

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Diseño y dimensionado de una instalación de calefacción y ACS mediante energía solar térmica para una vivienda unifamiliar

Autor: Cristina Daimiel Borrallo

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

**Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Energía

Diseño y dimensionado de una instalación de calefacción y ACS mediante energía solar térmica para una vivienda unifamiliar

Autor:

Cristina Daimiel Borrallo

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

Profesor Contratado Doctor

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Carrera: Diseño y dimensionado de una instalación de calefacción y ACS mediante energía solar térmica para una vivienda unifamiliar

Autor: Cristina Daimiel Borrallo

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi tutor, familia y amigos

Agradecimientos

A la primera persona que tengo que agradecer este trabajo de fin de grado es a mi tutor Javier Pino, por haberme guiado y enseñado, y sin el cual no hubiera completado con éxito este trabajo.

A mis padres, por haberme apoyado en todo momento.

A mis compañeros de clase, por haber pasado tanto buenos como malos momentos con ellos.

El propósito de este proyecto es diseñar y analizar una instalación solar térmica, de baja temperatura, que satisfaga, en parte, la demanda de calefacción y agua caliente sanitaria de una vivienda unifamiliar situada en Sevilla.

Los objetivos perseguidos con este estudio son:

- Diseñar y dimensionar la instalación con todos sus componentes, teniendo en cuenta las previsiones de demanda de ACS y los estudios de cargas térmicas de calefacción del edificio
- Analizar el comportamiento de este tipo de instalaciones en diferentes épocas del año.
- Estudiar la viabilidad económica que tienen en la actualidad estos proyectos. Se optimizarán las dimensiones del campo bajo el criterio de maximizar la rentabilidad.
- Ver cuál es la influencia del área de captación y del volumen de acumulación en el parámetro de demanda cubierta.

1	Introducción	1
2	Descripción del sistema	3
2.1.	Descripción general del sistema	3
2.2.	Esquema de la instalación	4
2.3.	Descripción de los componentes de la instalación	8
2.3.1.	<i>Paneles solares térmicos</i>	8
2.3.2.	<i>Sistema de acumulación</i>	14
2.3.3.	<i>Sistema de intercambio</i>	17
2.3.4.	<i>Sistema de regulación y control</i>	20
2.3.5.	<i>Sistema de energía auxiliar</i>	21
2.3.6.	<i>Sistema de calefacción</i>	21
2.3.7.	<i>Tuberías</i>	22
3	Descripción de la herramienta de simulación	25
3.1.	Esquema de simulación	25
3.2.	Elementos del sistema de simulación	28
3.2.1.	<i>Año meteorológico tipo</i>	28
3.2.2.	<i>Demanda de calefacción y ACS</i>	30
3.2.3.	<i>Diverter</i>	37
3.2.4.	<i>Almacenamiento</i>	38
3.2.5.	<i>Bomba</i>	40
3.2.6.	<i>Sistema de captación</i>	41
3.2.7.	<i>Tee Piece</i>	43
3.2.8.	<i>Sistema auxiliar</i>	44
3.2.9.	<i>Cálculo de f</i>	46

4	Simulación y análisis de los resultados	47
4.1.	Datos de partida	47
4.2.	Introducción a las simulaciones realizadas	48
4.3.	Simulación con la demanda energética inicial	49
4.3.1.	<i>Simulación de 48 h</i>	49
4.3.2.	<i>Simulación del año completo</i>	53
4.3.2.1.	<i>Variando m² de captación</i>	53
4.3.2.2.	<i>Variando m³ de acumulación</i>	59
4.3.2.3.	<i>Variando ambas</i>	60
4.4.	Simulación con la demanda energética reducida	62
4.4.1.	<i>Simulación del año completo variando ambos parámetros</i>	62
4.4.2.	<i>Comparación entre simulación de demanda inicial y reducida</i>	65
4.5.	Simulación de distintos sistemas de calefacción	66
4.5.1.	<i>Simulación del año completo para un sistema de calefacción mediante fancoils</i>	67
4.5.2.	<i>Simulación del año completo para un sistema de calefacción mediante radiadores</i>	69
4.5.3.	<i>Comparación entre los 3 posibles sistemas de calefacción</i>	71
5.	Estudio económico	73
5.1.	Costes unitarios	73
5.2.	Coste de la instalación	74
5.3.	€/kWh de energía térmica con gas natural	75
5.4.	Amortización	76
5.4.1.	<i>Amortización de la instalación con demanda inicial</i>	76
5.4.2.	<i>Amortización de la instalación con demanda reducida</i>	77
5.4.3.	<i>Comparación</i>	78
5.5.	Dimensiones de la instalación elegidas para cada caso	79
5.6.	Amortización de la instalación a medida que aumenta el €/kWh con gas natural	80
6	Conclusiones	83
	Referencias	85
	Glosario	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Temperatura de trabajo de los sistemas de calefacción	22
Tabla 3.1. M_{acs} demandado según la temperatura de impulsión	32
Tabla 4.1. Variables de la instalación las primeras 24 h (1)	49
Tabla 4.2. Variables de la instalación las segundas 24 h (1)	50
Tabla 4.3. Variables de la instalación las primeras 24 h (2)	50
Tabla 4.4. Variables de la instalación las segundas 24 h (2)	51
Tabla 4.5. Variables de la instalación las primeras 24 h (3)	51
Tabla 4.6. Variables de la instalación las segundas 24 h (3)	52
Tabla 4.7. Factor de demanda cubierta para $2m^2$	53
Tabla 4.8. Factor de demanda cubierta para $4m^2$	54
Tabla 4.9. Factor de demanda cubierta para $6m^2$	54
Tabla 4.10. Factor de demanda cubierta para $8m^2$	55
Tabla 4.11. Factor de demanda cubierta para $>8 m^2$	56
Tabla 4.12. Factor de demanda cubierta para todas las áreas	56
Tabla 4.13. Porcentaje de mejora con respecto a f_2	57
Tabla 4.14. Porcentaje de mejora con respecto a f_4	57
Tabla 4.15. Porcentaje de mejora con respecto a f_6	58
Tabla 4.16. Porcentaje de mejora con respecto a f_8	58
Tabla 4.17. Factor de demanda cubierta para distintos volúmenes	59
Tabla 4.18. Demanda cubierta con $0.5 m^3$ y distintas áreas	60
Tabla 4.19. Demanda cubierta con $0.7 m^3$ y distintas áreas	60
Tabla 4.20. Demanda cubierta con $1 m^3$ y distintas áreas	61
Tabla 4.21. Demanda cubierta con $1.5 m^3$ y distintas áreas	61
Tabla 4.22. Configuraciones para una cobertura solar total	62
Tabla 4.23. Factor de demanda cubierta para $2m^2$ y distintos volúmenes de acumulación	63
Tabla 4.24. Factor de demanda cubierta para $4m^2$ y distintos volúmenes de acumulación	64
Tabla 4.25. Factor de demanda cubierta para $6m^2$ y distintos volúmenes de acumulación	64
Tabla 4.26. Factor de demanda cubierta para $8m^2$ y distintos volúmenes de acumulación	65
Tabla 4.27. Factor de demanda cubierta nueva V/S Factor de demanda cubierta original	65
Tabla 4.28. Factor de demanda cubierta ($2 m^2$) y sistema de calefacción mediante fan-coils	67
Tabla 4.29. Factor de demanda cubierta ($4 m^2$) y sistema de calefacción mediante fan-coils	67
Tabla 4.30. Factor de demanda cubierta ($6 m^2$) y sistema de calefacción mediante fan-coils	68
Tabla 4.31. Factor de demanda cubierta ($8 m^2$) y sistema de calefacción mediante fan-coils	68

Tabla 4.32. Factor de demanda cubierta (2 m ²) y sistema de calefacción mediante radiadores	69
Tabla 4.33. Factor de demanda cubierta (4 m ²) y sistema de calefacción mediante radiadores	69
Tabla 4.34. Factor de demanda cubierta (6 m ²) y sistema de calefacción mediante radiadores	70
Tabla 4.35. Factor de demanda cubierta (8 m ²) y sistema de calefacción mediante radiadores	70
Tabla 4.36. Comparación de f para 2 m ² de captación y distintos sistemas de calefacción	71
Tabla 4.37. Comparación de f para 4 m ² de captación y distintos sistemas de calefacción	71
Tabla 4.38. Comparación de f para 6 m ² de captación y distintos sistemas de calefacción	72
Tabla 4.39. Comparación de f para 8 m ² de captación y distintos sistemas de calefacción	72
Tabla 5.1. Costes unitarios de los equipos	73
Tabla 5.2. Resumen de los costes para distintos tamaños	74
Tabla 5.3. Factura de gas natural con la demanda original	75
Tabla 5.4. Factura de gas natural con la demanda reducida	75
Tabla 5.5. Resumen de costes, ahorro y amortización para distintos tamaños	76
Tabla 5.6. Costes y amortización de la instalación para distintas dimensiones	77
Tabla 5.7. Comparación de los años de amortización de ambas situaciones	78
Tabla 5.8. Fracción de demanda cubierta para 2 m ² y 0.7 m ³	79
Tabla 5.9. Fracción de demanda cubierta para 2 m ² y 0.5 m ³	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Incremento de las emisiones de CO ₂ en España desde 1990	1
Figura 2.1. Esquema de una vivienda con calefacción solar	3
Figura 2.2. Esquema de funcionamiento de la instalación	4
Figura 2.3. Circuito primario de la instalación	5
Figura 2.4. Circuito ACS de la instalación	6
Figura 2.5. Circuito de calefacción de la instalación	7
Figura 2.6. Flujos de calor en una placa solar	9
Figura 2.7. Influencia de la temperatura de entrada del fluido y del tipo de cubierta en el rendimiento	10
Figura 2.8. Funcionamiento de una placa solar térmica de aire	12
Figura 2.9. Captador solar plano de agua	13
Figura 2.10. Generación de un sistema solar térmico frente al consumo	14
Figura 2.11. Interior de un tanque de almacenamiento de ACS	16
Figura 2.12. Tipos de acumuladores en una instalación solar	17
Figura 2.13. Intercambiador tubular de serpentín	18
Figura 2.14. Intercambiador de placas	19
Figura 3.1. Modelo de simulación en Trnsys	25
Figura 3.2. Modelo del circuito de captación en Trnsys	26
Figura 3.3. Modelo para el cálculo de demandas en Trnsys	27
Figura 3.4. Perfil de radiación horario de Sevilla a lo largo de un año	28
Figura 3.5. Variables de salida del archivo Wheeler (1)	29
Figura 3.6. Variables de salida del archivo Wheeler (2)	29
Figura 3.7. Perfil de consumo diario de ACS	30
Figura 3.8. Consumo reglamentario de ACS según finalidad y ocupación	31
Figura 3.9. T ^a del agua de red	32
Figura 3.10. Perfil de demanda de ACS (kWh)	33
Figura 3.11. Perfil de demanda de calefacción (kWh)	34
Figura 3.12. Perfil diario de demanda de calefacción (1) (kWh)	34
Figura 3.13. Perfil diario de demanda de calefacción (2) (kWh)	35
Figura 3.14. Perfil de demanda energética total del sistema	36
Figura 3.15. Parámetros de entrada del Diverter	38
Figura 3.16. Variables de salida del Diverter	38
Figura 3.17. Parámetros que caracterizan el almacenamiento	39

Figura 3.18. Parámetros de entrada del tanque	39
Figura 3.19. Parámetros de caracterización de los paneles solares	41
Figura 3.20. Parámetros de entrada del sistema de captación	42
Figura 3.21. Variables de salida del sistema de captación	42
Figura 3.22. Perfil de radiación incidente (kWh/m ²)	43
Figura 3.23. Parámetros de entrada del Tee Piece	44
Figura 3.24. Variables de salida del Tee Piece	44
Figura 3.25. Parámetros de caracterización del sistema auxiliar	45
Figura 3.26. Parámetros de entrada del sistema auxiliar	45
Figura 4.1. Evolución de la f en función del area de captación	55
Figura 4.2. Perfil de demanda reducida	63
Figura 4.3. Factor de demanda cubierta nueva V/S factor de demanda cubierta original	66
Figura 5.1. Progresión del coste de la instalación para distintos tamaños	74
Figura 5.2. Amortización de la instalación (demanda inicial) para las distintas configuraciones	76
Figura 5.3. Amortización de la instalación (demanda reducida) para las distintas configuraciones	77
Figura 5.4. Amortización de la inst (8 m ² y 1 m ³) a medida que se incrementa el coste del gas	80
Figura 5.5. Amortización de la inst (6 m ² y 0.7 m ³) a medida que se incrementa el coste del gas natural	81

