disminución

de todas las temperaturas durante las horas nocturnas, las temperaturas del sistema de captación disminuyen debido a un gradiente térmico relacionado con la temperatura ambiente y la temperatura del tanque disminuye por el consumo.

Por otra parte, las horas centrales del día el sistema de captación se pone en funcionamiento, lo que hace que la temperatura de salida de los colectores se incremente respecto a la temperatura de entrada. Dicho aumento provoca la apertura de la válvula de acceso al tanque permitiendo la entrada de agua caliente, aumentando por tanto la temperatura del tanque.

Por último se puede comentar el funcionamiento de control de temperatura que permite abrir o cerrar una válvula de acceso al tanque permitiendo o no la entrada de agua caliente. Las horas en las cuales se da una irradiación sobre los colectores, la temperatura del fluido que pasa por éstos aumenta llegando a superar una diferencia de 7°C entre la temperatura de salida del sistema de captación y la temperatura del tanque, por lo que el control de temperatura permite el paso al depósito de acumulación del agua calentada en el intercambiador previo. Sin embargo, cuando no hay irradiación, las temperaturas del sistema de captación comienzan a disminuir, llegando incluso a ser inferiores a la temperatura del tanque. En este caso, cuando la diferencia de temperatura entre la salida de los colectores y el tanque sea menor de 2°C se cierra la válvula de acceso impidiendo la entrada de agua al tanque ya que lo enfriaría. Por este motivo puede verse en la figura 48 que la temperatura del tanque a lo largo del día no sufre tanta variación de temperatura como las de los colectores.

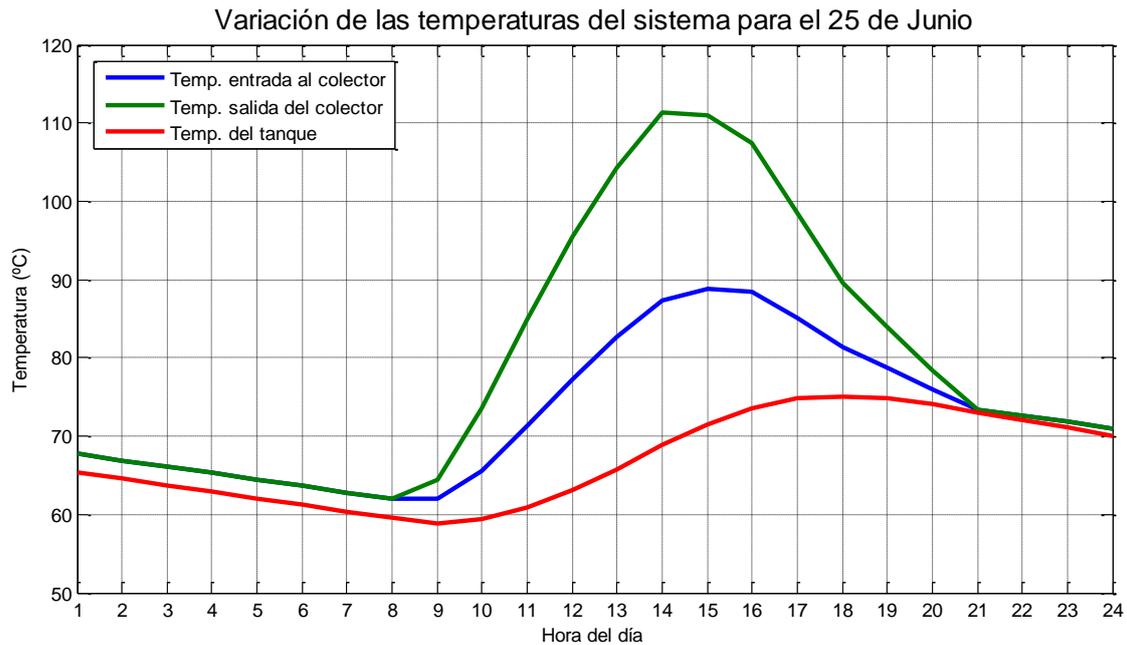


Figura 49.- Variación de las distintas temperaturas del sistema en verano.

En la figura 49 se muestra la variación de las temperaturas de los colectores y de la temperatura del depósito de acumulación durante un día de verano. En esta gráfica se aprecia la misma tendencia que para invierno, pero las temperaturas de trabajo son superiores en este caso. Además se da una irradiación mayor durante las horas centrales del día, calentando más la temperatura de salida de los colectores y por tanto la del tanque. Al comienzo y final del día, todas las temperaturas disminuyen como se ha explicado en la figura anterior, sólo que en este caso el sistema de captación mantiene una mayor temperatura que la del tanque, a pesar de cerrar la válvula de acceso al ser esta diferencia de temperaturas muy pequeña.

A continuación se representa la variación a lo largo de un año de la temperatura de salida de los colectores y la temperatura del tanque, en las figuras 50 y 51 respectivamente, explicando ambas gráficas conjuntamente.

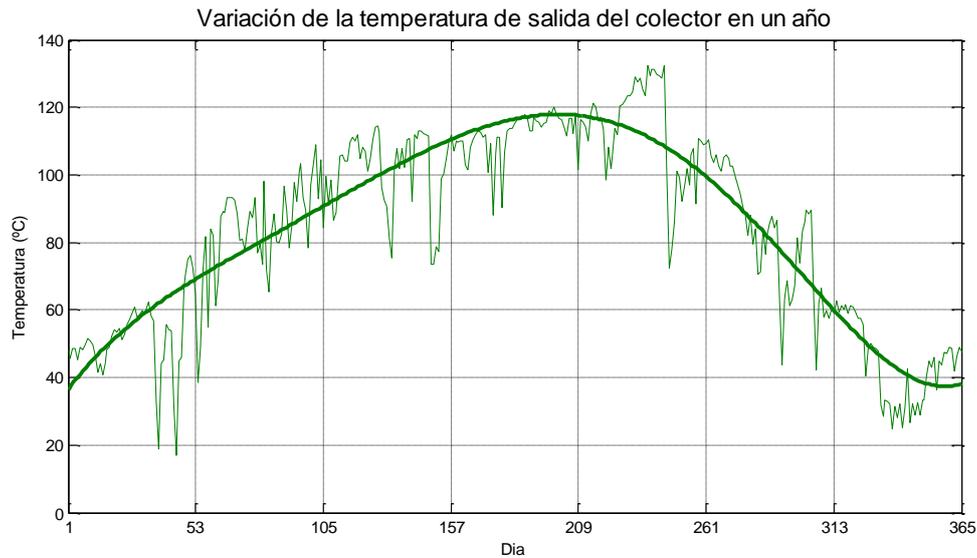


Figura 50.- Variación de la temperatura de salida del colector a lo largo de un año.

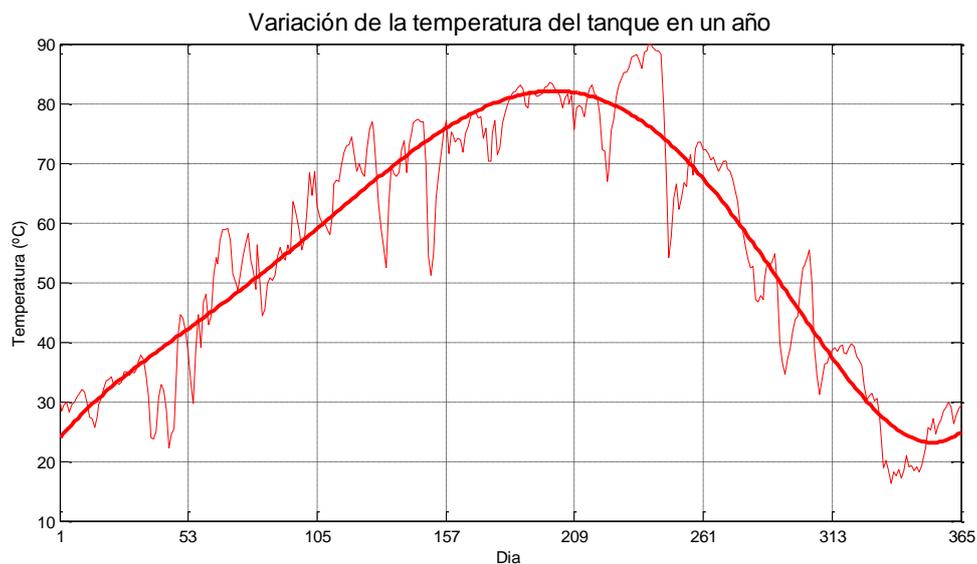


Figura 51.- Variación de la temperatura del tanque a lo largo de un año.

En las figuras 50 y 51 se observa que la tendencia tanto de la temperatura de salida del sistema de captación como la temperatura del tanque es la misma a lo largo del año. Sin embargo, puede apreciarse que la temperatura de salida de los colectores tiene un rango mayor de temperaturas, alcanzando los días más calurosos los 120°C mientras que la temperatura del depósito no llega a 90°C. Debido a que el consumo durante el año se mantiene en 60°C, gracias a estas gráficas puede hacerse una aproximación del aporte solar que se dará en el año, ya que únicamente se supera la temperatura de consumo los días centrales del año, necesitando por tanto un aporte auxiliar durante los otros meses.

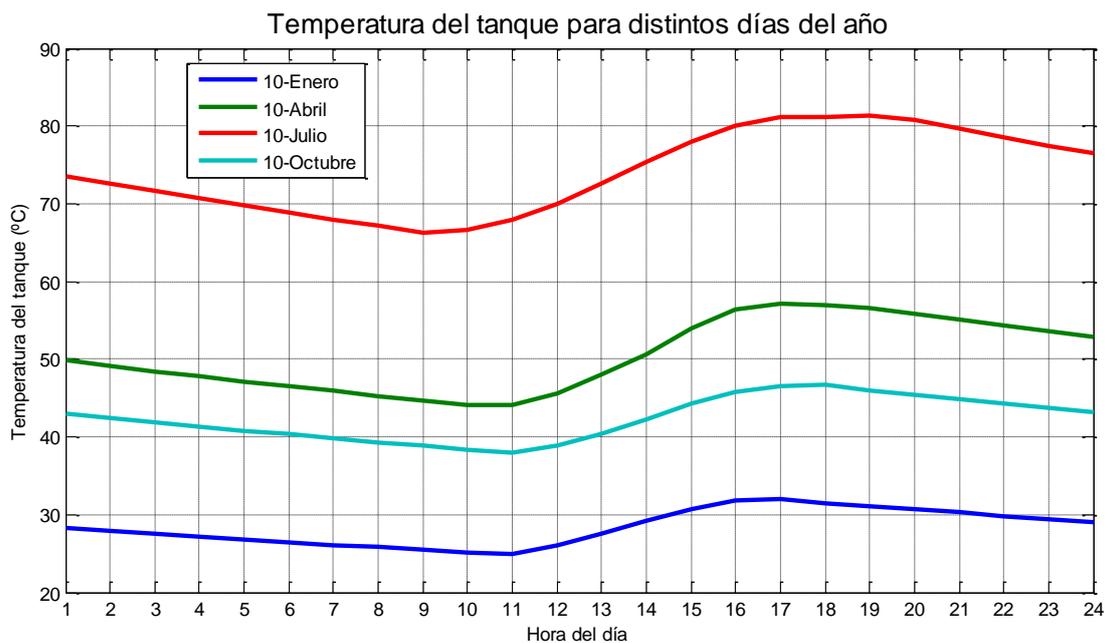


Figura 52.- Variación de la temperatura del tanque para distintos días del año.

En la figura 52 está representada la temperatura del depósito de acumulación para distintos días del año. Puede observarse que la variación en el día de esta temperatura tiene la misma forma para todas las épocas del año, trabajando, sin embargo, a una mayor temperatura durante los meses de verano. Se aprecia una gran diferencia de temperaturas entre los meses de invierno y los meses de verano, mientras que los meses intermedios como Abril u Octubre, el rango de temperaturas de trabajo del tanque es similar.