GEI	Gases de efecto invernadero
m_{calef}	Caudal demandado por la calefacción
m_{ACS}	Caudal demandado por agua caliente
m_{af}	Caudal de agua fría
ACS	Agua caliente sanitaria
T_{calef}	Temperatura demandada por la calefacción
T_{ACS}	Temperatura demandada por el agua caliente
T_{af}	Temperatura de agua fría
T_{retcalef}	Temperatura de retorno de la calefacción
T^a	Temperatura
T_m	Temperatura de mezcla
m_{total}	Caudal demandado total
f	Fracción de demanda cubierta

1 INTRODUCCIÓN

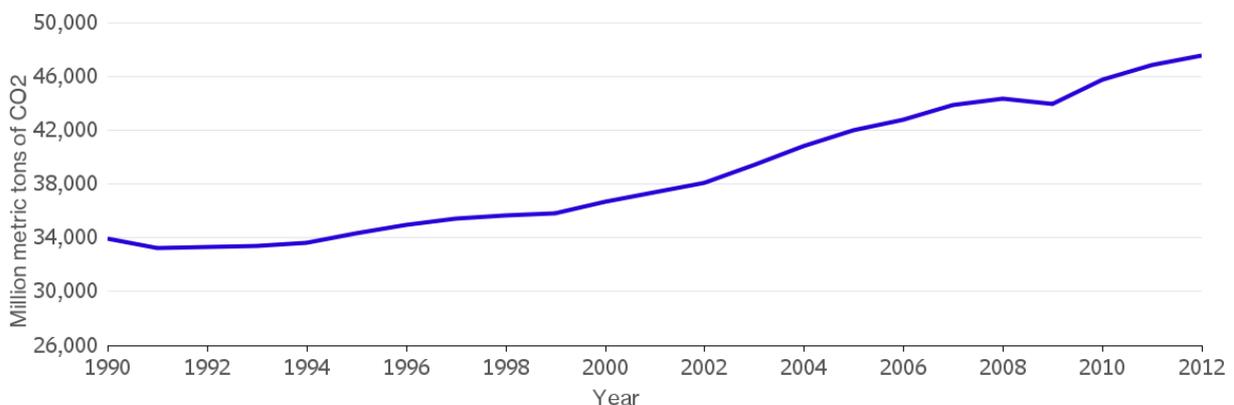
Desde la primera revolución industrial, la sociedad no ha parado de crecer y evolucionar, sobre todo en cuestiones tecnológicas. La base de la industrialización de los países ricos fue el uso masivo de combustibles fósiles, lo que llevó a que el incremento del consumo energético también creciera dramáticamente. Desde entonces, el consumo ha ido creciendo década tras década, lo que ha llevado a un uso desmesurado de los recursos con el fin de mantener el abastecimiento energético.

En las últimas décadas, se ha utilizado más carbón, más petróleo y más gas natural que nunca en la historia, ya que, desde hace mucho tiempo, los combustibles fósiles aportan el grueso de la energía utilizada por los humanos. Desgraciadamente, para recursos como el petróleo y el gas natural, es totalmente imposible que durante muchas décadas más se mantenga el ritmo actual de explotación y menos aún, que siga una senda creciente.

La dependencia con respecto al uso de combustibles fósiles ha generado dos tipos de preocupaciones: por un lado, los impactos ambientales asociados, sobre todo los relacionados con el cambio climático; por otro, la limitación de reservas y su futuro agotamiento.

Especialmente, desde 1990, ha dominado la preocupación por los impactos ambientales que produce la quema masiva de combustibles fósiles y, sobre todo, por sus efectos en el cambio climático. Con el fin de la reducción de estas emisiones, en 1997 se firmó el protocolo de Kioto, en el que se establecía una reducción del 20%, con respecto a las emisiones de 1990, de los gases de efecto invernadero para 2020. Sin embargo, no solo no se han reducido las emisiones lo suficiente, sino que, ha incrementado el porcentaje de GEI en la atmosfera. Por ejemplificarlo, en España, el aumento ha sido de un 18,7 % con respecto a 1990.

Global Greenhouse Gas Emissions Have Risen 40% Since 1990



Source: World Resources Institute (CAIT Climate Data Explorer)

Fig. 1. Incremento de las emisiones de CO₂ en España desde 1990

Otro aspecto importante es la disponibilidad de recursos. Hoy en día, hay una gran dependencia de los combustibles fósiles, y estos se encuentran localizados en muy pocos países, lo que genera, en ocasiones, problemas políticos. Por lo tanto, lo que se busca, es la independencia energética, sobre todo, aquellos países cuya disponibilidad de recursos no renovables es escasa.

Por estos motivos, se hace cada vez más acuciante la necesidad de enfocar el desarrollo tecnológico hacia fuentes menos contaminantes. Es claramente necesaria una fuerte apuesta por las energías renovables, que en gran medida reducirían las emisiones de gases nocivos al medio ambiente, así como la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. Esto cobra aún más interés en países como España, que tiene escasos recursos de combustibles fósiles, y, sin embargo, sí posee abundantes recursos energéticos renovables.

Una fuente de energía renovable abundante en España, es la energía solar. Se obtiene a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. Este hace llegar a la atmósfera terrestre 1637 W/m^2 , cantidad suficiente para abastecer la demanda energética de la población mundial, desgraciadamente no toda esta radiación llega a la superficie, ni toda se puede aprovechar. Dependiendo de la tecnología empleada, se aprovechará una u otra componente de la radiación solar. Tiene tres componentes: la radiación directa, es la que llega a un determinado lugar directamente del disco solar, la radiación difusa, procede de toda la bóveda celeste excepto del disco solar, y la radiación global que sería la suma de ambas. En el caso de la energía solar térmica, se aprovecha la radiación global, sin embargo, tanto en centrales solares de alta temperatura como en plantas fotovoltaicas solo se aprovecha la radiación directa.

Gracias al avance tecnológico y el abaratamiento de los costes, la energía solar se está convirtiendo en una gran fuente de ahorro, tanto de emisiones como de ahorro económico para las familias. Por esta razón, cada vez es más común ver en nuestro entorno colectores solares, placas fotovoltaicas, etc.

Lo que ocupa a este proyecto es la energía solar térmica de baja temperatura, que busca absorber la radiación solar y transmitirla a un fluido caloportador que, a través de una serie de etapas de intercambios energéticos, logrará calentar el agua de red, para suministrar agua caliente a la vivienda y, además, el agua o aire destinado a la calefacción de la misma. De esta manera, se lograría reducir el consumo de gas natural.

A lo largo de este proyecto, se buscará demostrar la eficiencia y efectividad de este tipo de instalaciones. Primero, se introducirá el modo en que opera una instalación solar capaz de satisfacer tanto la demanda de ACS como la de calefacción. Se detallarán todos los componentes que la conforman junto con una descripción detallada de su funcionamiento. Tras esto, se centrará el análisis en la herramienta de simulación que se ha usado (*Trnsys*) para simular el comportamiento. Describiremos como funciona el modelo que se ha elaborado para que simule esta instalación. Finalmente, se hará un análisis de comportamiento, según las dimensiones del sistema, lo que ayudará a elegir el diseño más óptimo.

2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El objetivo de este capítulo es describir el esquema general de funcionamiento de una instalación que suministra agua caliente sanitaria y calefacción simultáneamente, a una vivienda unifamiliar. Así mismo, se detallará el funcionamiento de cada componente de la instalación.

2.1. Descripción general del sistema

El objetivo de la instalación que se quiere diseñar es el de satisfacer la demanda de ACS y calefacción de una vivienda unifamiliar situada en Sevilla. Para ello, se verá que configuración siguen este tipo de sistemas y cuales son los componentes que lo conforman.

Por ser un sistema que, además de proporcionar agua caliente, satisface la demanda de calefacción, tiene unas peculiaridades que lo hace distinto a una instalación actual de placas solares térmicas.

Estas particularidades que lo hacen diferente, hacen que sea un sistema más complejo, ya que debe de tener un mayor número de tanques de almacenamiento, para separar ambas demandas, incorpora obligatoriamente un sistema de bombeo, no siendo posible un sistema con almacenamiento por termosifón, ya que se requiere que la eficiencia de captación sea máxima. Es un sistema que usa como fluido caloportador el agua. También se deben usar placas de mejor tecnología, como los captadores selectivos, si usamos un sistema de calefacción a media/alta temperatura.

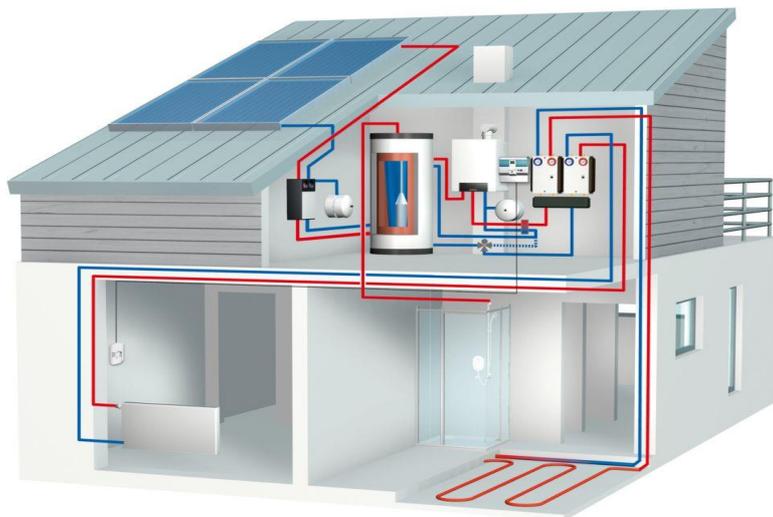


Fig. 2.1. Esquema de una vivienda con calefacción solar

Ref: energiasolarvalencia.es/calefaccion-solar

Circuito primario

El circuito solar primario o sistema de captación es el encargado de captar la radiación solar incidente mediante los paneles solares y transformarla en energía térmica, aumentando la temperatura de un fluido caloportador.

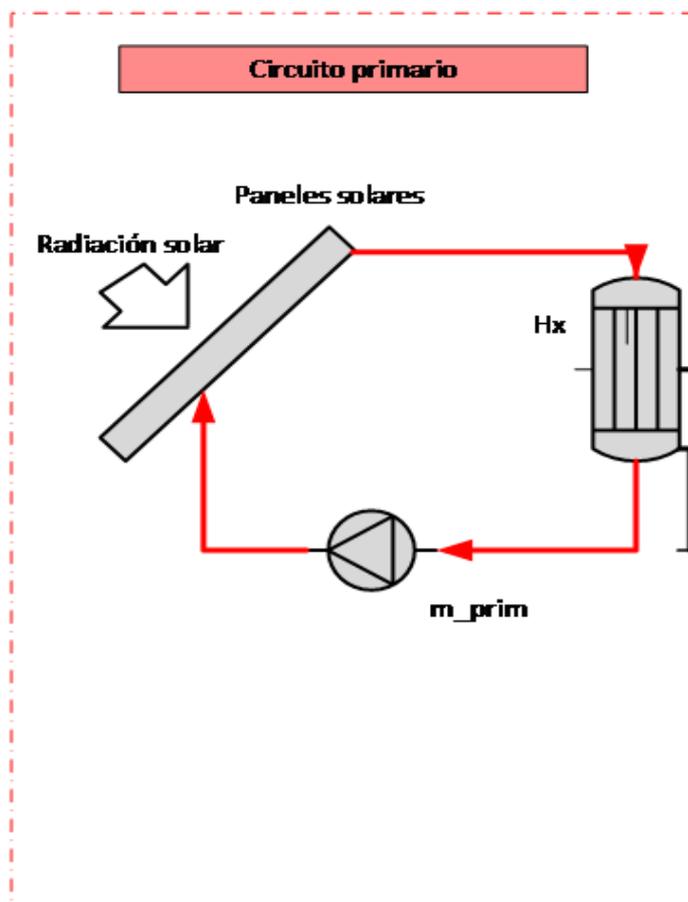


Fig. 2.3. Circuito primario de la instalación

De manera general, en estas instalaciones, el agua de red no pasa directamente por los colectores solares, sino que el fluido de trabajo que circula por los conductos es agua mezclada con líquido anticongelante. Esto es así ya que en zonas donde, al menos en algún momento del año, se experimenten temperaturas bajas (por debajo de 0°C), el agua se podría congelar y provocaría obstrucción e incluso rotura de los conductos, lo que conllevaría grandes daños en la instalación. Y aunque el clima no sea frío, por las noches suele haber un notable descenso de las temperaturas, que, de la misma manera, podría provocar la congelación del agua.

Este es el principal motivo por el cual, la mayoría de las instalaciones solares térmicas actuales cuentan con un circuito primario.

Otro motivo, es el de proteger a los colectores de las impurezas que pueda traer el agua de red. Se hace especialmente, cuando se trata de aguas duras, con gran cantidad de sales disueltas, que precipitarían allí donde se calienta el agua (precisamente en los serpentines de los colectores), formando una capa aislante térmica que reduciría el rendimiento y obstruiría los conductos.

Centrando el estudio en el funcionamiento de este subsistema se puede decir que, la circulación del fluido a través de los conductos podrá ser natural o forzada. En la circulación natural (o sistema termosifónico) el depósito tiene que situarse por encima de los colectores para permitir la convección por diferencia de temperaturas, por lo que se en el techo. Esto limita el volumen de acumulación por cuestiones de soporte estructural y disminuye el rendimiento de la instalación solar.

Por eso, en nuestro sistema vamos a utilizar la circulación forzada. De esta manera se situará el acumulador donde mejor nos convenga y no se limitará su volumen, además de tener mayor control sobre el comportamiento de la instalación. Como valor añadido, el rendimiento de los captadores será mayor. El único inconveniente es que la bomba consume electricidad y es un sistema más complejo, ya que requiere de control y regulación, pero como en este sistema se requiere una importante cantidad de energía térmica, será necesario que lo tengamos funcionando entorno al mayor rendimiento posible.

Por último, se va a describir como se transmite la energía, ganada por el fluido en los captadores, al agua de consumo. Se hace a través de un intercambiador, estos suelen tener forma de serpentín, ya que así consiguen aumentar la superficie de contacto y de esta manera, su eficiencia. Dicho serpentín está dentro del propio tanque de almacenamiento. Este es el modo en que se conecta el circuito primario a los otros dos sistemas.

Circuito ACS

El circuito de ACS es el encargado de precalentar el agua que proviene de la red, para su posterior consumo como agua caliente sanitaria. Usa para ello, el calor almacenado en el tanque de almacenamiento general.

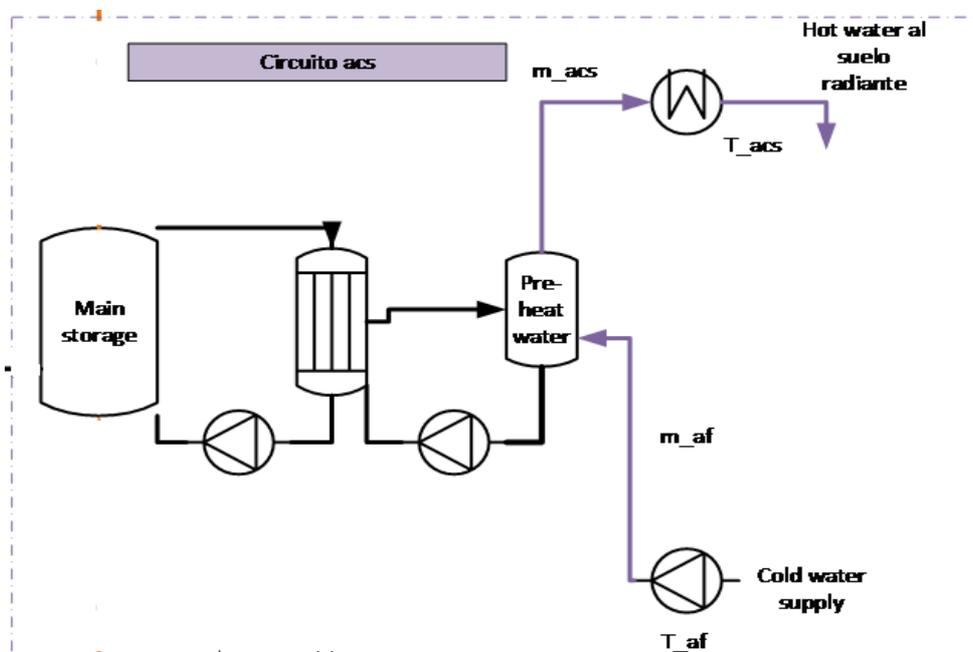


Fig. 2.4. Circuito de ACS de la instalación

El agua del tanque general, se calienta, como hemos dicho anteriormente, gracias a un serpentín situado en su interior, que transporta el fluido calentado en los paneles solares. De esta manera, a medida que la radiación incide, la temperatura media del tanque se va incrementando.

En este circuito, hay otro tanque de almacenamiento, que es el tanque de pre-calentado del agua de consumo. El agua de este tanque se calienta gracias a un intercambiador de serpentín del mismo modo que en el tanque general.

Desde la red, se bombea un caudal m_{acs} , que será el demandado. Según la T_{acs} demandada, una válvula de 3 vías regula que parte del caudal pasa por el tanque de pre-calentamiento y que proporción va directamente al punto de consumo. El control de esta válvula es por temperatura, tiene como señal de entrada la temperatura del tanque de pre-calentamiento. Según esta temperatura, se regula si el caudal que tiene que pasar por el tanque será mayor o menor. Por ejemplo, si el tanque de pre-calentamiento tiene una temperatura superior a la demanda en el consumo, habrá un porcentaje del caudal que pase por el tanque y otra parte que vaya, directamente y a temperatura de agua de red, al consumo, para que en la mezcla final se obtenga la temperatura deseada.

Si el agua del tanque de precalentamiento no tiene la temperatura suficiente que se pide en el punto de la demanda, contamos con el apoyo del sistema auxiliar. Este sistema es una caldera de gas natural convencional que nos aportará la energía necesaria para alcanzar la temperatura de consumo.

Circuito de calefacción

Por último, está el circuito de calefacción. Será el encargado de calentar, mediante el calor almacenado en el tanque general, el agua de retorno del sistema de calefacción.

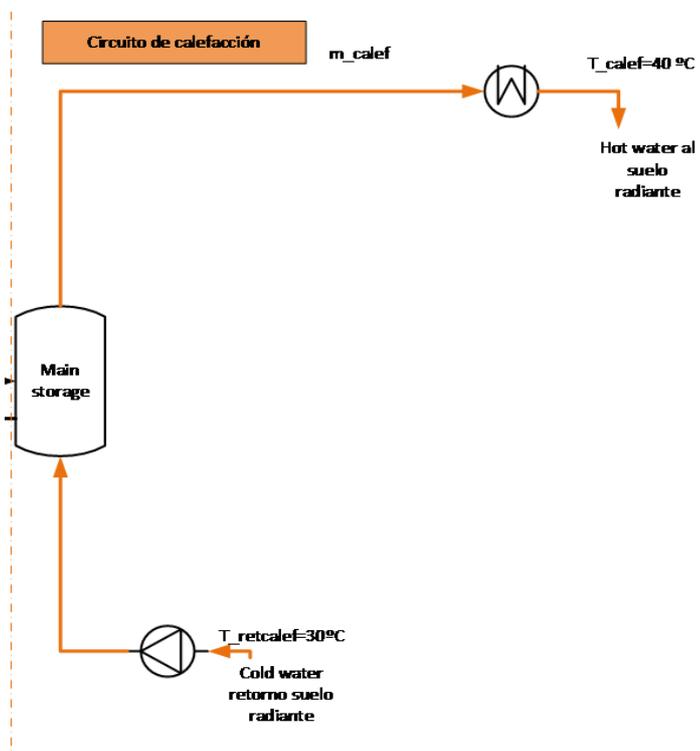


Fig. 2.5. Circuito de calefacción de la instalación

El sistema de calefacción mostrado en este esquema de principios es el suelo radiante. Se hace así debido a que es el más óptimo para este tipo de instalaciones.

El funcionamiento de este subsistema es el siguiente: el agua de retorno del suelo radiante es bombeada hacia la parte inferior del tanque de almacenamiento general, mientras que, de la parte superior, que estará a mayor temperatura, se bombeará, el caudal de impulsión, a la instalación de calefacción, formando un circuito cerrado.

Al igual que para el agua caliente sanitaria, si la temperatura del agua que hay en el tanque no está a la suficiente temperatura, se calienta, gracias al sistema auxiliar, hasta alcanzarla.

Las temperaturas de impulsión y retorno del sistema de calefacción vendrán determinadas por la unidad terminal elegida.

2.3. Descripción de los componentes de la instalación

2.3.1. Paneles solares térmicos

Los sistemas térmicos de energía solar se clasifican en dos tipos, activos y pasivos. Los sistemas pasivos son aquellos que usan la arquitectura del edificio para captar y acumular las ganancias directas que provienen del sol. Mientras que los sistemas activos, que son el objeto de estudio en este trabajo, son los artefactos mecánicos que complementan la construcción bioclimática y permiten captar las energías del entorno con un mayor aprovechamiento y un mínimo consumo energético. En la captación de la energía solar se utilizan paneles solares, que constan de una “*placa captadora*” que, gracias a su geometría y a las características de su superficie, absorbe energía solar y la convierte en calor. Esta energía es enviada a un fluido caloportador, como el aire, el agua, u otros, que circula dentro del colector mismo o tubo térmico.

Las principales características de un captador solar plano son:

La selectividad: Los colectores solares de placa selectiva han sido tratados electro-químicamente, con la finalidad de que tengan una superficie con alto coeficiente de absorción y bajo coeficiente de reflexión hasta una temperatura de 250°C. El tratamiento electro-químico consiste generalmente en una capa de cromo negro sobre níquel, ambos sobre la placa captadora (generalmente de cobre-cobre, de cobre-aluminio o de acero). Este tratamiento permite aumentar notablemente las prestaciones del colector solar, hace que tenga gran absorptividad para distintas longitudes de onda. Esto es de gran importancia en zonas donde la radiación es menor o para aplicaciones con gran requerimiento energético en invierno, cuando la longitud de onda es corta. Ya que los captadores de superficie negra ven muy afectado su rendimiento en estas circunstancias.

La eficiencia: la característica principal que identifica la calidad de un colector solar es su eficiencia, entendida como capacidad de conversión de la energía solar incidente en energía térmica. Se define este parámetro ya que, toda la energía que incide sobre el colector solar no puede ser considerada como energía útil, de manera que al mismo tiempo que se produce el calentamiento del fluido de trabajo, una parte de esta energía se pierde con conducción, convección y radiación, generándose un balance energético entre la energía incidente y las pérdidas térmicas, obteniendo o resultado una potencia útil del colector solar.