En la gráfica se aprecia cómo el incremento de temperatura que se produce durante las horas de sol es mayor en verano que en invierno, debido al mayor número de horas de luz que tienen los días en esta época y a la mayor irradiación que incide sobre los colectores, logrando aumentar en mayor porcentaje la temperatura del tanque en estas horas.

3.2. Aporte Solar

La simulación que se ha llevado a cabo pretende representar la actuación real de una instalación de ACS mediante el empleo de captadores solares. A partir de los resultados obtenidos para un año se puede determinar el aporte solar mensual y anual de la instalación. Para ello hay que tener en cuenta la temperatura de consumo, que se

mantiene constante a lo largo del año a 60°C (T_{ACS}). Debido a esto, se podrá hacer uso únicamente de la energía solar cuando la temperatura del tanque supere a la temperatura de consumo, mientras que el resto del tiempo será necesario un aporte auxiliar para llegar a los 60°C deseados.

La energía que aporta el depósito se calcula a partir de las siguientes expresiones, en función de la temperatura de dicho depósito, para cada hora de cada día del año.

- Si $T_{tanque} < T_{ACS}$:

$$E_{tanque} = m_{cons} \cdot Cp \cdot (T_{tanque} - T_{red})$$

- Si $T_{tanque} > T_{ACS}$:

$$E_{tanque} = m_{cons} \cdot Cp \cdot (T_{ACS} - T_{red})$$

La energía total necesaria en el sistema se obtiene como:

$$E_{total} = m_{cons} \cdot Cp \cdot (T_{ACS} - T_{red})$$

El aporte solar se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Aporte\ Solar = \frac{\sum_1^{365} \sum_1^{24} E_{tanque}}{\sum_1^{365} \sum_1^{24} E_{total}}$$

Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, este aporte solar debe ser superior al 70% para cumplir la normativa con el número de colectores empleados. El resultado en el caso de la simulación es:

$$Aporte\ Solar_{Anual} = 70,23\%$$

La siguiente tabla recoge el aporte solar para los distintos meses del año, representados también en la figura 53.

	Aporte solar mensual (%)
Enero	38,24%
Febrero	41,83%
Marzo	72,90%
Abril	89,75%
Mayo	95,26%
Junio	98,22%
Julio	100,00%
Agosto	99,86%
Septiembre	96,34%
Octubre	67,66%
Noviembre	43,12%
Diciembre	23,73%

Tabla 21.- Cálculo del aporte solar mensual según la simulación real.

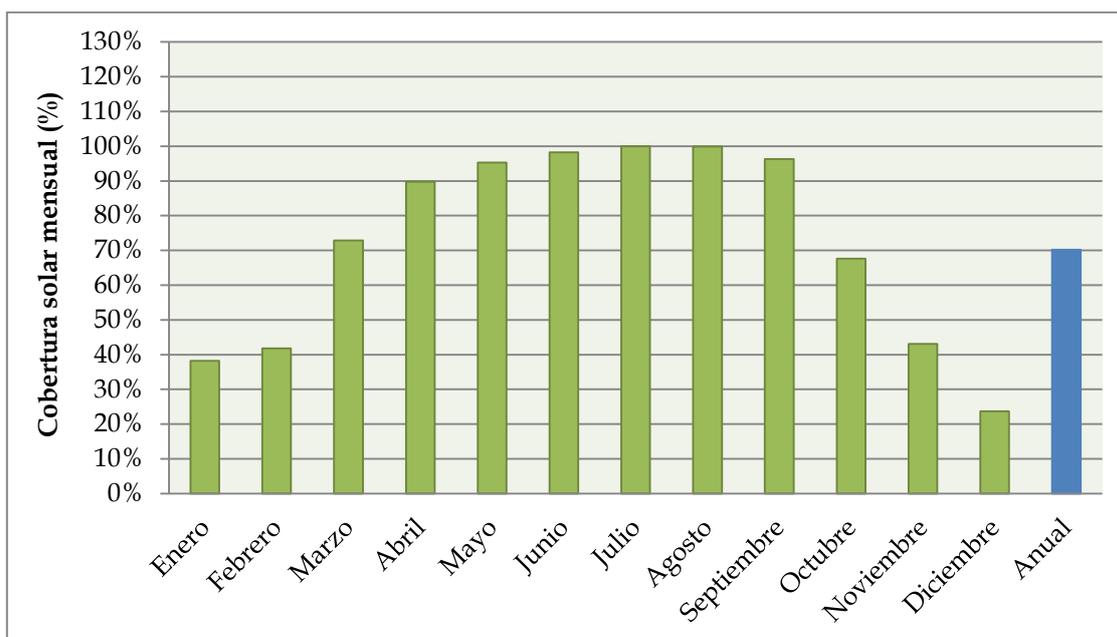


Figura 53.- Cobertura solar mensual y anual según la simulación real.

En la gráfica se observa la variación del aporte solar a lo largo del año, superando el aporte anual el 70% impuesto por el CTE. Los meses de verano la energía solar es capaz de cubrir el 100% de la demanda de ACS, no siendo necesario ningún aporte auxiliar, aunque en los meses de invierno debido a la baja irradiación solar no puede cubrirse totalmente la demanda y se necesita una caldera para llegar a la temperatura de consumo requerida.

El aporte auxiliar necesario en caso de no cubrir la demanda de ACS con energía solar puede calcularse gracias a la siguiente expresión:

$$E_{auxiliar} = m_{cons} \cdot Cp \cdot (T_{ACS} - T_{tanque})$$

La figura 54 representa el porcentaje de aporte solar y auxiliar para todos los meses del año.

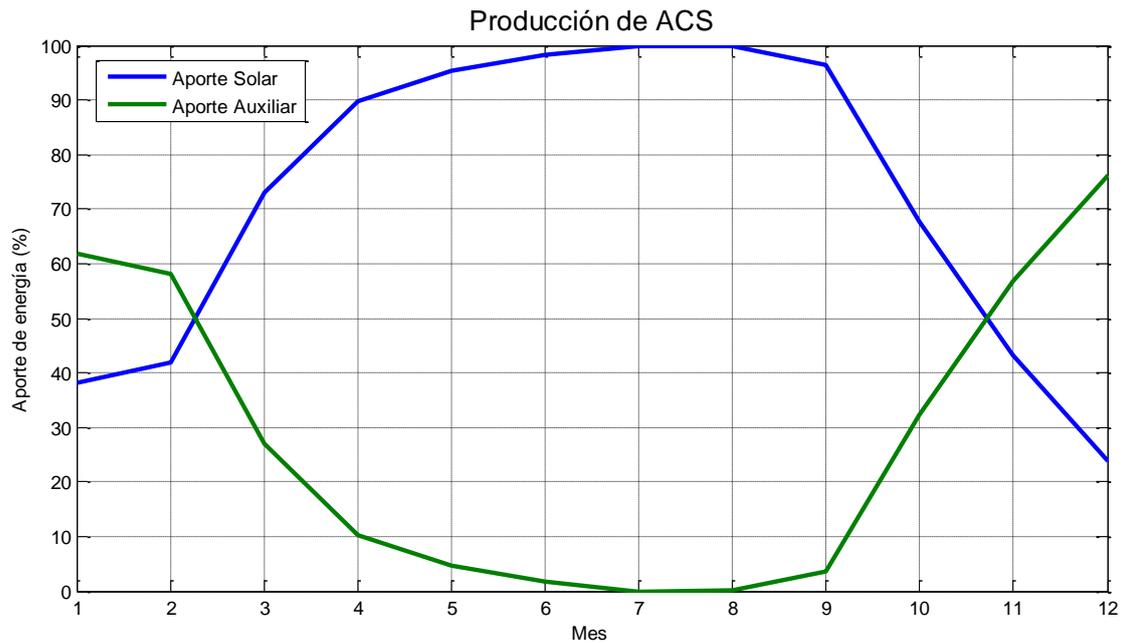


Figura 54.- Aporte solar y aporte auxiliar durante un año.

En esta gráfica se aprecia una simetría respecto al 50%, ya que según se incrementa el porcentaje de aporte solar, disminuye el aporte auxiliar necesario para cubrir totalmente la demanda de ACS. Al acercarse a los meses de verano la temperatura del tanque aumenta disminuyendo la necesidad de una caldera para conseguir la temperatura de consumo, llegando incluso a cubrir toda la demanda en los meses de Julio y prácticamente Agosto. No obstante, los primeros y últimos meses del año la caldera adquiere una gran importancia para cubrir las necesidades de los habitantes de la vivienda.

Por último, a partir del calor medio que se produce con la energía solar y el calor medio producido con la caldera para los distintos meses, se representa la potencia total producida durante el año, así como la demanda de ACS calculada a partir del

consumo medio anual y de la temperatura de red, sin tener en cuenta la variación del consumo explicado en el capítulo de la descripción del emplazamiento.

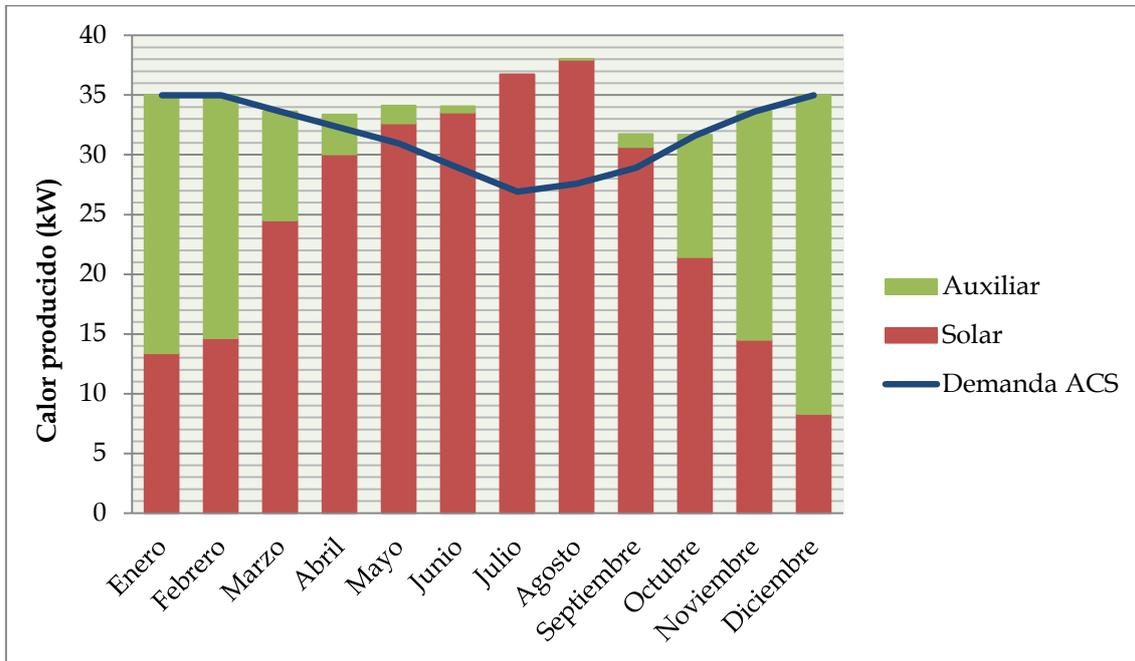


Figura 55.- Calor producido mediante E. Solar y E. Auxiliar y demanda mensual de ACS.

En la figura 55 se observa el calor mensual producido con la instalación solar y el calor necesario con un aporte auxiliar de energía para cubrir la demanda, además de la curva de demanda mensual de ACS. Los meses de invierno con ayuda de ambas instalaciones se consigue cubrir totalmente la demanda como se puede ver en la gráfica. No obstante, los meses de verano cuando la demanda de ACS es inferior el sistema está sobredimensionado, ya que en esta época el aporte solar supera considerablemente la demanda. Algunos meses se supera toda la demanda únicamente con energía solar y, sin embargo, aparece en la gráfica un aporte de energía auxiliar. Esto es debido a que los cálculos se han realizado con valores medios mensuales y para estos meses la temperatura del tanque ha sido inferior a la temperatura de consumo en algún momento, necesitando por tanto energía convencional para llegar a esa temperatura.