Estas pérdidas aumentan mientras mayor sea la temperatura del fluido de trabajo:

$$(1) Q_{convección} = hA_{superf}(T_{superf} - T_{inf})$$

$$(2) Q_{conducción} = kA_{superf}\Delta T$$

$$(3) Q_{radiación} = \sigma A_{superf}(T_{superf}^4 - T_{aire}^4)$$

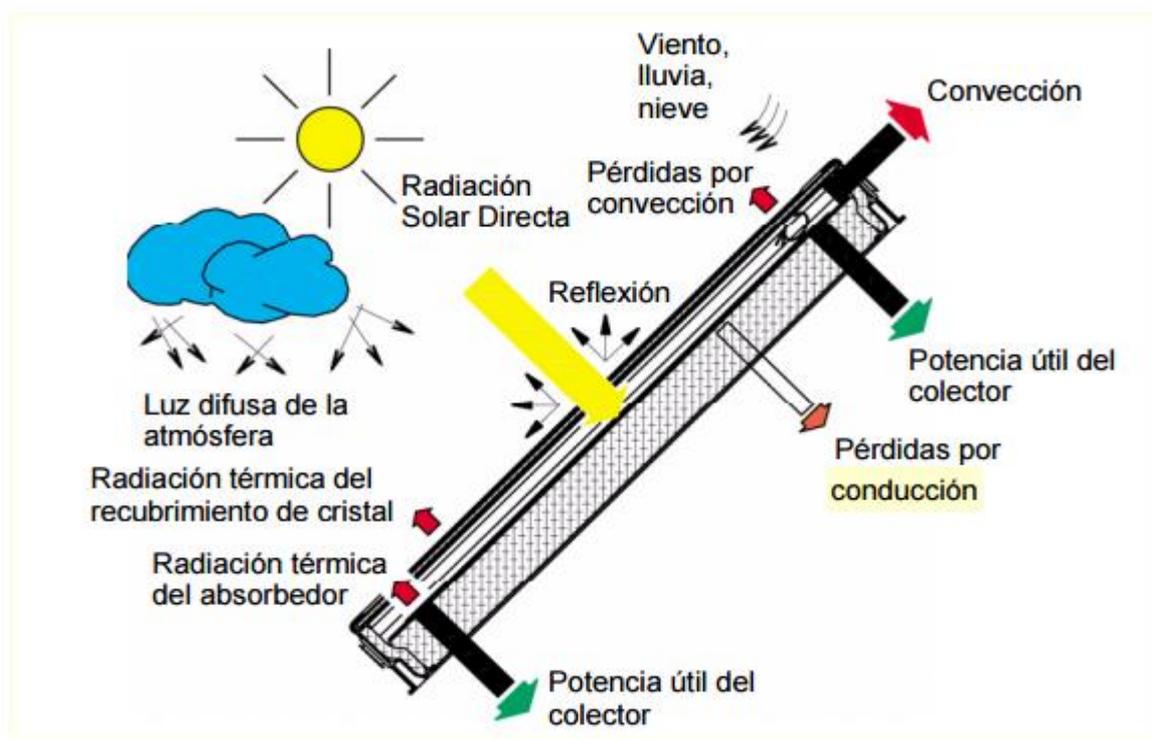


Fig. 2.6. Flujos de calor en una placa solar

Ref: erenovablesarqbioclimatica.blogspot.com

Se observa, que es interesante hacer trabajar al colector a la menor temperatura posible, siempre que sea suficiente para la utilización específica en cada caso. Este es uno de los motivos por el cual, un sistema de calefacción basado en suelo radiante, es el más ventajoso para una instalación solar.

Parámetros que influyen en la eficiencia o rendimiento del captador son los siguientes:

- Inclinación y orientación del captador
- Temperatura de entrada al colector (mientras más alta sea dicha temperatura peor será el rendimiento)
- Nivel de aislamiento del captador para que no haya pérdidas por convección
- La absorptividad y transmitancia de la superficie ($\tau\alpha$)

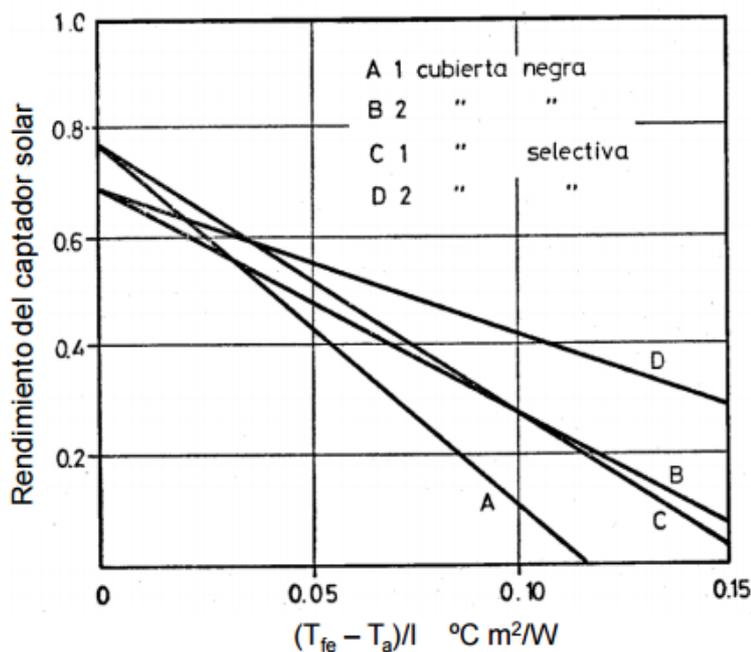


Fig. 2.7. Influencia de la temperatura de entrada del fluido y del tipo de cubierta en el rendimiento

Ref: Apuntes energía solar en la edificación/Departamento Ingeniería Energética/ETSI

Es importante saber los distintos tipos de captadores que hay en el mercado, para así, elegir el que más convenga a la instalación.

Los captadores se pueden clasificar atendiendo a varios criterios.

Dependiendo de la aplicación

Fundamentalmente existen tres tipos de colectores solares: planos, de vacío y de concentración.

Los colectores solares planos son el tipo más común actualmente. Los colectores planos con cubierta están compuestos esencialmente por una cubierta de vidrio, una placa captadora aislada térmicamente en la parte inferior y están lateralmente contenidos en una caja de metal o plástico. Mientras que los colectores planos sin cubierta son, normalmente, de material plástico y están directamente expuestos a la radiación solar. La utilización de estos últimos se limita al

calentamiento del agua de las piscinas, ya que no se requiere una gran eficiencia y prima el criterio del coste.

Los colectores solares de vacío están proyectados para reducir las dispersiones de calor hacia el exterior. El calor captado por cada elemento (tubo de vacío) es transferido a la placa, generalmente de cobre, que está dentro del tubo. De esta manera, el líquido portador del calor se calienta y, gracias al vacío, se reduce al mínimo la dispersión de calor hacia el exterior. En su interior, la presión del aire es muy reducida, de forma que impide la cesión de calor por conducción. En la fase de montaje, el aire entre el absorbedor y el vidrio de la cubierta es aspirado y hay que asegurar una hermeticidad perfecta y perdurable en el tiempo.

Y los colectores solares de concentración son colectores cóncavos proyectados para optimizar la concentración de la energía solar en un punto bien determinado. Son eficaces sólo con radiación solar directa, ya que tienen que seguir el movimiento del sol. Este modelo de colector, que puede alcanzar altas temperaturas, es una elección lógica para generadores solares o para hornos de altísimas temperaturas (más de 4.000°C). El coste y la realización del equipo de seguimiento del sol y su construcción determina que sea poco práctico, además de no ser compatible con las temperaturas que se necesitan para el ACS y la calefacción.

En función del fluido caloportador usado

- Captadores de aire
- Captadores de agua

Teniendo en cuenta que en nuestro proyecto los captadores tienen que suplir tanto una carga de demanda de agua caliente sanitaria, como de calefacción vamos a ver cuales son los pros y contras de ambos tipos de tecnologías y evaluar cuál será la más conveniente para nuestra instalación.

Empezando por los captadores de aire, hay que decir que presentan determinadas ventajas con respecto a los de agua para las instalaciones de calefacción por energía solar. Por un lado, es inmune al congelamiento y a la ebullición por lo que se hacen innecesarios determinados dispositivos y estrategias que se adoptan en las instalaciones de agua para evitar sus nocivos efectos. Además, al trabajar en circuito abierto con la atmósfera, no existen problemas de fugas.

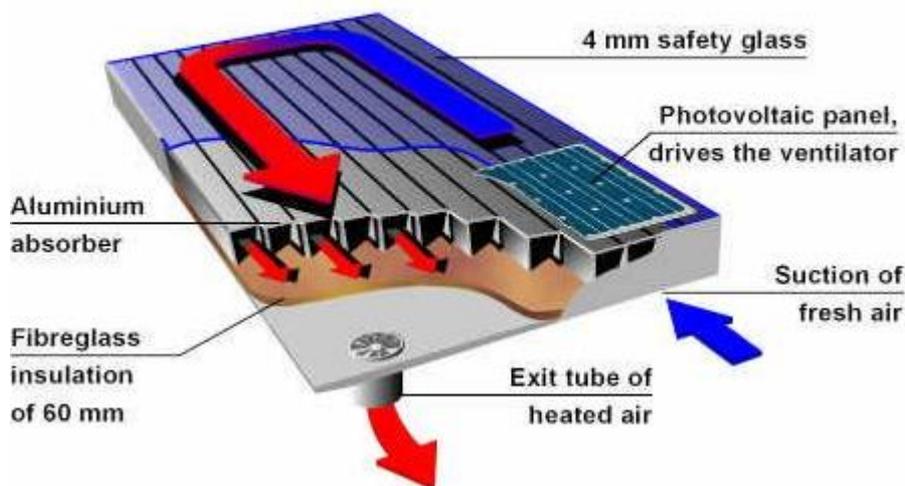


Fig. 2.8. Funcionamiento de una placa solar térmica de aire

Ref: almuniasolar.com/aire-caliente-solar/

Por otro lado, son más sencillos y simples que los de agua. Si la finalidad última de la calefacción es calentar el aire, resulta mucho más sencillo que el fluido que se hace pasar por los colectores solares sea directamente el aire que se quiera calentar por lo que sólo se hace necesario los colectores, los conductos y un aerocirculador.

Las instalaciones de calefacción por agua requieren en cambio de otros muchos elementos. Dado que la instalación está expuesta a sufrir de bajas temperaturas nocturnas, se hará necesario un circuito primario con agua y anticongelante que evite la congelación en los colectores y la ruina de éstos. Al tener un elemento tóxico como es el anticongelante se hace necesario instalar un circuito secundario, con su respectivo intercambiador de calor, que comunique con el depósito acumulador de agua. Las instalaciones de calefacción solar por agua caliente sólo son efectivas en combinación con suelo radiante, con lo que se requiere una instalación compleja que ha de ser tenida en cuenta en el momento de la construcción del edificio. En cambio, las instalaciones de calefacción por aire son posibles de realizar en edificios ya construidos.

Sin embargo, este tipo de captadores no es la tecnología asentada actualmente, ya que la aplicación actual de los captadores solares planos es la de producción de agua caliente sanitaria y para ello es más eficiente que el fluido caloportador sea agua directamente. Aparte de esto, el agua es más interesante como fluido de trabajo debido a que su calor específico es mayor ($C_{p\text{agua}}=4,18 \text{ kJ/kgK}$ frente a $C_{p\text{aire}}=1,1 \text{ KJ/kgK}$) es casi 4 veces más, por lo tanto, de aire habría que mover 4 veces más caudal, lo que conlleva un mayor consumo eléctrico de las bombas.

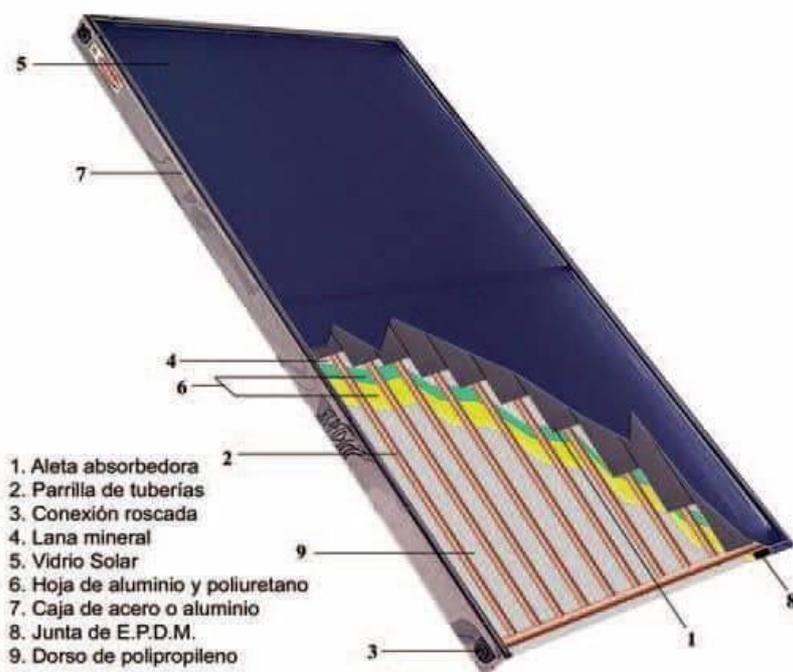


Fig 2.9. Captador solar plano de agua

Ref: deltavolt.pe/colector_plano

Estos captadores están compuestos por: un vidrio solar, que es lo que se ve superficialmente, es un vidrio negro que aumenta la absorción y reduce las pérdidas por convección. Tras este, se encuentra la capa absorbedora, que es la que toma la radiación solar y la transmite a la parrilla de tuberías que son las que transportan el agua a calentar. El resto de componentes son los aislantes, para reducir pérdidas por conducción, los cerramientos y la caja de acero que encapsula al resto de componentes.

Se usarán, por lo tanto, captadores solares planos de agua. Otro motivo de su elección es que existen ensayos estandarizados mediante los cuales podemos evaluar su eficiencia.

Como conclusión, en primera instancia, se elegirá un captador solar plano de agua con cubierta y superficie de captación negra, ya que, para un sistema de suelo radiante, que no requiere altas temperaturas, sería suficiente este tipo de captador y sería el más económico. Sin embargo, se puede decir, que el captador elegido finalmente se hará en función de los parámetros de operación. Por ejemplo, si nuestro sistema de calefacción es de fan-coils o radiadores se elegirán superficies selectivas debido a que tienen una mayor eficiencia en la conversión y funcionan mejor para longitudes de ondas pequeñas que son las que se dan en invierno. Con este tipo de captadores conseguiríamos un salto de temperaturas mayor y podríamos satisfacer la temperatura demandada por este tipo de calefacciones que son entre 50-60 °C.

2.3.2. Sistema de acumulación

El sol es una fuente de energía que no podemos controlar. Puede que no llegue en el preciso momento en el que se necesita. En contraposición a esta energía producida, está el perfil de consumo, que variará según el uso o finalidad de la instalación. Por ejemplo, en nuestro caso, el mayor consumo de ACS se da por la mañana, antes de que comience a incidir la radiación, y el consumo de calefacción mayoritario se da por la noche cuando tampoco hay radiación.

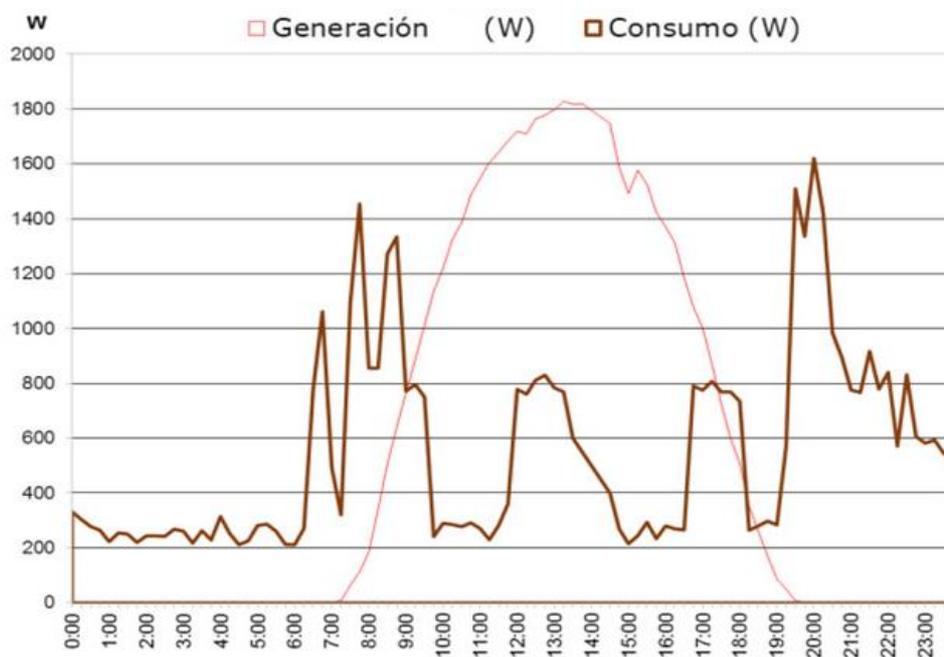


Fig. 2.10. Generación de un sistema solar térmico frente al consumo
Ref: smartgridsinfo.es/comunicaciones/ii-congreso-sg-autoproduccion-de-energia-electrica

Por eso, en una instalación de energía solar térmica, la acumulación de energía es necesaria debido al desfase que existe entre la radiación solar y el consumo.

En definitiva, la función de sistema de acumulación es, independizar en la medida de lo posible, el circuito de captación solar (oferta), con el circuito de consumo (demanda). Almacenar la energía solar captada para poder suministrarla posteriormente cuando existe demanda.

Poner un sistema de acumulación en una instalación de energía solar da lugar a que se pueda satisfacer una determinada fracción de la demanda con diferentes tamaños de la instalación (superficie de captación y volumen de acumulación). El tamaño de la instalación, por lo tanto, no es único, y se establece después de llevar a cabo un proceso de optimización, que se hará en este trabajo.

En resumen, el volumen de acumulación dependerá de:

- Nivel de cobertura con energía solar que quiera dar a nuestra demanda
- Perfil de consumo de la instalación. Mientras más heterogéneo sea, mayor volumen hará falta.

Que el volumen de acumulación sea el adecuado es de gran importancia, ya que en parte de este volumen va a depender el rendimiento global del sistema de captación. Se hará, por lo tanto, un análisis de sensibilidad, viendo cuál es el efecto del volumen en el rendimiento.

Otro factor de gran influencia será la estratificación térmica de la acumulación., a mayor estratificación, mayor será el rendimiento. La estratificación térmica hace que sea, la temperatura de entrada al colector, lo más baja posible.

Los requisitos que debe de tener un buen sistema de acumulación son los siguientes:

- Calor específico elevado en el medio de acumulación. Mientras mayor sea menos volumen hará falta para acumular la misma cantidad de calor
- Pérdidas térmicas bajas. Necesitamos que el tanque tenga un buen nivel de aislamiento
- Buena estratificación de temperaturas
- Una vida útil similar a la del sistema de captación, junto con un bajo coste y un medio de acumulación fácil de conseguir
- Capacidad de soportar las condiciones de trabajo de presión y temperatura.

El medio de acumulación se suele elegir según el fluido caloportador que circule por los captadores solares. En el caso de que circulará aire, la acumulación se haría en un lecho de rocas, sin embargo, como en nuestro caso, estamos usando agua con anticongelante, el medio de acumulación que usaremos será agua. Es el fluido más común cuando se trata de producción de agua caliente sanitaria.

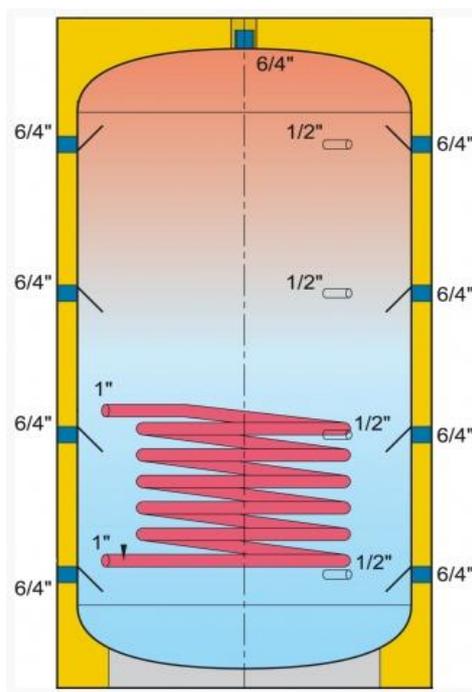


Fig. 2.11. Interior de tanque de almacenamiento de ACS

Ref: *sonnenkraftheizung*

Dentro de los depósitos de acumulación usados en solar térmica tenemos distintos tipos:

Acumulador solar de ACS: Es resistente a la corrosión debido a la presencia de oxígeno y la presión de trabajo es igual a la presión de red. Es el depósito en el que entra el agua que proviene de la red, y se calienta mediante un intercambiador interno en forma de serpentín. El agua caliente que pasa por el serpentín proviene del acumulador de inercia.

Acumulador de inercia: Es un acumulador térmico en el que puede almacenarse provisionalmente la energía procedente de los captadores y suministrarse al sistema de calefacción cuando fuera necesario. Es independiente al circuito de ACS. Trabaja en un circuito cerrado, por lo que es menos exigente la protección frente a la corrosión y la presión de trabajo es independiente a la presión del agua de red.

Acumulador del sistema convencional: Es un pequeño acumulador situado al final del circuito tanto de ACS como de calefacción. Aquí el agua se calienta gracias al sistema auxiliar, llevándola hasta la temperatura demandada.

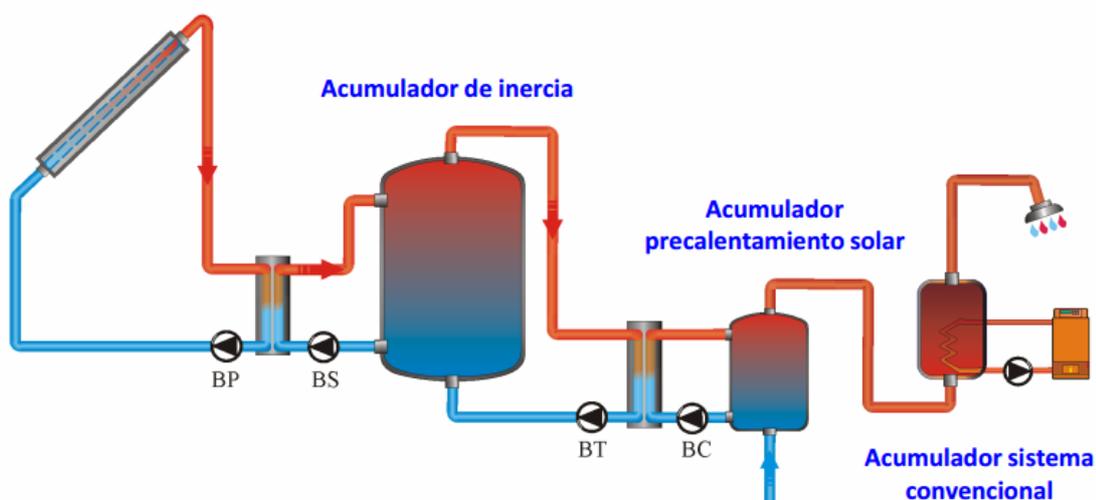


Fig. 2.12. Tipos de acumuladores en una instalación solar

Ref: Apuntes energía solar en la edificación/Departamento Ingeniería Energética/ETSI

En este caso se tendrá, el almacenamiento principal, que sería un tanque de inercia, para poder aprovechar en todo momento el aporte solar y acumularlo. Con este acumulador se satisface la demanda de calefacción. El retorno de la calefacción se hace a la parte baja del tanque de inercia, ya que este puede estar a una temperatura mayor que la de retorno, y entonces esta corriente vendría bien para la refrigeración del tanque y con ello el aumento de eficiencia de los captadores.

También se tendrá un tanque de precalentamiento solar del ACS. Esto nos servirá para precalentar el agua que viene de la red y que así el aporte de energía del sistema convencional sea menor.

2.3.3 Sistema de intercambio

La mayoría de los sistemas solares térmicos son de circuito indirecto. Por lo que existe un sistema de intercambio que realiza la transferencia de energía térmica captada desde el circuito de captadores, o circuito primario, al circuito secundario donde se encuentra el agua caliente que se consume.

Que haya dos sistemas es de obligado cumplimiento en algunas zonas que tienen riesgo de heladas o que el agua de red se le considere un agua dura, que pueda ser corrosiva para los conductos de los paneles.