RESULTADOS FINALES

Resultados Finales

En los capítulos anteriores se ha obtenido el aporte solar siguiendo dos métodos de estudio, el método *f*-chart que sigue una ecuación dada, y una simulación real de actuación de una instalación solar para un año en concreto. Ambos métodos dan resultados parecidos, como se muestra en la siguiente figura.

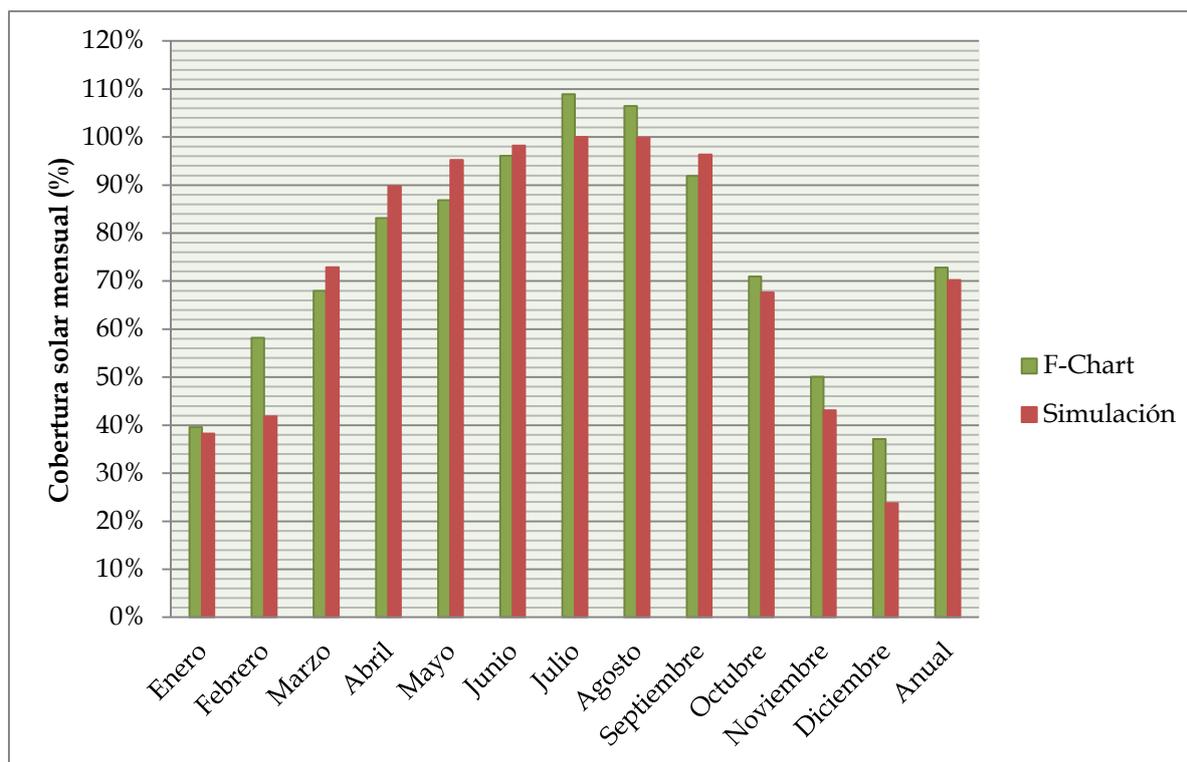


Figura 56.- Cobertura solar mensual para los dos métodos estudiados.

Puede observarse las similitudes en los resultados para el aporte solar mensual al igual que el aporte solar anual. El método *f*-chart da como resultado un 72,84% de aporte solar anual, mayor que la simulación que da un resultado del 70,23%, superando en ambos casos el mínimo restringido por el CTE. Además, por lo general el método *f*-chart muestra resultados superiores a la simulación para prácticamente todos los meses, ya que se parte de datos recogidos en estadísticas y no de datos reales como es el caso de la simulación. Los meses de verano, Julio y Agosto, en los cuales el método *f*-chart consigue un aporte solar de 109% y 106% respectivamente, la



simulación real no sobrepasa en ningún caso el 100% ya que la energía sobrante no se considera.

Como conclusión, se puede afirmar que el método de cálculo reglamentado *f*-chart se acerca mucho a la realidad, lo que lo convierte en un método fiable para determinar la cobertura solar a partir de un número de colectores resultantes de una iteración de cálculo.

ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL

Análisis Medioambiental

Uno de los principales objetivos de este proyecto es intentar reducir el impacto ambiental ocasionado por las calderas convencionales, debido a las emisiones de efecto invernadero, concretamente de CO₂. En este capítulo se realiza un estudio medioambiental comparando la instalación solar del proyecto con una instalación con el uso exclusivo de energía convencional.

Las aplicaciones de ACS convencionales constan de una caldera que proporciona energía procedente de la combustión de combustibles fósiles. Estas instalaciones son uno de los principales motivos del elevado porcentaje de emisiones de efecto invernadero que se emiten en el sector residencial.

La instalación solar diseñada en este proyecto permite evitar una parte del uso de fuentes de energía convencionales, ya que esa demanda está cubierta con energía solar, reduciendo por tanto las emisiones de gases contaminantes.

A continuación se recogen los datos de demanda de ACS, el aporte solar calculado mediante la simulación y el aporte auxiliar necesario para cubrir dicha demanda.

	Demanda ACS (kWh)	Aporte Solar (kWh)	Aporte Auxiliar (kWh)
Enero	26.024	9.951	16.073
Febrero	23.506	9.833	13.673
Marzo	25.024	18.241	6.783
Abril	23.247	20.865	2.382
Mayo	23.022	21.929	1.093
Junio	20.826	20.455	371
Julio	20.019	20.019	0
Agosto	20.519	20.491	28
Septiembre	20.826	20.063	763
Octubre	23.522	15.914	7.608
Noviembre	24.216	10.443	13.773
Diciembre	26.024	6.177	19.848
Total	276.776	194.381	82.395

Tabla 22.- Energía mensual aportada por la instalación y demanda de ACS.

En el caso de utilizar la instalación propuesta en este estudio, las emisiones de CO₂ las ocasiona el aporte auxiliar necesario cuando la energía solar no es suficiente. Sin embargo, si se dispone de una instalación convencional las emisiones de CO₂ son generadas por toda la demanda de ACS, ya que se cubre totalmente mediante una caldera convencional.

La caldera empleada en cada caso es de Gas Natural, ya que produce menos emisiones de CO₂ que en el caso de utilizar gasóleo o carbón. El Gas Natural emite 0,22 kg CO₂/kWh de energía.

Las emisiones resultantes en cada instalación son las siguientes, suponiendo en cada caso una caldera similar a la descrita en el proyecto, cuyo rendimiento es del 93%:

❖ Instalación Solar

$$Emisiones\ de\ CO_2 = \frac{82.395\ kWh}{\eta_{cald}} \cdot 0,22 \frac{kg\ CO_2}{kWh} = 19.491,2\ kg\ CO_2$$

❖ Instalación Convencional

$$Emisiones\ de\ CO_2 = \frac{276.776\ kWh}{\eta_{cald}} \cdot 0,22 \frac{kg\ CO_2}{kWh} = 65.473,8\ kg\ CO_2$$

Como puede observarse en ambos resultados, el uso de una instalación solar conlleva a un ahorro importante de emisiones de CO₂, en este caso en concreto del 70%. Si se considera la vida útil de este tipo de instalaciones, estimada en 20 años aproximadamente, se pueden evitar grandes cantidades de emisiones de CO₂, como se muestra a continuación.

	Emisiones producidas (toneladas CO ₂)
Instalación Solar	390
Instalación Convencional	1309

Tabla 23.- Toneladas de CO₂ emitidas para cada instalación en 20 años.

Estos resultados explican la importancia de utilizar energías renovables en el sector de la edificación, y la necesidad de impulsar nuevas medidas con las que mejorar la eficiencia energética en los edificios.

ANÁLISIS ECONÓMICO

Análisis Económico

En este capítulo se estudia la viabilidad económica del proyecto, calculando en primer lugar el coste de la inversión necesaria para poder estimar a continuación el ahorro económico debido al menor consumo de combustible y a las subvenciones vigentes para el fomento de estas instalaciones.

1. PRESUPUESTO

La siguiente tabla recoge el precio de los distintos elementos necesarios para esta instalación solar.

Componente	Precio unitario (€/ud.)	Cantidad	Importe total
Captador solar plano AuroTHERM VFK 145V (Vaillant)	763	100	76.300 €
Fluido caloportador propilenglicol	589	1	589 €
Depósito de inercia de 4000L MV4000I (Lapesa)	4025	8	32.200 €
Intercambiador de calor de placas CB60, 24 placas (Alfa Laval)	3408	1	3.408 €
Caldera Logano SK645 de potencia 360 kW (Buderus)	4850	1	4.850 €
Depósito de inercia de 3500L MV3500I (Lapesa)	3452	1	3.452 €
Sistema de Distribución	20000	1	20.000 €
Sistema de Control	1500	1	1.500 €
Presupuesto Total			142.299 €

Tabla 24.- Presupuesto de la instalación.

2. SUBVENCIONES

El plan de impulso de las energías renovables de la Comunidad de Madrid concede subvenciones para instalaciones de energía solar térmica de baja temperatura, alcanzando para este proyecto una subvención de 52.875 €.

3. VIABILIDAD ECONÓMICA

El estudio de viabilidad se encarga de analizar si el ahorro de combustible que supone la instalación solar frente a una instalación convencional permite amortizar la inversión inicial antes de finalizar la vida útil de este tipo de instalaciones, estimada en 20 años.

Para realizar este estudio se calcula el Valor Actual Neto (VAN), el cual mide la rentabilidad que proporciona el proyecto a lo largo de los años, obteniendo así el momento en el que los beneficios superan a los costes. El cálculo del VAN viene determinado a partir de la siguiente expresión:

$$VAN = -I_{inicial} + A \cdot \sum \left[\frac{1+c}{1+i} \right]^n - C_{mto} \cdot \sum \left[\frac{1+f}{1+i} \right]^n$$

Donde:

$I_{inicial}$: Inversión inicial del proyecto.

A: Ahorro de combustible.

C_{mto} : Coste de mantenimiento.

c: Incremento del precio del combustible.

i: Tasa de interés.

f: Inflación.

- Inversión inicial

$$I_{inicial} = 142.299 - 52.875 = 89.424 \text{ €}$$

- Ahorro de combustible

Se determina a partir del consumo de combustible evitado gracias a la instalación solar y del precio de éste, obtenido con la tarifa de Gas Natural que interese en el edificio según el consumo.

Tarifas oficiales de referencia*			
Tarifa aconsejada	Consumo kWh/año	Término fijo	Término variable
Gas Básica	Inferior o igual a 5.000	4,35 €/mes	5,929151 c€/kWh
Gas Óptima	Superior a 5.000 e inferior o igual a 11.500	8,99 €/mes	5,263951 c€/kWh
Gas Negocio	Superior a 11.500 e inferior o igual a 50.000	10,88 €/mes	4,948114 c€/kWh
Gas Plus Prima ¹	Superior a 50.000 e inferior o igual a 100.000	52,49 €/mes	5,54220 c€/kWh
Gas Supra Prima ²	Superior a 100.000 e inferior o igual a 1 GWh	78,37 €/mes	5,24100 c€/kWh

Tabla 25.- Tarifas de Gas Natural. Fuente: Gas Natural Fenosa 2012. [22]

En este proyecto la energía producida mediante energía solar, y por tanto, el ahorro de combustible en un año es 194.381 kWh, calculado en el capítulo del análisis medioambiental. Siguiendo la tabla 25, el ahorro de combustible corresponde a 9.719 €.