Las características que debe de tener un intercambiador son:

- La presión que soporta compatible con la presión de trabajo
- Temperatura admisible compatible con la temperatura de trabajo
- Facil limpieza
- Compactos, pero con gran superficie de transferencia
- Materiales resistentes a la corrosión

Atendiendo a estas características elegiremos el intercambiador más adecuado para nuestra instalación.

Tipos de intercambiadores:

Intercambiadores tubulares: Constan de un haz tubular por el interior del cual discurre el agua caliente primaria, colocado en el interior de una carcasa cilíndrica (el acumulador), por la que circula el agua a calentar (secundario ACS).

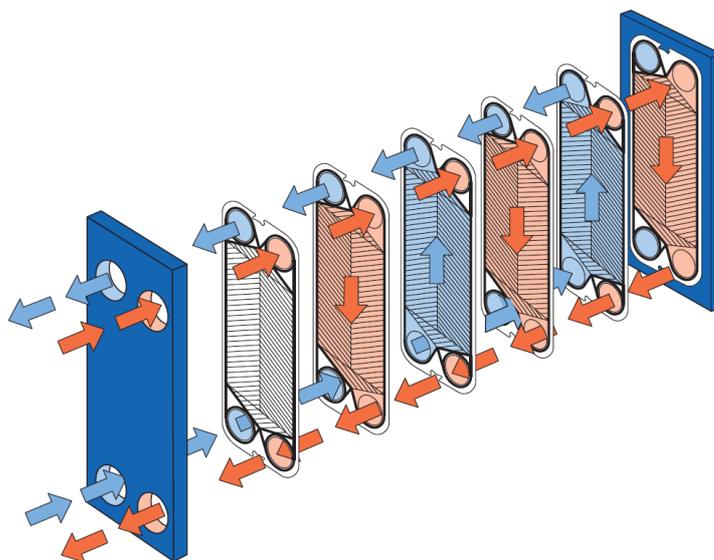


Fig. 2.13. Intercambiador tubular de serpentín

Ref: tiendainvia

Habitualmente el haz tubular, o serpentín, se coloca en el interior de un depósito de acumulación, formando los denominados interacumuladores. Considerando que el material no debe afectar a las características de potabilidad del agua, estos intercambiadores por lo general son de acero inoxidable. Presentan ventajas como que aguantas elevadas presiones y temperaturas, son muy compactos y al tener forma de serpetín aumentan su superficie de transferencia. Fácil limpieza y bajo coste de mantenimiento.

Intercambiadores de placas: La placa representa la superficie de intercambio térmico y es la esencia de este tipo de intercambiadores. El diseño de corrugación de las placas determina sus características de transmisión de calor; cuando el intercambiador se cierra se crean los canales a través de los cuales circulan los fluidos primario y secundario. Los fluidos son conducidos a través del intercambiador mediante las juntas. Cada placa posee una junta principal que rodea la periferia y dos juntas anulares que rodean los orificios de entrada y conducen alternativamente a los fluidos primario y secundario hacia las dos caras de la placa.



Principio de funcionamiento de un intercambiador de placas

Fig. 2.14. Intercambiador de placas

Ref: areamecanica/intercambiador-de-placas/

Sus ventajas son que tienen una gran superficie de transferencia, y son fácilmente desmontables para su limpieza, sin embargo, no aguantan elevadas presiones ni temperaturas.

Analizando ambos tipos de intercambiadores, en nuestra instalación, el intercambiador que vamos a usar entre el circuito primario y el acumulador de inercia tendrá forma de serpentín, para que así, se aumente el área de transferencia y con ello la eficiencia. Se situará dentro del acumulador, como podemos ver en el dibujo anterior. También habrá otro intercambiador con la misma forma, entre el sistema de acumulación de inercia y el tanque de precalentamiento de agua caliente sanitaria. El elegido es el tubular y no el de placas debido al coste y, sobre todo, porque soporta grandes niveles de presión.

2.3.4 Sistema de regulación y control

Es el encargado de asegurar el correcto funcionamiento de la instalación solar. Las estrategias de regulación y control no son complejas, de manera que suelen consistir en el de marcha - paro de una bomba en función de un diferencial de temperatura establecido en la regulación y en el de control de la temperatura de un acumulador (termostato de seguridad o máxima). En instalaciones complejas, mediante el sistema de regulación y control podemos realizar múltiples operaciones mejorando el rendimiento de éstas.

Como sistema de regulación tenemos válvulas que son las que se encargan de abrir/cerrar el conducto para que pase un determinado caudal pase o no por cada uno de ellos. Actúan con el fin de que, en el punto final de consumo, se obtenga el caudal deseado a la temperatura requerida.

Existen dos tipos de válvulas de regulación:

Válvulas monitorizadas: Son válvulas de tres vías (acumulación, agua fría, distribución de ACS) que actúan mediante servomotores proporcionales comandados por reguladores que reciben las señales de las sondas de temperatura. Considerando las variaciones tan importantes que se producen en las demandas de ACS, deben ser de respuesta muy rápida.

Válvulas termoestáticas: Funcionan directamente mediante un elemento sensible a la temperatura que las posiciona de manera continua. Existen dos tipos, las diseñadas para colocar a la salida de los depósitos de acumulación, que son válvulas de 4 vías: las tres correspondientes a las motorizadas (acumulación, agua fría y ACS) y una cuarta vía en la que se conecta la recirculación; el caudal de recirculación mantiene a la válvula continuamente en actuación y facilita la adecuación a las condiciones de demandas variables. Los propios fabricantes especifican cuál es el caudal mínimo de recirculación para mantener la válvula activa, que como mínimo suele ser el 10% del caudal nominal. Otro tipo de válvulas termostáticas están diseñadas para su ubicación próxima a los puntos de consumo siendo exclusivamente de tres vías, no admitiendo la recirculación. Por último, se han diseñado válvulas termostáticas de dos vías para instalar exclusivamente en montantes de recirculación, que reducen el caudal al necesario para mantener las temperaturas de consigna en los mismos.

En nuestro caso, se usarán válvulas de tres vías monitorizadas, que tienen como entrada la temperatura media del agua contenida en los acumuladores.

Como sistema de control, se dispone de un panel principal de control en la instalación, donde se muestran las temperaturas en cada instante (un regulador térmico), de manera que pueda controlarse el funcionamiento del sistema en cualquier momento. Las bombas se controlan mediante señales de estos termoestátos. Por ejemplo, la bomba del circuito primario funciona de la siguiente manera: Tiene un control por temperatura, la bomba toma señales de las temperaturas de salida de los captadores y de la parte caliente del acumulador. Si la temperatura del acumulador es mayor que la de la salida de los captadores, la bomba se para, y si es al contrario la bomba arranca para que se llene el acumulador de agua caliente.

2.3.5 Sistema de energía auxiliar o convencional

Si dimensionáramos el campo solar para que supla toda la demanda, tendríamos un sistema de captación sobredimensionado para la mayoría de los meses del año y no nos saldría viable económicamente, por ello tenemos que optimizar la instalación y suplir las carencias del sistema solar con una caldera auxiliar convencional. También está este sistema para cubrir la demanda que se puede producir de manera inesperada.

El sistema de apoyo siempre tiene que estar dimensionado como si el sistema solar no existiese, ya que la función principal del sistema auxiliar será la de cubrir los picos de demanda, incluso en los momentos en los que la aportación del sistema solar sea insuficiente.

Es muy importante la posición relativa de este, existen dos tipos de configuraciones:

En serie con el acumulador solar: con esta configuración el sistema de energía convencional ha de ser modulante por temperatura y resistir entradas de agua precalentada entre 60-70 °C de temperatura. El rendimiento es el más alto ya que no afecta a la temperatura de entrada a los colectores, además de poder modular el consumo de energía convencional en función de la temperatura de entrada a la caldera mural, mayor eficiencia.

En paralelo con el acumulador solar: es la tipología más usual en sistemas domésticos termosifónicos, conexas menos eficiente ya que no se aprovecha el agua precalentada solar, sería un todo-nada. Estas calderas no aceptan agua precalentada.

En nuestro caso, se dispondrá una configuración de la caldera auxiliar en serie con el acumulador solar. El sistema auxiliar se controlará por temperatura, poniéndose en marcha únicamente cuando la temperatura a la entrada no sea la que este establecida como temperatura deseada. El sistema aportará únicamente la energía que se necesite para alcanzar esta temperatura.

2.3.6 Sistema de calefacción

El sistema de calefacción es el encargado de transmitir el calor aportado por el fluido caloportador a la sala.

En un sistema de calefacción son siempre necesarios un sistema productor de calor y un sistema distribuidor del mismo. Como sistema productor de calor vamos a tener la energía solar con un apoyo de una caldera de alta eficiencia de gas.

Los sistemas posibles distribuidores de la calefacción son los siguientes:

Radiadores convencionales: Su función es intercambiar calor del sistema para cederlo al ambiente. Se lleva, a través de los radiadores, agua a alta temperatura (alrededor de los 60°C), de esta manera, el radiador se calienta y emite el calor al exterior.

Radiadores de bajo consumo: Son como los convencionales, pero son capaces de trabajar a más baja temperatura

Fancoils: son esos emisores de aire del aire acondicionado, que también ofrecen calefacción

Suelo/Techo radiante: el sistema más eficiente y sano de distribución de la calefacción. Funciona por radiación, es decir, no calienta el aire para producir la calefacción. La radiación no se trata de ningún sistema extraño de producción de rayos; es un método natural de distribución de la energía. La energía del Sol, por ejemplo, nos llega de esta manera. Trabaja a baja temperatura y sólo tiene ventajas.

Las temperaturas de trabajo de cada uno de los sistemas son:

Subsistema de calefacción	Tª impulsión	Fluido de trabajo
Fancoils	50°C	Aire
Suelo radiante	40 °C	Agua
Radiadores de bajo consumo	60°C	Agua

Tabla 2.1. Temperatura de trabajo de los sistemas de calefacción

Se puede ver que una combinación óptima para la energía solar sería el subsistema de calefacción de suelo radiante, que trabaja con agua, por lo tanto, nos evitamos la necesidad de un intercambiador más, que encarece la instalación y aumentan las pérdidas. Además, es el sistema que a menor temperatura necesita el fluido.

2.3.7 Tuberías

El sistema de tuberías de la instalación es el encargado de transportar el fluido caloportador a los distintos dispositivos del sistema, haciendo posible los distintos intercambios energéticos y satisfaciendo la demanda.

Son un componente fundamental, para su selección se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

Compatibilidad con el fluido: En primer lugar, se cuidará que el material con el que están fabricadas sea compatible con el fluido a transportar, por lo que no afectarán a su composición ni producirán reacciones con el mismo.

Presión de trabajo: Las tuberías deben ser capaces de soportar la presión de trabajo en su instalación.

Temperatura de trabajo: Asimismo deben mantenerse estables con las temperaturas de trabajo de las instalaciones.

Los accesorios y uniones cumplirán las mismas características que las propias tuberías; en ocasiones las condiciones de trabajo están limitadas por las uniones o accesorios y no por las tuberías.

Las tuberías de la instalación se encuentran recubiertas de un aislante térmico para evitar pérdidas de calor con el entorno. Actualmente, se utiliza para circuito cerrado, tuberías de acero inoxidable, rodeadas de un aislamiento térmico.

3 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

La herramienta usada para la simulación de es TRNSYS. TRNSYS es un software usado para la simulación del comportamiento de instalaciones que evolucionan en el tiempo. Se usa principalmente en el ámbito de la ingeniería relacionada con energías renovables, ya que puede simular instalaciones solares térmicas, fotovoltaicas e incluso sistemas solares pasivos. Es un paquete de software comercial desarrollado por la universidad de Wisconsin. Uno de sus usos originales fue el de realizar la simulación dinámica del comportamiento de un sistema de agua caliente solar para un año típico meteorológicos a fin de que se pueda comprobar los ahorros de costes a largo plazo de estos sistemas. Hoy en día el programa se ha desarrollado para poder simular más tipos de instalaciones.

3.1. Esquema de simulación

Para la simulación de la instalación real hemos montado este sistema en Trnsys:

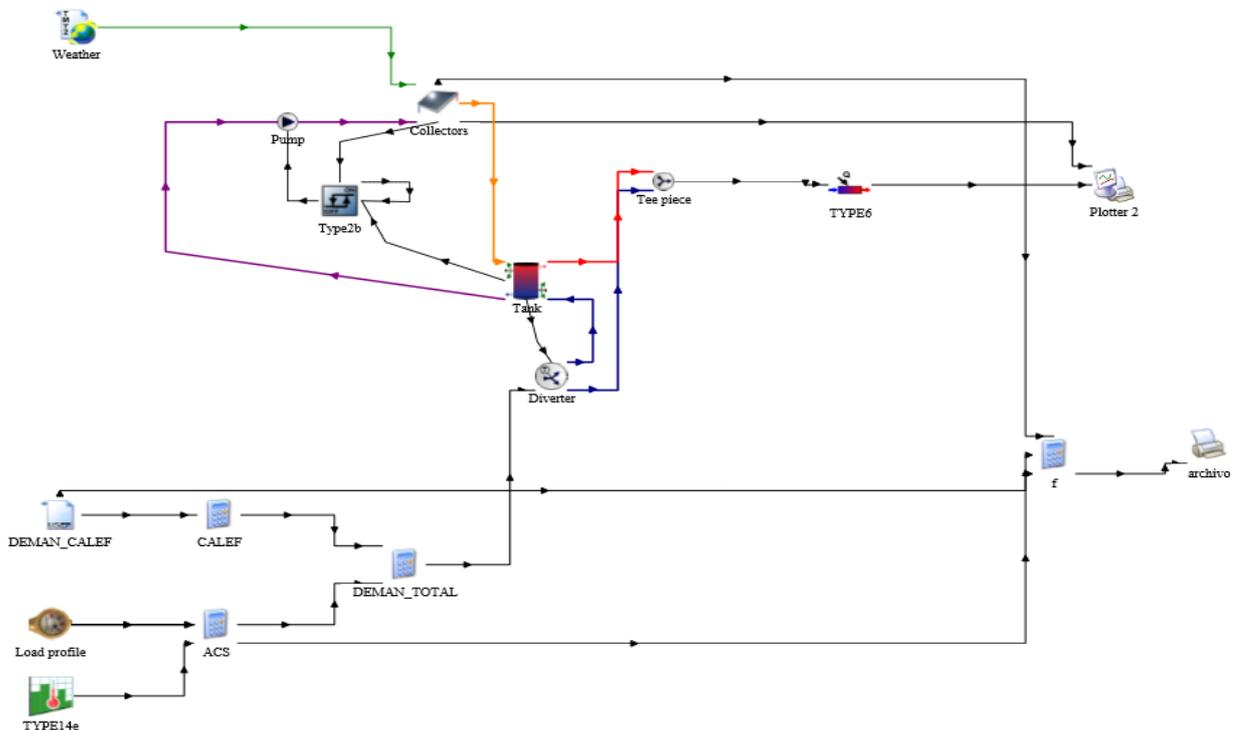


Fig. 3.1. Modelo de simulación en Trnsys

El modelo anterior, no sigue el esquema de la instalación real de manera exacta. Se debe a, que los elementos del programa tienen algunas limitaciones y por eso hemos tenido que construir un modelo similar, pero bajo ciertas aproximaciones. De todas maneras, refleja y simula bastante bien la realidad.

Para que a idea general del funcionamiento del modelo sea más clara, vamos a dividirlo por zonas:

Circuito de captación

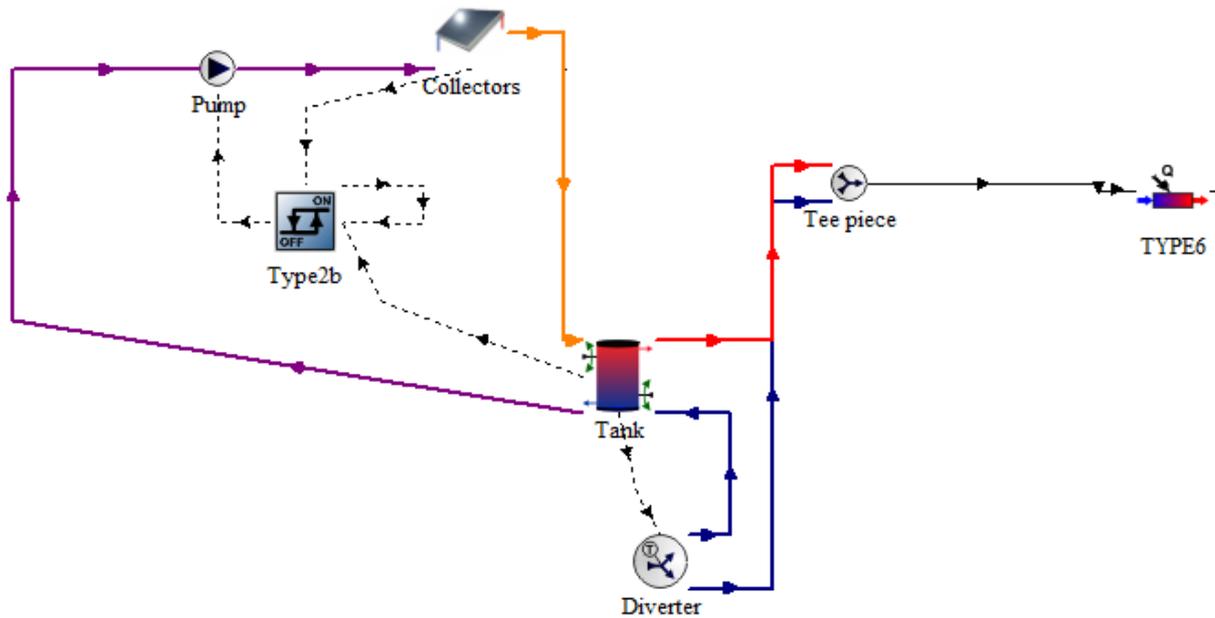


Fig. 3.2. Modelo del circuito de captación en Trnsys

De manera general, lo que representa la instalación solar es esta parte del esquema. En el se puede ver elementos como el tanque de almacenamiento, la bomba, los paneles solares e incluso la caldera auxiliar. La manera en que *TRNSYS* hace funcionar esta parte de la instalación es la siguiente:

Lo que se quiere satisfacer es un determinado caudal de agua caliente (ya sea para el consumo como tal o ya sea para calefacción) a una temperatura dada. Por ese motivo, gracias a un calculo previo, lo que toma el *Diverter* como entrada es el caudal total demandado y la temperatura a la que llega. Este elemento, lo que deberá hacer es enviar parte del caudal de entrada hacia el almacenamiento y parte directamente al consumo, todo esto gracias a un control por temperatura (toma como entrada para este control la temperatura que hay en la parte superior del tanque). En el *Tank* se tiene como entrada el caudal que ha enviado el *Diverter* a la temperatura a la que entro en el *Diverter*. Las salidas de este dispositivo son: el caudal mismo que entro y la temperatura del agua fría del tanque. Desde aquí, se bombea para que pase por los captadores solares. El funcionamiento de *Pump* estará regido por un control por diferencias de temperaturas entre la salida de captadores y la temperatura del agua caliente del almacenamiento. Los *Collectors* se encargarán de transmitir la energía del sol al fluido, aumentando su temperatura. Tras su paso por *Collectors*, entran en la parte alta del almacenamiento (parte caliente). La salida del tanque por la parte superior será del mismo caudal que paso por colectores y a una temperatura que será a la que estuviera el agua del tanque en ese momento. La función del *Tee piece* es la de unir los dos flujos (caudal total que previamente había entrado en el *Diverter*), el de agua

caliente y el de agua fría (enviado desde el *Diverter*) para obtener la temperatura impuesta. El *TYPE6* es el calentador auxiliar, que aportará energía cuando nuestro sistema de captadores no sea capaz de aportarla.

Cálculo de demanda

La siguiente parte del esquema tiene su utilidad para, como se ha comentado antes, el cálculo de la demanda total que necesita el circuito principal como entrada.

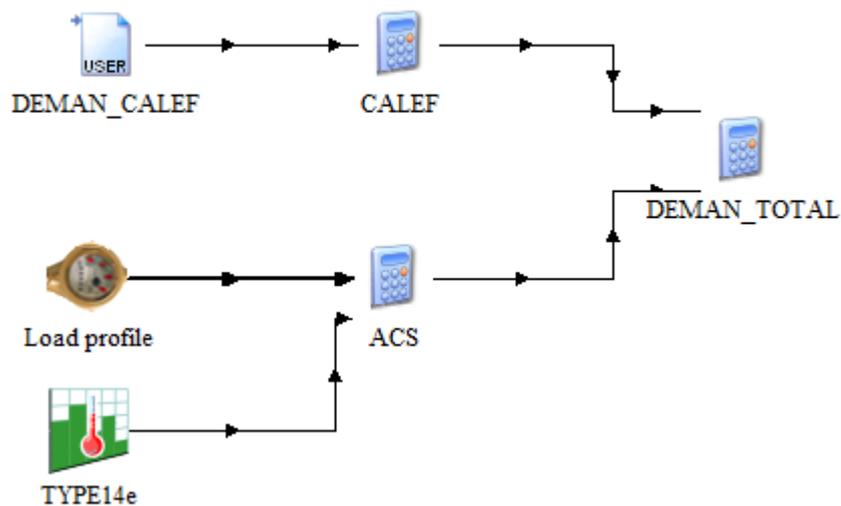


Fig. 3.3. Modelo para el cálculo de demandas en Trnsys

Su funcionamiento es sencillo, ya que parte de la idea del cálculo de demandas por separado, la de ACS por un lado y la de calefacción por otro.

El fichero *DEMAN_CALEF* proporciona la demanda de calefacción en términos energéticos (Wh), hora a hora, a lo largo de un año. La calculadora *CALEF* toma como entrada dicha demanda, y gracias a ella se calcula el caudal m_{calef} . El *LOAD PROFILE* indica el perfil del consumo de agua caliente que tiene el hogar a lo largo de un día, es decir el porcentaje del consumo total de agua., también es un perfil hora a hora. El *TYPE14a* da la temperatura del agua de red de cada mes del año. Estos dos últimos ficheros entran en la calculadora de ACS, que calcula el caudal demandado de agua caliente, (m_{ACS}). También se calcula la demanda energética que supone la demanda de agua caliente. Estas dos demandas energéticas, la de agua caliente y la de calefacción, entran en una calculadora de demanda total, para sacar el caudal total demandado (m_{total}) y la temperatura de mezcla (T_m), a la que entrará el caudal en el almacenamiento, que será una temperatura media entre la temperatura de red y la de retorno del sistema de calefacción. También se calculará la demanda total en términos de energía, útil para el posterior cálculo del parámetro *demanda cubierta* (f).

Para finalizar, en el esquema general hemos podido observar elemento como *Weather*, *Plotter* y

Archivo. Tanto *PLOTTER* como *ARCHIVO* sirven para imprimir resultados, el primero en forma de gráficas, que muestran cualquier variable en función del tiempo, y el segundo, me exporta los resultados que yo le indique a un fichero externo, normalmente un fichero de Excel. Es útil para es posterior análisis de los resultados obtenidos en la simulación. *Weather*, como el nombre de su fichero indica, es un fichero que aporta los datos meteorológicos (radiación, temperatura ambiente, velocidad del viento...) de una ciudad que determinemos a lo largo de un año.

En el siguiente apartado describiremos cada elemento que compone el esquema de simulación detalladamente, así como las ecuaciones que los gobiernan.

3.2. Elementos del sistem de simulación

3.2.1. Año meteorológico tipo

Para que el sistema funcione, lo primero que hay que introducir es un año meteorológico tipo. Para que TRNSYS lea este tipo de ficheros hay que poner un “*Weather Data Reading*”, que leera el archivo que yo le indique, que será en este caso el año meterolológico tipo de Sevilla.



En este archivo se encuentran los datos de radiación indirecta, directa y global, velocidad del viento. todo esto para cada hora del año.