- Coste de mantenimiento

Toda instalación solar tiene asociados unos costes debidos al mantenimiento de los diferentes elementos de la instalación. Para el cálculo se estima un valor del 0,5% de la inversión inicial.

- Incremento del precio de combustible

El precio del combustible es función de muchas variables, tales como los costes de Gas Natural en el mercado, la demanda, los costes de transporte... Se ha tomado como valor de este incremento un 10%.

- Tasa de interés

La tasa de interés puede estimarse a partir del Euribor, fijado en Noviembre de 2012 en 0,588%, aumentando a este valor un pequeño porcentaje. De este modo, la tasa de interés fijada es un 1%.

- Inflación

La inflación se mide a partir del índice de precios al consumo (IPC). El último valor estimado de la inflación para la realización del análisis económico es del 2,9%.

A continuación se muestra una tabla que recoge el resultado del VAN anual desde el año que hace la instalación solar.

Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
- 79.294 €	- 68.229,95 €	- 56.147,05 €	- 42.954,22 €	- 28.551,94 €
Año 6	Año 7	Año 8		
- 12.831,79 €	4.324,30 €	23.044,95 €		

Tabla 26.- Resultado del VAN para cada año.

Una vez se ha calculado el VAN del proyecto, se puede saber el periodo de amortización de la instalación, ya que corresponde con el año en el cual el valor del VAN se hace positivo.

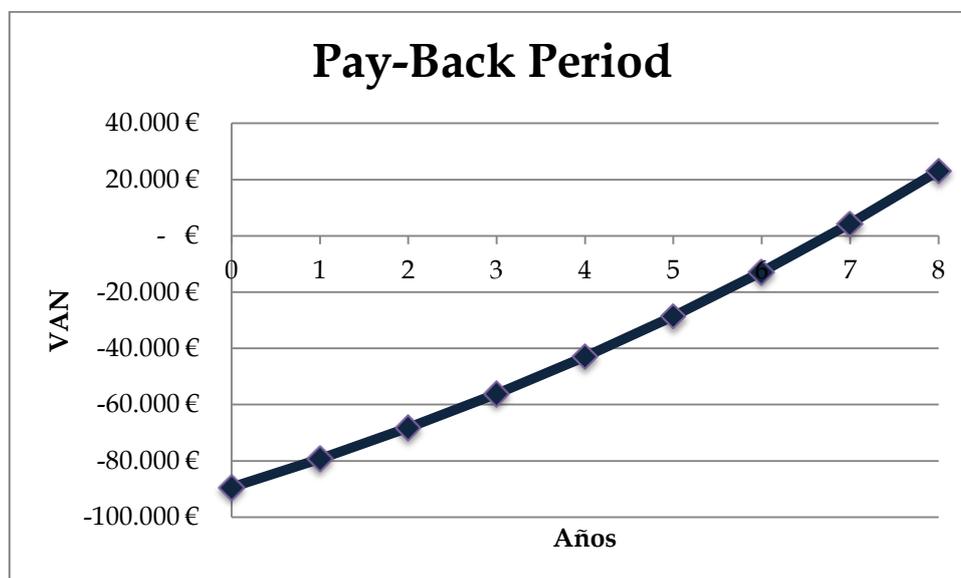


Figura 57.- Periodo de retorno de la inversión.

La figura 57 muestra el periodo de retorno de la inversión, donde puede apreciarse que a partir del séptimo año la instalación solar comienza a ser rentable. Si se tiene en cuenta la vida útil estimada de una instalación de este tipo, puede decirse que es rentable económicamente realizar la inversión inicial que supone, sin tener en cuenta el ahorro de emisiones calculado en el capítulo anterior.

CONCLUSIONES

Conclusiones

Durante la realización de este proyecto se han estudiado dos métodos de cálculo para estimar el aporte solar logrado mediante una instalación solar térmica para producir agua caliente sanitaria. Las principales conclusiones que se han obtenido son las siguientes:

1) Demanda y producción de ACS

- La demanda de ACS fluctúa en las distintas épocas del año, siendo menor en verano que en invierno. La producción de ACS mediante energía solar varía en función de la radiación incidente, coincidiendo por tanto la época de mayor demanda energética con la de menor producción, por lo que se ha determinado el ángulo óptimo de los colectores con el fin de captar la máxima radiación incidente sobre ellos, incrementando la producción en invierno. A pesar de esto, es necesario un aporte auxiliar de energía para cubrir la demanda, no necesitándose dicho aporte en los meses centrales del año. Por otra parte, el sistema de acumulación permite almacenar la energía térmica hasta el momento de uso, ya que la radiación solar únicamente se obtiene durante las horas de sol.

2) Método f -chart y simulación

- El método de cálculo f -chart, con el cual se determina la cobertura solar a partir de datos mensuales medios meteorológicos, es un proceso eficaz para obtener una idea del número de colectores necesarios para alcanzar un aporte solar estipulado según el CTE en cualquier tipo de edificación, ya que se consiguen resultados muy similares a los obtenidos con una simulación real.
- No obstante, en el caso de pretender conseguir más resultados como por ejemplo las temperaturas a lo largo del circuito en un momento dado, es

necesario el uso de programas de simulación más complejos que puedan proporcionar estos resultados con valores reales en lugar de utilizar datos estadísticos meteorológicos, como es el caso del *f*-chart.

- Independientemente del método de estudio utilizado en este proyecto, la instalación solar diseñada es capaz de proporcionar más de un 70% de aporte solar en un año, por lo que el empleo de la caldera es menor que en el caso de dotar a la instalación únicamente de energía convencional.

3) Análisis medioambiental y económico

- La instalación propuesta en este proyecto supone un gran ahorro de emisiones de CO₂ a la atmósfera en comparación con las emisiones ocasionadas al utilizar una instalación convencional, evitando un 70% de emisiones.
- Se ha estudiado la viabilidad económica de la instalación solar con el fin de conocer los beneficios respecto a una instalación convencional. El estudio económico estima en 7 años la amortización del proyecto, siendo el ahorro de combustible 9.719 € anuales.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- [1]. José María Martínez - Val. La energía en sus claves (2004), Fundación Iberdrola; Políticas energéticas y mercados de la energía, 924 - 962.
- [2]. Eurostat, European Commission. < <http://epp.eurostat.ec.europa.eu> >
(Última visita: 17/07/2012).
- [3]. La energía en España 2010, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- [4]. Energía 2012, Foro de la industria nuclear española. < <http://www.foronuclear.org> >
(Última visita: 02/10/2012).
- [5]. Inventario de gases de efecto invernadero de España (1990 - 2010), Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- [6]. Plan de Energías Renovables (PER) 2011 - 2020, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- [7] Plan de Acción 2008-2012, IDAE.
- [8]. Código Técnico de la Edificación (CTE), Ministerio de Fomento.
- [9]. Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE), Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y Ministerio de Vivienda.
- [10]. C. Singh Solanki. Solar Photovoltaics: Fundamentals, technologies and applications (2009).
- [11]. Energía solar térmica, manuales de energías renovables, IDAE.

- [12]. Instalaciones de energía solar, tomo IV, Centro de Estudios de Energía Solar (Censolar).
- [13]. Apuntes de la asignatura Energías Renovables, curso 2009 - 2010.
- [14]. U. Eicker. Solar Technologies for buildings (2003).
- [15]. J. A. Duffie and W. A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. 3ª Ed (2006).
- [16]. A. Soria Verdugo. Análisis de la instalación solar térmica y fotovoltaica de un edificio unifamiliar. Proyecto fin de carrera (Ingeniería Industrial), Universidad Carlos III de Madrid, 2006.
- [17]. Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura (2009), IDAE.
- [18]. Documentos Técnicos de Instalaciones en la Edificación (DTIE) 1.01: Instalaciones sanitarias, Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR).
- [19]. Apuntes de la asignatura Calor y Frío Industrial, curso 2011 - 2012.
- [20]. Thermophysical Properties of Brines. M. Conde Engineering, 2011.
- [21]. Guía técnica: Agua Caliente Sanitaria Central , Eficiencia y ahorro energético en edificios, IDAE.
- [22]. Tarifas de Gas Natural Fenosa. < <http://www.gasnaturalfenosa.es> >
(Última visita: 07/12/2012).

Catálogos de Fabricantes

[23]. Catálogo solar Vaillant, captadores solares planos. < <http://www.vaillant.es> >

(Última visita: 08/10/2012).

[24]. Catálogo de depósitos de gran capacidad Lapesa. < <http://www.lapesa.es> >

(Última visita: 16/11/2012).

[25]. Hoja técnica intercambiador CB60, Alfa Laval. < <http://www.alfalaval.com> >

(Última visita: 18/11/2012).

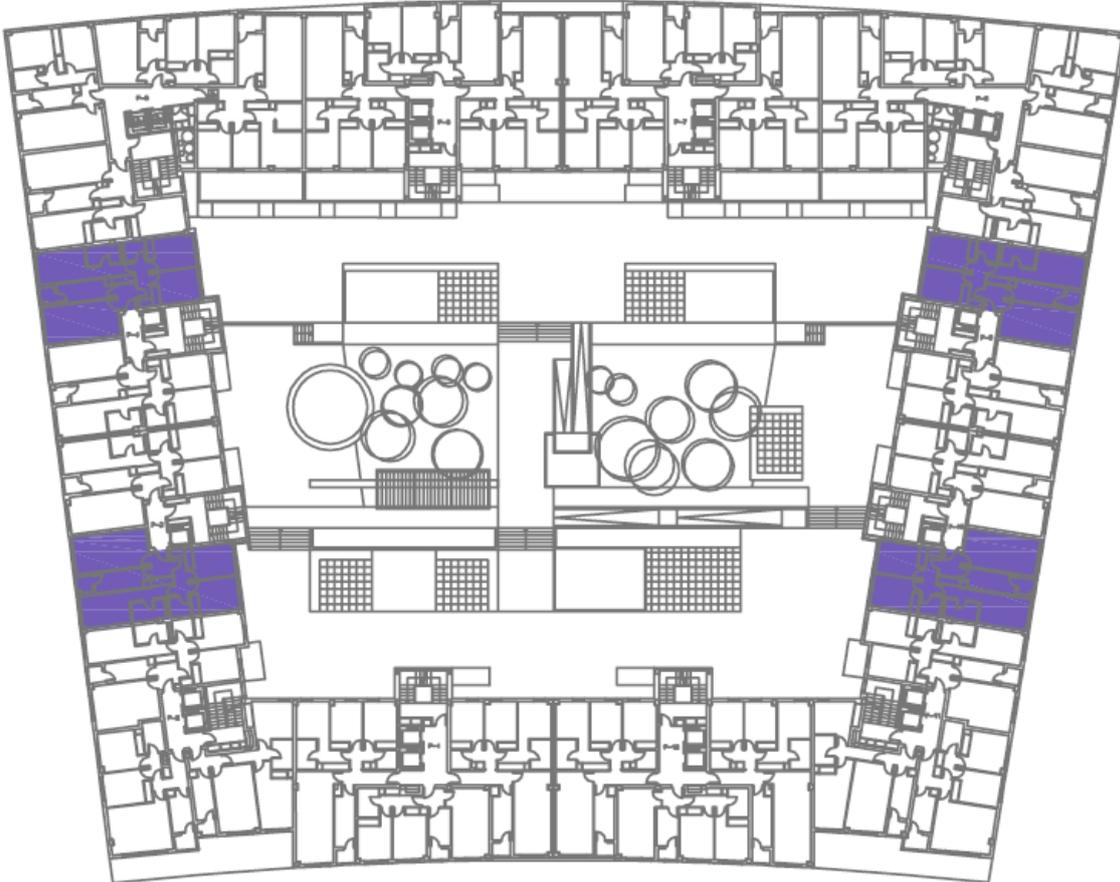
[26]. Catálogo de calderas Buderus. < <http://www.buderus.es> >

(Última visita: 29/11/2012).

ANEXOS

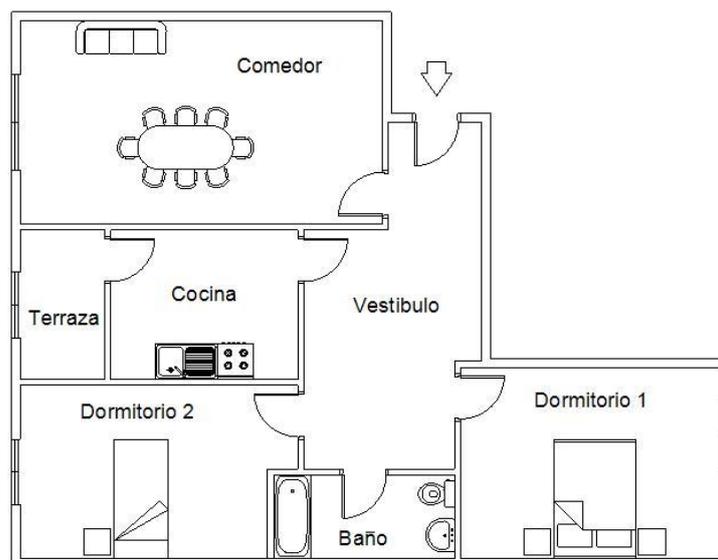
1. PLANOS DEL EDIFICIO

Vista del Edificio



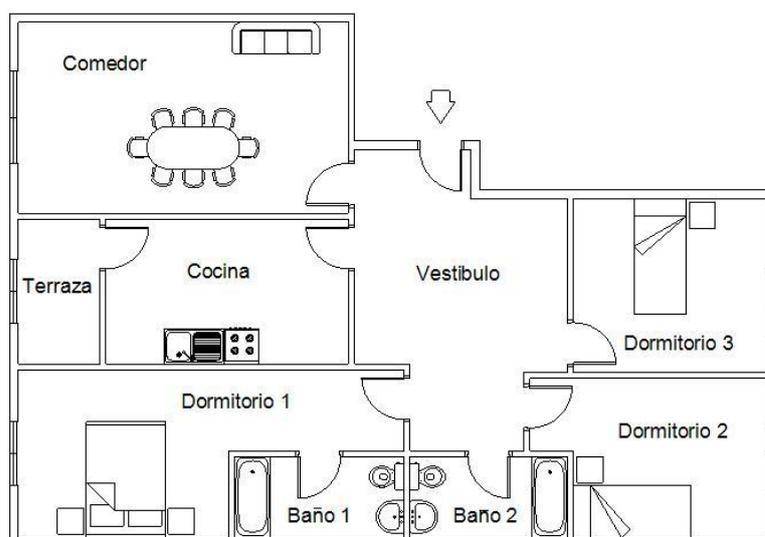
La figura muestra una vista en planta del edificio, donde está seleccionada un tipo de vivienda representativa de 3 dormitorios, dimensionada más adelante.

Vivienda 2 Dormitorios



Dimensiones	
Vestíbulo	9,92 m ²
Cocina	7,64 m ²
Terraza	3,50 m ²
Comedor	20,48 m ²
Dormitorio 1	13,80 m ²
Dormitorio 2	12,28 m ²
Baño	4,25 m ²
Superficie útil total	71,87 m ²

Vivienda 3 Dormitorios



Dimensiones	
Vestíbulo	13,75 m ²
Cocina	10,35 m ²
Terraza	3,50 m ²
Comedor	18,15 m ²
Dormitorio 1	14,41 m ²
Dormitorio 2	10,25 m ²
Dormitorio 3	9,90 m ²
Baño 1	4,25 m ²
Baño 2	4,05 m ²
Superficie útil total	88,61 m ²

2. PROGRAMACIÓN MATLAB

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Método f-chart                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function ASanual=fchart(Ncol)

% Método de f-chart

% 1) CARGA CALORÍFICA

Npers=632; %Número de personas del edificio
Dpers=22; % (L/día) Demanda ACS por persona
V_acs=Npers*Dpers; % (L/día) Demanda ACS del edificio
Cp=4180; % (J/kg°C) Agua
dens=1; % (kg/L) Agua
Tacs=60;
Tred_mes=[8;8;10;12;14;17;20;19;17;13;10;8];
Ndia=[31;28;31;30;31;30;31;31;30;31;30;31];

Qc=V_acs*dens*Cp*(Tacs-Tred_mes).*Ndia; % (J)

%Colector Vaillant VFK 145v
Ucol=2.414; % (W/m2K) Coef pérdidas térmicas
Acol=2.35; % (m2) Área de un colector
%ITERACIÓN
Scol=Acol*Ncol; % (m2) Área total colectores: 2.35xNcol
V_alm=130*Scol; % (L) Volumen de almacenamiento
% Tiene que cumplir: 50 < V/A < 180
FrTAn=0.79; % Curva de rendimiento
alpha=0.95; % Absortancia
tau=0.91; % Transmitancia
Fr=FrTAn/(tau*alpha);

% 2) RADIACIÓN INCIDENTE

% Energía solar diaria media
Edia=[9.3;13.7;15.8;19.6;19.9;21.6;24.7;24.3;20.4;15.8;11.3;8.7];
% (MJ/m2)
% Temperatura ambiente
Tames=[6;8;11;13;18;23;28;26;21;15;11;7]; % (°C)

% 3) CÁLCULO DEL PARÁMETRO D1

TA_TAn=0.96;
Fr_Fr=0.95;
FrTA=FrTAn*TA_TAn*Fr_Fr;
Ea=Scol*FrTA*Edia.*Ndia*10^6; % (J) Energía absorbida
D1=Ea./Qc;

% 4) DETERMINACIÓN DE D2

Fr_U=Fr*Ucol*Fr_Fr; % (W/m2K)

```



```
Tref=100;
dt=Ndia*24;
% Factor corrector almacenamiento
K1=(V_alm*dens/(75*Scol))^-0.25;
% Factor corrector ACS
K2=(11.6+1.18*Tacs+3.86*Tred_mes-2.32*Tames)./(Tref-Tames);
Ep=Scol*Fr_U*(Tref-Tames).*dt*K1.*K2*3600; %(J) Energía perdida
D2=Ep./Qc;

% 5) DETERMINACIÓN DE f

f=1.029*D1-0.065*D2-0.245*D1.^2+0.0018*D2.^2+0.0215*D1.^3;
Qu=f.*Qc; %(J) Calor útil

% 6) APORTE SOLAR MENSUAL

ASmes=Qu./Qc*100 % (%)

% 7) APORTE SOLAR ANUAL

ASanual=sum(Qu)./sum(Qc)*100; % (%) Tiene que superar el 70%
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Radiación Inclínada                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

dia=1:365;
hora=1:24;

latitud=40.19; %Latitud en Leganés

%Datos de Radiación global (W/m2)
radiacion_mes;

%DECLINACION
declin=23.45*sind(360*(284+dia)/365);
%Lo convertimos a matriz
for d=1:365
    declin_a(1:24,d)=declin(d);
end

%ÁNGULO HORARIO
w=(hora-12)*15;
%Lo convertimos a matriz
for h=1:24
    w_a(h,1:365)=w(h);
end

%ALTURA SOLAR
alpha=asind(sind(declin_a)*sind(latitud)+cosd(declin_a)* ...
cosd(latitud).*cosd(w_a));

%ÁNGULO CENITAL
thetaz=90-alpha;

%ÁNGULO AZIMUTAL
gamma=asind(cosd(declin_a).*sind(w_a)./cosd(alpha));

%COLECTOR SOLAR
beta_opt=latitud-declin_a; %Ángulo de inclinación del colector solar
%gamma_col=0; %Ángulo de orientación de la superficie respecto al Sur.
%Será positivo hacia el Este.

%Ángulo de salida y puesta del Sol
w_sh=acosd(-tand(latitud)*tand(declin_a)); %Horizontal

w_si=acosd(-tand(latitud-beta)*tand(declin_a)); %Inclinada

w_s=min(w_sh,w_si);

%Duración del Día
DD=2*w_s/15;

```

```

%CONSTANTE SOLAR
Gon=1367*(1+0.033*cosd(360*dia/365));
%Lo convertimos en matriz
for d=1:365
    Gon_a(1:24,d)=Gon(d);
end

%Índice de transparencia atmosférica
kt=Ih./Gon_a;

%Correlación de Orgill y Hollands
for d=1:365
    for h=1:24
        if kt(h,d)<0.35
            Id(h,d)=(1-0.249*kt(h,d))*Ih(h,d);
        elseif kt(h,d)>=0.35 & kt(h,d)<0.75
            Id(h,d)=(1.557-1.84*kt(h,d))*Ih(h,d);
        else
            Id(h,d)=0.177*Ih(h,d);
        end
    end
end

rho_g=0.2; %Reflectividad del suelo
Fcs=(1+cosd(beta))/2; %Factores de corrección
Fcg=(1-cosd(beta))/2;

Rb=(cosd(latitud-beta)*cosd(declin_a).*cosd(w_a)+ ...
sind(latitud-beta)*sind(declin_a))./(cosd(latitud)*cosd(declin_a)...
.*cosd(w_a)+sind(latitud)*sind(declin_a));

%RADIACIÓN INCLINADA
Ii=(Ih-Id).*Rb+Id*Fcs+Ih*rho_g*Fcg;

% ----- %

% Gráficas de la radiación solar

%Declinación
figure (1)
plot(dia,declin,'LineWidth',2);
title('Declinación a lo largo del año');
xlim([1 365]);
xlabel('Día');
ylabel('Declinación');
grid
set(gca,'XTick',[1 53 105 157 209 261 313 365]);

%Ángulo horario
figure (2)
plot(hora,w,'LineWidth',2);
title('Ángulo horario para un día');
xlim([1 24]);
xlabel('Hora del día');
ylabel('Ángulo horario (deg)');

```



```
grid
set(gca,'XTick',[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19
20 21 22 23 24]);

%Índice de transparencia
ktmayor=max(kt);

figure (3)
bar(dia,ktmayor);
title('Transparencia atmosférica a lo largo del año');
xlim([1 365]);
xlabel('Día');
ylabel('Transparencia atmosférica');
set(gca,'XTick',[1 53 105 157 209 261 313 365]);

%Duración del día
figure (4)
plot(dia,DD(:,:),'LineWidth',2);
title('Duración del día a lo largo del año');
xlim([1 365]);
xlabel('Día');
ylabel('Duración del día (horas)');
grid
set(gca,'XTick',[1 53 105 157 209 261 313 365]);

%Radiación horizontal distintos dias del año
figure (5)
plot(hora,Ih(:,5),hora,Ih(:,95),hora,Ih(:,191),hora,Ih(:,283))
legend('5-Enero','5-Abril','10-Julio','10-October');
title('Radiación Global sobre una Superficie Horizontal');
xlabel('Hora del día');
xlim([1 24]);
ylabel('Radiación horizontal (W/m^2)');
grid
set(gca,'XTick',[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19
20 21 22 23 24]);
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Máxima Radiación                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Script para conseguir la máxima radiación

Scol=2.35; %rea del colector solar

b_cambio=0:5:90;
E_cambio=[];

for x=1:19

    beta=b_cambio(x);

    rad_inclinada;

% Datos de radiación inclinada de Enero, Febrero, Marzo, Octubre,
% Noviembre y Diciembre

    Invi=[Ii(:,1:90) Ii(:,274:365)];
    Imax=sum(max(Invi));

    Energia=Scol*Imax;

    E_cambio=[E_cambio Energia];
end

%Energa para distintos ángulos de inclinación
plot(b_cambio,E_cambio,'-*','MarkerSize',10,'LineWidth',2);
title('Irrradiacin en función de la inclinación del colector');
xlabel('ángulo de inclinación ()');
ylabel('Energía incidente en invierno (W)');

[Emax,posicion]=max(E_cambio);

bmax=b_cambio(posicion)

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Simulación                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear
clc

Datos;

beta=40; %Óptimo para invierno, de otro programa
rad_inclinada;
temperatura_mes;
clear Enero Febrero Marzo Abril Mayo Junio Julio ...
        Agosto Septiembre Octubre Noviembre Diciembre

Ta=temp_anual;

dt=3600; %(s) Variación de lhora
Tambiente=20; % Constante

A=mtanq*Cp/dt+mcol*Cp+mcons*Cp+Utanq*Stanq;

d=1;h=1;
Te=5; %(°C) Supuesta: Más tarde se comprobará
Ts=5;
Ttanq=10; %Supuesta: Primer valor

dif_ant=2; difT=3;
tolerancial=50;
desviacion=10;
iteracion=1;

Ef=0.6; %Eficiencia del intercambiador

while tolerancial > 5

for d=1:365

    if d~=1

        if difT < 2
            Te(1,d)=Ts(24,d-1);
        elseif difT > 7
            Te(1,d)=Ttanq(24,d-1);
        elseif dif_ant == 2
            Te(1,d)=Ts(24,d-1);
        else
            Te(1,d)=Ttanq(24,d-1);
        end

        desv=1;
        while desv > 0.001
            % Hay dos colectores conectados en serie
            Imin1=abs(2.414*0.914*(Te(1,d)-Ta(1,d))/0.79);

```



```
if Ii(1,d) > Imin1
    %Rendimiento del primer colector
    rend1(1,d)=0.79-Ucol*Fr*(Te(1,d)-Ta(1,d))./Ii(1,d);
else
    rend1(1,d)=0;
end

%Calor útil en el primer colector
Qu1=rend1(1,d)*Ii(1,d)*Scol/2;
%Temperatura de salida del primer colector
Tinterm=Qu1/(mcol*Cp_p)+Te(1,d);

Imin2=abs(2.414*0.914*(Tinterm-Ta(1,d))/0.79);

if Ii(1,d) > Imin2
    %Rendimiento del segundo colector
    rend2(1,d)=0.79-Ucol*Fr*(Tinterm-Ta(1,d))./Ii(1,d);
else
    rend2(1,d)=0;
end

%Calor útil en el segundo colector
Qu2=rend2(1,d)*Ii(1,d)*Scol/2;
%Temperatura de salida del segundo colector
Ts(1,d)=Qu2/(mcol*Cp_p)+Tinterm;

difT=Ts(1,d)-Ttanq(24,d-1);

if difT < 2 %PARAR
    Ttanq(1,d)=(mcons*Tred(1,d)+(mtanq/dt-mcons)...
        *Ttanq(24,d-1))/(mtanq/dt);
    dif_ant=2;

    if Ts(1,d) == Te(1,d)
        Noche=(100-Ta(1,d))/100;
        Ts(1,d)=Ts(1,d)-Noche;
        Te(1,d)=Ts(1,d);
    end

    desv=0.0005;

elseif difT > 7 %FUNCIONAR
    B=mtanq*Cp*Ttanq(24,d-1)/dt+mcol*Cp*Ts(1,d) ...
        +mcons*Cp*Tred(1,d)+Utanq*Stanq*Tambiente;
    Ttanq(1,d)=B/A;
    dif_ant=7;

    %Intercambiador
    Te_col=Ts(1,d)-Ef*(Ts(1,d)-Ttanq(1,d));
    Te_tanq=Cp_p*(Ts(1,d)-Te_col)/Cp+Ttanq(1,d);

    Ttanque=Ttanq(1,d);
    B=mtanq*Cp*Ttanq(24,d-1)/dt+mcol*Cp*Te_tanq...
        +mcons*Cp*Tred(1,d)+Utanq*Stanq*Tambiente;
    Ttanq(1,d)=B/A;

    desv=abs(Te(1,d)-Te_col);
```



```
        if desv > 0.001
            Te(1,d)=Te_col;
        end

elseif dif_ant == 2 %PARAR
    Ttanq(1,d)=(mcons*Tred(1,d)+(mtanq/dt-mcons) ...
        *Ttanq(24,d-1))/(mtanq/dt);

    if Ts(1,d) == Te(1,d)
        Noche=(100-Ta(1,d))/100;
        Ts(1,d)=Ts(1,d)-Noche;
        Te(1,d)=Ts(1,d);
    end

    desv=0.0005;

else %if dif_ant == 7 %FUNCIONAR
    B=mtanq*Cp*Ttanq(24,d-1)/dt+mcol*Cp*Ts(1,d) ...
        +mcons*Cp*Tred(1,d)+Utanq*Stanq*Tambiente;
    Ttanq(1,d)=B/A;

    %Intercambiador
    Te_col=Ts(1,d)-Ef*(Ts(1,d)-Ttanq(1,d));
    Te_tanq=Cp_p*(Ts(1,d)-Te_col)/Cp+Ttanq(1,d);

    Ttanque=Ttanq(1,d);
    B=mtanq*Cp*Ttanq(24,d-1)/dt+mcol*Cp*Te_tanq ...
        +mcons*Cp*Tred(1,d)+Utanq*Stanq*Tambiente;
    Ttanq(1,d)=B/A;

    desv=abs(Te(1,d)-Te_col);
    if desv > 0.001
        Te(1,d)=Te_col;
    end

end
end
end

for h=2:24

    if h==2 && d==1
        Te(2,1)=Ts(1,1);

    elseif h==2 && d~=1
        if difT < 2
            Te(2,d)=Ts(1,d);
        elseif difT > 7
            Te(2,d)=Ttanq(1,d);
        elseif dif_ant == 2
            Te(2,d)=Ts(1,d);
        else
            Te(2,d)=Ttanq(1,d);
        end

    else
```



```
    if difT < 2
        Te(h,d)=Ts(h-1,d);
    elseif difT > 7
        Te(h,d)=Ttanq(h-1,d);
    elseif dif_ant == 2
        Te(h,d)=Ts(h-1,d);
    else
        Te(h,d)=Ttanq(h-1,d);
    end
end

tolerancia=1;

while tolerancia > 0.001

    Imin1=abs(2.414*0.914*(Te(h,d)-Ta(h,d))/0.79);

    if Ii(h,d) > Imin1
        %Rendimiento del primer colector
        rend1(h,d)=0.79-Ucol*Fr*(Te(h,d)-Ta(h,d))./Ii(h,d);
    else
        rend1(h,d)=0;
    end

    %Calor útil en el primer colector
    Qu1=rend1(h,d)*Ii(h,d)*Scol/2;
    %Temperatura de salida del primer colector
    Tinterm=Qu1/(mcol*Cp_p)+Te(h,d);

    Imin2=abs(2.414*0.914*(Tinterm-Ta(h,d))/0.79);

    if Ii(h,d) > Imin2
        %Rendimiento del segundo colector
        rend2(h,d)=0.79-Ucol*Fr*(Tinterm-Ta(h,d))./Ii(h,d);
    else
        rend2(h,d)=0;
    end

    %Calor útil en el segundo colector
    Qu2=rend2(h,d)*Ii(h,d)*Scol/2;
    %Temperatura de salida del segundo colector
    Ts(h,d)=Qu2/(mcol*Cp_p)+Tinterm;

    difT=Ts(h,d)-Ttanq(h-1,d);

    if difT < 2 %PARAR
        Ttanq(h,d)=(mcons*Tred(h,d)+(mtanq/dt-mcons)...
            *Ttanq(h-1,d))/(mtanq/dt);
        dif_ant=2;

        if Ts(h,d) == Te(h,d)
            Noche=(100-Ta(h,d))/100;
            Ts(h,d)=Ts(h,d)-Noche;
            Te(h,d)=Ts(h,d);
        end
        tolerancia=0.0005;
    end
end
```



```
elseif difT > 7 %FUNCIONAR
    dif_ant=7;

    B=mtanq*Cp*Ttanq(h-1,d)/dt+mcol*Cp*Ts(h,d) ...
        +mcons*Cp*Tred(h,d)+Utanq*Stanq*Tambiente;
    Ttanq(h,d)=B/A;

    %Intercambiador
    Te_col=Ts(h,d)-Ef*(Ts(h,d)-Ttanq(h,d));
    Te_tanq=Cp_p*(Ts(h,d)-Te_col)/Cp+Ttanq(h,d);

    Ttanque=Ttanq(h,d);
    B=mtanq*Cp*Ttanq(h-1,d)/dt+mcol*Cp*Te_tanq ...
        +mcons*Cp*Tred(h,d)+Utanq*Stanq*Tambiente;
    Ttanq(h,d)=B/A;

    tolerancia=abs(Te(h,d)-Te_col);
    if tolerancia > 0.001
        Te(h,d)=Te_col;
    end

elseif dif_ant == 2 %PARAR
    Ttanq(h,d)=(mcons*Tred(h,d)+(mtanq/dt-mcons) ...
        *Ttanq(h-1,d))/(mtanq/dt);

    if Ts(h,d) == Te(h,d)
        Noche=(100-Ta(h,d))/100;
        Ts(h,d)=Ts(h,d)-Noche;
        Te(h,d)=Ts(h,d);
    end
    tolerancia=0.0005;

else %if dif_ant == 7 %FUNCIONAR

    B=mtanq*Cp*Ttanq(h-1,d)/dt+mcol*Cp*Ts(h,d) ...
        +mcons*Cp*Tred(h,d)+Utanq*Stanq*Tambiente;
    Ttanq(h,d)=B/A;

    %Intercambiador
    Te_col=Ts(h,d)-Ef*(Ts(h,d)-Ttanq(h,d));
    Te_tanq=Cp_p*(Ts(h,d)-Te_col)/Cp+Ttanq(h,d);

    Ttanque=Ttanq(h,d);
    B=mtanq*Cp*Ttanq(h-1,d)/dt+mcol*Cp*Te_tanq...
        +mcons*Cp*Tred(h,d)+Utanq*Stanq*Tambiente;
    Ttanq(h,d)=B/A;

    tolerancia=abs(Te(h,d)-Te_col);
    if tolerancia > 0.001
        Te(h,d)=Te_col;
    end

end
end
end
end
```

```
% Volvemos a calcular para (1,1)
if iteracion == 1
    if difT < 2
        Te(1,1)=Ts(24,365);
    elseif difT >7
        Te(1,1)=Ttanq(24,365);
    elseif dif_ant == 2
        Te(1,1)=Ts(24,365);
    else
        Te(1,1)=Ttanq(24,365);
    end
    iteracion=iteracion+1;
end

while desviacion > 0.001
    Ts(1,1)=Te(1,1);

    difT=Ts(1,1)-Ttanq(24,365);

    if difT < 2 %PARAR
        Ttanq(1,1)=(mcons*Tred(1,1)+(mtanq/dt-mcons) ...
            *Ttanq(24,365))/(mtanq/dt);
        dif_ant=2;

        if Ts(1,1) == Te(1,1)
            Noche=(100-Ta(1,1))/100;
            Ts(1,1)=Ts(1,1)-Noche;
            Te(1,1)=Ts(1,1);
        end

        desviacion=0.0005;

    elseif difT > 7 %FUNCIONAR
        B=mtanq*Cp*Ttanq(24,365)/dt+mcol*Cp*Ts(1,1) ...
            +mcons*Cp*Tred(1,1)+Utanq*Stanq*Tambiente;
        Ttanq(1,1)=B/A;
        dif_ant=7;

        %Intercambiador
        Te_col=Ts(1,1)-Ef*(Ts(1,1)-Ttanq(1,1));
        Te_tanq=Cp_p*(Ts(1,1)-Te_col)/Cp+Ttanq(1,1);

        Ttanque=Ttanq(1,1);
        B=mtanq*Cp*Ttanq(24,365)/dt+mcol*Cp*Te_tanq...
            +mcons*Cp*Tred(1,1)+Utanq*Stanq*Tambiente;
        Ttanq(1,1)=B/A;

        desviacion=abs(Te(1,1)-Te_col);
        if desviacion > 0.001
            Te(1,1)=Te_col;
        end

    elseif dif_ant == 2 %PARAR
        Ttanq(1,1)=(mcons*Tred(1,1)+(mtanq/dt-mcons) ...
            *Ttanq(24,365))/(mtanq/dt);
```



```
if Ts(1,1) == Te(1,1)
Noche=(100-Ta(1,1))/100;
Ts(1,1)=Ts(1,1)-Noche;
Te(1,1)=Ts(1,1);
end

desviacion=0.0005;

else %FUNCIONAR
B=mtanq*Cp*Ttanq(24,365)/dt+mcol*Cp*Ts(1,1) ...
+mcons*Cp*Tred(1,1)+Utanq*Stanq*Tambiente;
Ttanq(1,1)=B/A;

%Intercambiador
Te_col=Ts(1,1)-Ef*(Ts(1,1)-Ttanq(1,1));
Te_tanq=Cp_p*(Ts(1,1)-Te_col)/Cp+Ttanq(1,1);

Ttanque=Ttanq(1,1);
B=mtanq*Cp*Ttanq(24,365)/dt+mcol*Cp*Te_tanq...
+mcons*Cp*Tred(1,1)+Utanq*Stanq*Tambiente;
Ttanq(1,1)=B/A;

desviacion=abs(Te(1,1)-Te_col);
if desviacion > 0.001
Te(1,1)=Te_col;
end

end
end

tolerancia1=abs(Te(1,1)-Te(2,1));

end
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Aporte Solar                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear
clc

Simulacion_tanque;

Tacs=60;

for d=1:365
    for h=1:24
        if Ttanq(h,d) < Tacs %Necesita aporte auxiliar
            Q(h,d)=mcons*Cp*(Tacs-Ttanq(h,d)); % Aporte aux
            Aux(h,d)=mcons*Cp*(Tacs-Ttanq(h,d));
            Etanque(h,d)=mcons*Cp*(Ttanq(h,d)-Tred(h,d));
            ASD=1;
        else
            Q(h,d)=mcons*Cp*(Ttanq(h,d)-Tred(h,d)); %Sin aporte aux
            Etanque(h,d)=mcons*Cp*(Tacs-Tred(h,d));
            ASD=2;
        end
    end
end

Ettotal=mcons*Cp*(Tacs-Tred);

AS_dia=sum(Etanque)*100./sum(Ettotal);
ApAux_dia=sum(Aux)*100./sum(Ettotal);

AS_anual=sum(sum(Etanque))*100/sum(sum(Ettotal))
ApAux_anual=sum(sum(Aux))*100/sum(sum(Ettotal))

%Aporte Solar Mensual

AS_ene=sum(sum(Etanque(:,1:31)))*100/sum(sum(Ettotal(:,1:31)));
AS_feb=sum(sum(Etanque(:,32:59)))*100/sum(sum(Ettotal(:,32:59)));
AS_mar=sum(sum(Etanque(:,60:90)))*100/sum(sum(Ettotal(:,60:90)));
AS_abr=sum(sum(Etanque(:,91:120)))*100/sum(sum(Ettotal(:,91:120)));
AS_may=sum(sum(Etanque(:,121:151)))*100/sum(sum(Ettotal(:,121:151)));
AS_jun=sum(sum(Etanque(:,152:181)))*100/sum(sum(Ettotal(:,152:181)));
AS_jul=sum(sum(Etanque(:,182:212)))*100/sum(sum(Ettotal(:,182:212)));
AS_ago=sum(sum(Etanque(:,213:243)))*100/sum(sum(Ettotal(:,213:243)));
AS_sep=sum(sum(Etanque(:,244:273)))*100/sum(sum(Ettotal(:,244:273)));
AS_oct=sum(sum(Etanque(:,274:304)))*100/sum(sum(Ettotal(:,274:304)));
AS_nov=sum(sum(Etanque(:,305:334)))*100/sum(sum(Ettotal(:,305:334)));
AS_dic=sum(sum(Etanque(:,335:365)))*100/sum(sum(Ettotal(:,335:365)));

AS_mes=[AS_ene AS_feb AS_mar AS_abr AS_may AS_jun AS_jul AS_ago...
        AS_sep AS_oct AS_nov AS_dic];

```

%Aporte Axuliar Mensual

```
ApAux_ene=sum(sum(Aux(:,1:31)))*100/sum(sum(Etotal(:,1:31)));
ApAux_feb=sum(sum(Aux(:,32:59)))*100/sum(sum(Etotal(:,32:59)));
ApAux_mar=sum(sum(Aux(:,60:90)))*100/sum(sum(Etotal(:,60:90)));
ApAux_abr=sum(sum(Aux(:,91:120)))*100/sum(sum(Etotal(:,91:120)));
ApAux_may=sum(sum(Aux(:,121:151)))*100/sum(sum(Etotal(:,121:151)));
ApAux_jun=sum(sum(Aux(:,152:181)))*100/sum(sum(Etotal(:,152:181)));
ApAux_jul=sum(sum(Aux(:,182:212)))*100/sum(sum(Etotal(:,182:212)));
ApAux_ago=sum(sum(Aux(:,213:243)))*100/sum(sum(Etotal(:,213:243)));
ApAux_sep=sum(sum(Aux(:,244:273)))*100/sum(sum(Etotal(:,244:273)));
ApAux_oct=sum(sum(Aux(:,274:304)))*100/sum(sum(Etotal(:,274:304)));
ApAux_nov=sum(sum(Aux(:,305:334)))*100/sum(sum(Etotal(:,305:334)));
ApAux_dic=sum(sum(Aux(:,335:365)))*100/sum(sum(Etotal(:,335:365)));
```

```
ApAux_mes=[ApAux_ene ApAux_feb ApAux_mar ApAux_abr ApAux_may...
           ApAux_jun ApAux_jul ApAux_ago ApAux_sep ApAux_oct...
           ApAux_nov ApAux_dic]
```

figure (1)

```
mes=1:12;
plot(mes,AS_mes,mes,ApAux_mes);
legend('Aporte Solar','Aporte Auxiliar');
title('Producción de ACS');
xlabel('Mes');
xlim([1 12]);
ylabel('Aporte de energía (%)');
grid
```

3. FICHA TÉCNICA DE LOS ELEMENTOS UTILIZADOS

auroTHERM

Captadores solares



Los captadores solares planos auroTHERM están diseñados para instalaciones en las que se busque un gran ahorro y alto rendimiento de la instalación.

Gracias a su diseño hidráulico, los captadores solares auroTHERM pueden trabajar con bajo caudal sin pérdida de rendimiento y reducir de esta manera el tamaño del resto de elementos de la instalación como bombas, tuberías, etc., consiguiendo por lo tanto la reducción del coste de la instalación.

Su construcción en marco de Aluminio de color oscuro y mínimo espesor le proporciona un diseño ideal para integrarse estéticamente con cualquier tipo de cubierta.

Garantía de 5 años.

Ventajas:

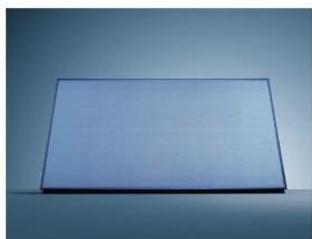
- Alto rendimiento: gracias al absorbedor selectivo, aislamiento de alta calidad y vidrio con alta transmitancia.
- Gran superficie de captación: 2,51 m² por lo que para la misma superficie de captación el nº de captadores es menor.
- Configuración hidráulica interna: gracias al diseño de su configuración hidráulica, se pueden conectar hasta 12 captadores en una misma fila, consiguiendo de esta manera disminuir el nº de soportes, tuberías, conexiones y tiempo de montaje.(abaratamiento de la instalación).
- Conexión hidráulica rápida y segura. Conexiones de acero inoxidable para la unión entre captadores y para la entrada/salida de la fila de captadores.
- Posibilidad de entrada y salida a la fila de captadores por el mismo lado (Máximo 5 captadores por fila para este tipo de configuración). Se reducen así los costes de tubería, accesorios mano de obra, etc.
- Posibilidad de funcionamiento en low flow: En instalaciones solares con más de 10 m² se puede hacer funcionar la instalación a bajo caudal, condiciones de low flow (25 L/h m²) sin pérdida de rendimiento en los captadores.
- Alta calidad de los materiales, que dotan al captador de un alto rendimiento, fiabilidad y durabilidad.
- Pared posterior de aluminio resistente a los golpes y a la corrosión.

Captadores solares planos



auroTHERM VFK 125

Captador solar plano de alto rendimiento diseñado para instalaciones de gran tamaño en las que gracias al alto rendimiento del captador y su gran superficie de captación se reduce el número de captadores a instalar.



auroTHERM VFK 145V, VFK 145H

Captador solar plano de alto rendimiento diseñado para instalaciones en las que se necesite el máximo ahorro con el mínimo número de captadores.

Diseñado en dos tipos de configuraciones: el auroTHERM VFK 145 V para instalación en posición vertical y el auroTHERM VFK 145 H para instalación en posición horizontal.

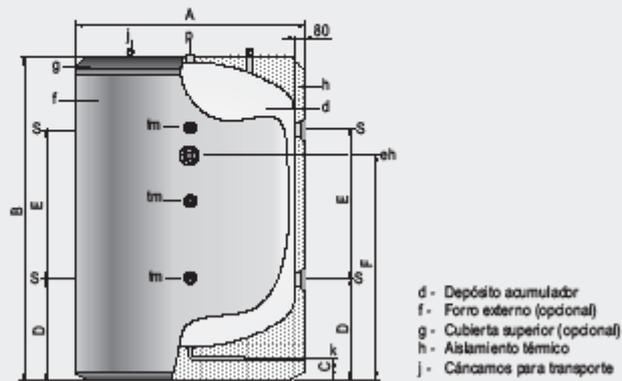
Modelo de captador auroTHERM	VFK 125	VFK 145 V	VFK 145 H
Referencia	00 000 4419	00 1050 4455	00 1000 4457
Descripción	Plano con cubierta. Estructura de serpiente de 4 tomas		
Posición	Vertical	Vertical	Horizontal
Contraseña de certificación	A consultar	NPS-23908	NPS-23808
Área bruta / Área de apertura		2,5 m ² / 2,352 m ²	19,5 L
Dimensiones (Largo / Ancho / Espesor)		1.213 mm / 2.033 mm / 80 mm	
Rendimiento óptico η_c	0,753	0,790	0,801
Coefficiente lineal de pérdidas térmicas a_1	3,936 w / (m ² K)	2,414 w / (m ² K)	3,320 w / (m ² K)
Coefficiente cuadrático de pérdidas térmicas a_2	0,017 w / (m ² K ²)	0,049 w / (m ² K ²)	0,023 w / (m ² K ²)
Temperatura de estancamiento T_c	117,3 °C	170,6 °C	170,6 °C
Cubierta	3,2 mm vidrio transparente de seguridad ($\tau = 89\%$)	3,2 mm vidrio solar de seguridad ($\tau = 91\%$)	
Material de la carcasa	Aluminio anodizado, marco oscuro		
Material del serpentín	Cobre soldado a la lámina absorbidora		
Material del absorbedor	Aluminio con recubrimiento altamente selectivo $\tau = 10\% / \alpha = 90\%$	Aluminio con recubrimiento altamente selectivo $\tau = 5\% / \alpha = 95\%$	
Aislamiento posterior	40 mm lana mineral: $\lambda = 0,035$ (w / m ² K) / $\mu = 55$ kg / m ³		
Caudal recomendado	25 L / (h m ²)		
Presión máxima de operación	10 bar		
Pérdida de carga*	117 mbar	117 mbar	100 mbar
Peso en vacío	38 kg		
Número de conexiones y diámetro	4 tomas x Ø ext 3/4"		

(*) Pérdida de carga medida en el captador para el caudal recomendado (45 L/h m² = 105,84 L/h) y usando el líquido solar Vaillant como fluido de trabajo (propilenglicol al 45%).
(*) En instalaciones solares con más de 10 m² se puede hacer funcionar a instalación a bajo caudal, condiciones de low flow (25 L/h m²)

Depósitos de inercia térmica, de 2000 a 5000 litros

laposa

Acumulación en circuito primario



Descripción

Para instalación en circuitos cerrados sin renovación de agua, son depósitos de gran capacidad para acumulación de energía solar o geotérmica, así como en circuitos frigoríficos. Fabricados en acero al carbono, con capacidades de 2000 a 5000 litros.

Aislados térmicamente con espuma rígida de poliuretano inyectada en molde, libre de CFC.

Características técnicas / Conexiones / Dimensiones		MV2000l	MV2500l	MV3000l	MV3500l	MV4000l	MV5000l
Capacidad depósito de inercia	l	2000	2500	3000	3500	4000	5000
Temperatura máx. depósito de inercia	°C	100	100	100	100	100	100
Presión máx. depósito de inercia (*)	bar	6	6	6	6	6	6
Peso en vacío aprox.	Kg	353	509	540	576	693	970
Cota A: diámetro exterior	mm	1360	1660	1660	1660	1910	1910
Cota B: longitud total	mm	2280	2015	2305	2580	2310	2710
Cota C:	mm	155	175	175	175	175	175
Cota D:	mm	720	835	835	835	900	900
Cota E:	mm	1060	590	880	1165	755	1160
Cota F:	mm	1537	1359	1652	1732	1543	1809
p: conexión superior	*GASH	2	2	2	2	2	2
a: conexión lateral	*GASH	4	4	4	4	4	4
k: conexión lateral	*GASH	1-1/4"	1-1/4"	1-1/4"	1-1/4"	1-1/4"	1-1/4"
eh: conexión lateral	*GASH	2	2	2	2	2	2
tm: conexión sensores laterales	*GASH	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2



CB60 / CBH60

Brazed Plate Heat Exchanger

General information

Alfa Laval introduced its first brazed plate heat exchanger (BHE) in 1977 and has since continuously developed and optimized its performance and reliability.

Brazing the stainless steel plates together eliminates the need for gaskets and thick frame plates. The brazing material seals and holds the plates together at the contact points ensuring optimal heat transfer efficiency and pressure resistance. The plate design guarantees the longest possible life.

The design options of the brazed heat exchanger are extensive. Different plate patterns are available for various duties and performance specifications. You can choose a standard configuration BHE, or a unit designed according to your own specific needs. The choice is entirely yours.

Typical applications

- HVAC heating/cooling
- Refrigerant applications
- Industrial cooling/heating
- Oil cooling

Working principles

The heating surface consists of thin corrugated metal plates stacked on top of each other. Channels are formed between the plates and corner ports are arranged so that the two media flow through alternate channels, usually in countercurrent flow for the most efficient heat transfer process.

Standard design

The plate pack is covered by cover plates. Connections are located in the front or rear cover plate. To improve the heat transfer design, the channel plates are corrugated.

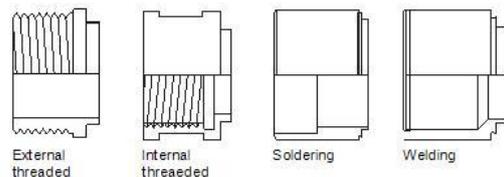
Particulars required for quotation

To enable Alfa Laval's representative to make a specific quotation, specify the following particulars in your enquiry:

- Required flow rates or heat load
- Temperature program
- Physical properties of liquids in question
- Desired working pressure
- Maximum permitted pressure drop

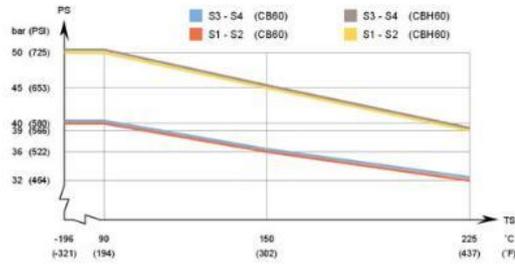


Examples of connections



* More connections are available on request.

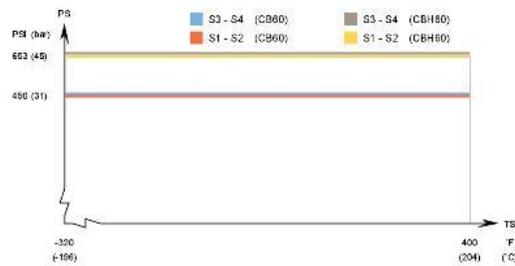
CB60 and CBH60 - PED approval pressure/temperature graph*



Standard data

Min. working temperature	see graph
Max. working temperature	see graph
Min. working pressure	vacuum
Max. working pressure	see graph
Volume per channel, litres (ga)	0.10 (0.027)
Max. particle size mm (inch)	1 (0.04)
Max. flowrate* m ³ /h (gpm)	14.5 (63.7)
Min. nbr of plates	4
Max. nbr of plates	150
* Water at 5 m/s (16.4 ft/s) (connection velocity)	

CB60 and CBH60 - UL approval pressure/temperature graph*



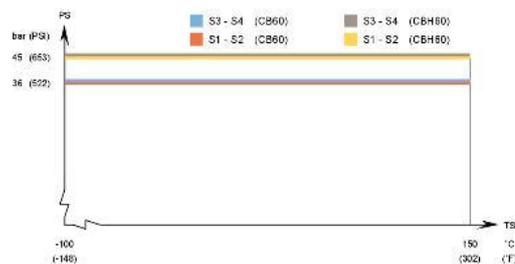
Standard materials

Cover plates	Stainless steel
Connections	Stainless steel
Plates	Stainless steel
Brazing filler	Copper

Standard dimensions and weight*

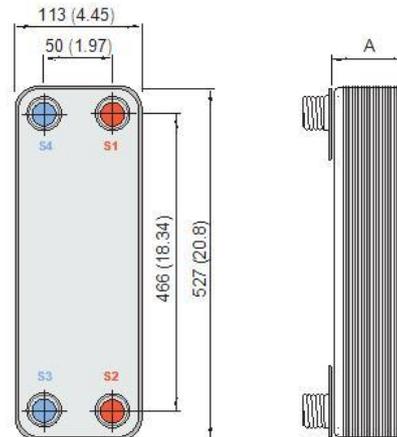
A measure mm	=	13 + (2.35 * n) (+/-1.5 %)
A measure inch	=	0.51 + (0.09 * n) (+/-1.5 %)
Weight** kg	=	2.1 + (0.18 * n)
Weight** lb	=	4.63 + (0.4 * n)
(n = number of plates)		
* Excluding connections		

CB60 / CBH60 - KHK and KRA approval pressure/temperature graph*



Standard dimensions

mm (inch)



For exact values please contact your local Alfa Laval representative

PCT00095EN 1203

Alfa Laval reserves the right to change specifications without prior notification.

How to contact Alfa Laval
 Up-to-date AlfaLaval contact details for all countries are always available on our website on www.alfalaval.com

1

Medianas y grandes

Logano SK645



Caldera de acero para quemadores presurizados gasóleo/gas

- Caldera baja temperatura según DIN/EN303.
- Caldera de acero monobloc.
- Bajas emisiones contaminantes, combinada con un quemador bajo en NOx (carga por unidad de volumen baja).
- Rendimiento: 93%
- Construcción compacta.
- Gran aislamiento térmico.
- La puerta central abre a la izquierda o a la derecha.

Condiciones de utilización:

- Presión máxima de servicio: 6 bares.
- Temperatura máxima de salida (seguridad): 120 °C.

Regulación:

- Cuadro de mando simple (temperatura constante).
- Regulación con modulación de temperatura.

Logano SK645

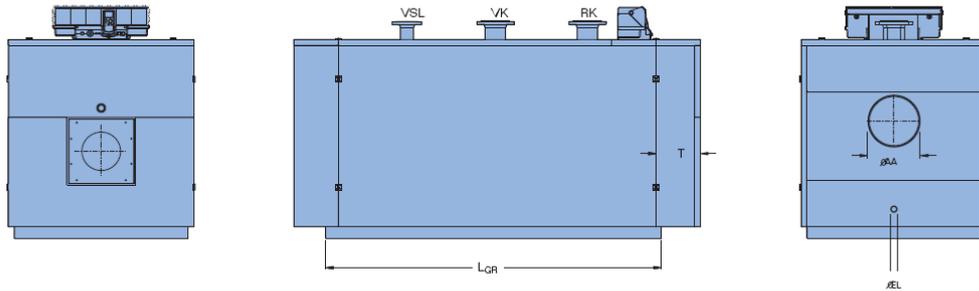
Caldera	Potencias [kW]	Tipos	Peso [kg]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Referencias	Precios []
Logano SK645	120	Caldera con cuadro simple 4212	447	1345	780	1110	7717500716	3.895
	190		554	1540	840	1170	7717500717	4.153
	250		642	1670	870	1200	7717500718	4.281
	300		691	1830	870	1200	7717500719	4.326
	360		817	1803	940	1270	7717500720	4.850
	420		899	2003	940	1270	7717500721	5.158
	500		1063	1933	1030	1360	7717500722	6.053
	600		1158	2183	1030	1360	7717500723	7.072

Se deben garantizar las condiciones de trabajo de la caldera y si es necesario montar módulo ZM427.

Caldera de acero para quemadores presurizados gasóleo/gas

Logano SK645

■ Datos técnicos SK645



■ Conexiones

AA = Conexión para gases de escape
 EL = Conexión de vaciado (Rp ¾)

RK = Conexión de retorno de la caldera
 VK = Conexión de impulsión de la caldera
 VSL = Conexión del dispositivo de seguridad

Tipos		120	190	250	300	360	420	500	600	
Potencia útil	▶ [kW]	85-120	130-190	200-250	234-300	280-360	315-420	375-500	477-600	
Potencia calorífica nominal	▶ [kW]	92-132	141-210	216-274	253-329	302-393	340-459	404-546	514-655	
Longitud total de la caldera L	▶ [mm]	1345	1540	1670	1830	1803	2003	1933	2183	
Longitud de la cámara de combustión L _{GR}	▶ [mm]	875	1070	1200	1360	1270	1470	1400	1650	
Diámetro de la cámara de combustión Ø	▶ [mm]	390	420	450	450	488	488	548	548	
Profundidad de la puerta del quemador T	▶ [mm]	215								
Peso neto	▶ [kg]	447	554	642	691	817	899	1063	1158	
Contenido de agua	▶ [l]	136	203	233	262	323	367	434	502	
Contenido de gas en la combustión	▶ [l]	129	183	238	268	304	350	420	495	
Temperatura de gas de escape	Carga 60%	160								
	Plena carga	210								
Gasóleo	Carga 60%	▶ [kg/s]	0,0316	0,0494	0,0646	0,0769	0,0934	0,1085	0,1277	0,1538
	Plena carga	▶ [kg/s]	0,0527	0,0824	0,1076	0,1282	0,1557	0,1809	0,2129	0,2564
Caudal máxico de gas de escape	Carga 60%	▶ [kg/s]	0,0314	0,0488	0,0650	0,0778	0,0929	0,1068	0,1301	0,1556
	Plena carga	▶ [kg/s]	0,0523	0,0813	0,1084	0,1297	0,1548	0,1780	0,2168	0,2593
Contenido en CO ₂	Gas	▶ [%]								
	Gasóleo	▶ [%]								
Tiro necesario	▶ [Pa]	0								
Resistencia lado gas de combustión	▶ [mbar]	0,8	1,60	2,20	2,70	3,30	3,90	4,70	5,48	
Máx. temp. de impulsión	▶ [°C]	120								
Máx. presión de trabajo	▶ [bar]	6								

CE 10151-07

Notas: - En los importes de las calderas no van incluidas las contrabridas.
 - Se incluye en el precio de la caldera la placa ciega del quemador.
 - Peso sin quemador, con embalaje unos 6-8% mayor. Montaje y puesta en marcha a consultar.
 - Límite de seguridad (limitador de temperatura de seguridad). Temperatura máxima de impulsión = límite de seguridad (STB)-18K