Por ejemplo, uno de los datos de mayor interés para este proyecto es la radiación global incidente en Sevilla, ya que será lo que tome como entrada nuestros captadores solares. Su perfil horario a lo largo del año es el siguiente

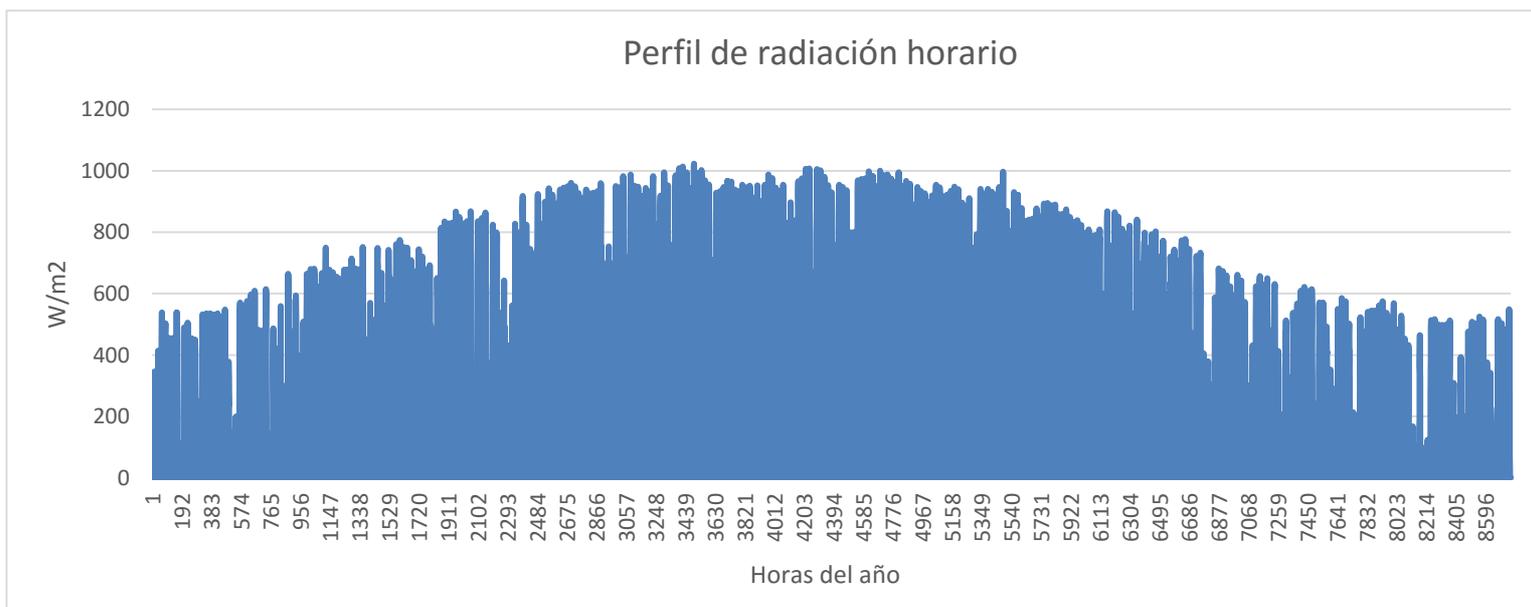


Fig. 3.4. Perfil de radiación horario en Sevilla a lo largo de un año

Dentro de cada elemento, en el programa *Trnsys* tendremos una serie de parámetros: los de caracterización del elemento y los parámetros de entrada y salida.



Nuestro archivo *Wheater* no tendrá parámetros de caracterización significativos, y en cuanto a las entradas, será el archivo que seleccione dentro de la biblioteca de meteorología, que contiene los años meteorológicos tipos de muchas ciudades a lo largo del mundo. En nuestro caso se elegirá el de la ciudad de Sevilla.

Las salidas si son más numerosas y son las siguientes:

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment		
1	<input type="checkbox"/>	Ambient temperature				C	More...	<input type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/>	relative humidity				any	More...	<input type="checkbox"/>
3	<input type="checkbox"/>	wind velocity				m/s	More...	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/>	wind direction				-	More...	<input type="checkbox"/>
5	<input type="checkbox"/>	Atmospheric pressure				Pa	More...	<input type="checkbox"/>
6	<input type="checkbox"/>	userdefined data 2				any	More...	<input type="checkbox"/>
7	<input type="checkbox"/>	userdefined data 3				any	More...	<input type="checkbox"/>
8	<input type="checkbox"/>	userdefined data 4				any	More...	<input type="checkbox"/>
9	<input type="checkbox"/>	extraterrestrial radiation on horizontal				kJ/hr.m ²	More...	<input type="checkbox"/>

1 How many surfaces are to be evaluated by This Type 109? 1

Fig. 3.5. Variables de salida del archivo *Wheater* (1)

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment		
7	<input type="checkbox"/>	userdefined data 3				any	More...	<input type="checkbox"/>
8	<input type="checkbox"/>	userdefined data 4				any	More...	<input type="checkbox"/>
9	<input type="checkbox"/>	extraterrestrial radiation on horizontal				kJ/hr.m ²	More...	<input type="checkbox"/>
10	<input type="checkbox"/>	solar zenith angle				degrees	More...	<input type="checkbox"/>
11	<input type="checkbox"/>	solar azimuth angle				degrees	More...	<input type="checkbox"/>
12	<input type="checkbox"/>	total radiation on horizontal				kJ/hr.m ²	More...	<input type="checkbox"/>
13	<input type="checkbox"/>	beam radiation on horizontal				kJ/hr.m ²	More...	<input type="checkbox"/>
14	<input type="checkbox"/>	sky diffuse radiation on horizontal				kJ/hr.m ²	More...	<input type="checkbox"/>
15	<input type="checkbox"/>	ground reflected diffuse radiation on horizontal				kJ/hr.m ²	More...	<input type="checkbox"/>

1 How many surfaces are to be evaluated by This Type 109? 1

Fig. 3.6. Variables de salida del archivo *Wheater* (2)

Estos parámetros se usarán en la simulación ya que serán las variables de entrada de otros equipos.

Los datos que nos interesarán principalmente, serán los de la radiación directa y la temperatura ambiente.

Los datos que provienen del archivo como la radiación global serán una de las entradas de datos en los captadores solares. También será otra entrada la temperatura ambiente, ya que esta influye en el rendimiento de los captadores.

3.2.2. Demanda de calefacción y ACS

La demanda energética de la vivienda se debe a dos consumos: el de agua caliente sanitaria, y el consumo de calefacción. Por ello, se calcularán dichas demandas por separado, para luego poder calcular la demanda total y ver cuanta de esta demanda podrá ser suplida por los captadores solares.

1. Demanda de ACS:

El perfil diario de consumo de ACS será el siguiente:

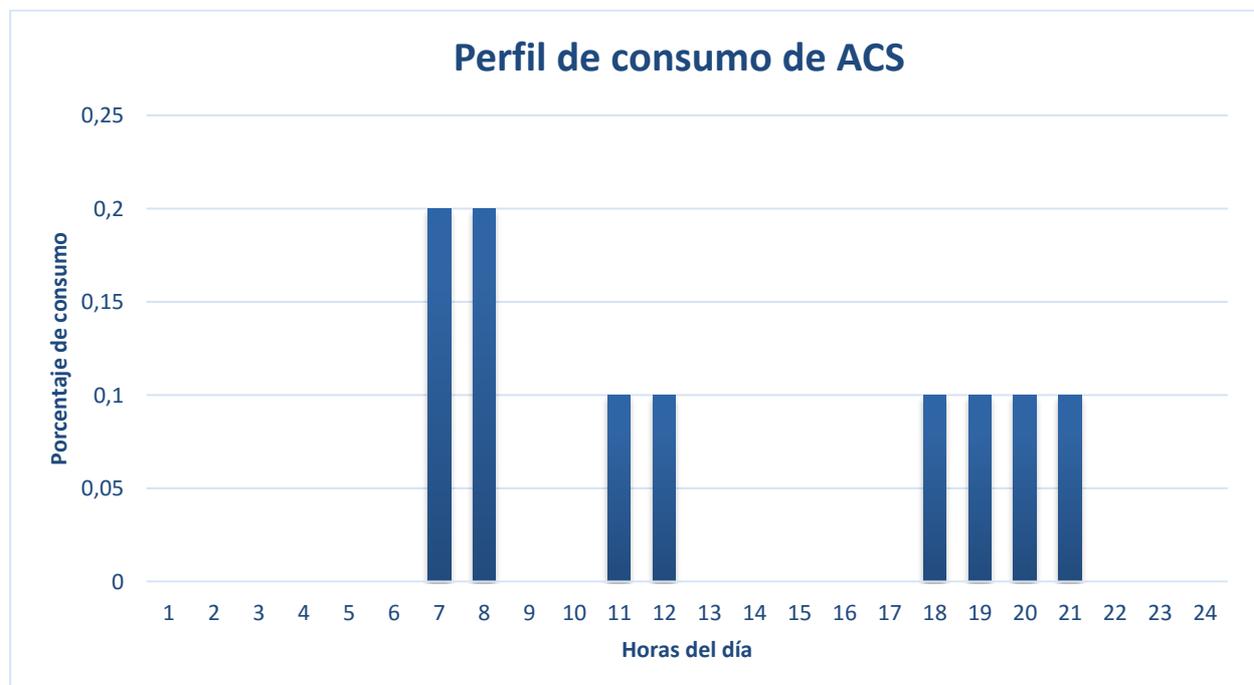


Fig. 3.7. Perfil de consumo diario de acs

Esta gráfica muestra el porcentaje de ACS que se consume a lo largo del día. Es simplemente un perfil de consumo diario, sin embargo, el consumo total de acs se regirá a la normativa vigente.

En el “Documento Básico de Ahorro de Energía” (HE 4) se establece una referencia para el consumo total de ACS según la finalidad del edificio y su ocupación.

Tabla 3.1. Demanda de referencia a 60°C (1)

Criterio de demanda	Litros ACS/día a 60° C	
Viviendas unifamiliares	30	por persona
Viviendas multifamiliares	22	por persona
Hospitales y clínicas	55	por cama
Hotel ****	70	por cama
Hotel ***	55	por cama
Hotel/Hostal **	40	por cama
Camping	40	por emplazamiento
Hostal/Pensión *	35	por cama
Residencia (ancianos, estudiantes, etc)	55	por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	15	por servicio
Escuelas	3	por alumno
Cuarteles	20	por persona
Fábricas y talleres	15	por persona
Administrativos	3	por persona
Gimnasios	20 a 25	por usuario
Lavanderías	3 a 5	por kilo de ropa
Restaurantes	5 a 10	por comida
Cafeterías	1	por almuerzo

(1) Los litros de ACS/día a 60°C de la tabla se han calculado a partir de la tabla 1 (Consumo unitario diario medio) de la norma UNE 94002:2005 “Instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria: cálculo de la demanda energética”.

Para el cálculo se ha utilizado la ecuación (3.2) con los valores de $T_i = 12^\circ\text{C}$ (constante) y $T = 45^\circ\text{C}$.

Fig. 3.8. Consumo reglamentario de acs según finalidad del edificio y ocupación

En nuestro caso, tenemos una vivienda unifamiliar de 4 personas, por lo que el consumo total de ACS consumido será de:

$$30 \frac{\text{litros}}{\text{dia} * \text{persona}} * 4 \text{ personas} = 120 \frac{\text{litros}}{\text{dia}}$$

El consumo de 120 litros al día sería a una temperatura de agua caliente de 60°C, sin embargo, para simplificar el modelo de simulación, se supondrá que el consumo de ACS y el de calefacción se harán a la misma temperatura. De esta manera, el consumo total de ACS variará según el tipo de calefacción usada, ya que será esta quien imponga la temperatura de impulsión. El caudal necesario para distintas temperaturas se calculará haciendo el siguiente balance de energía:

$$Q_{acs} = m_{acs}(T^a) * Cp * (T_{acs} - T_{ref})$$

Siendo $T_{ref} = 0^\circ\text{C}$

Según el Código Técnico, se sabe cual será el caudal necesario a una temperatura de 60°C. Con esto, se calcula, en términos de energía, cual es la demanda de ACS, y para las demás temperaturas, lo único que se debe de hacer es igualar la demanda energética a la calculada para una temperatura de 60°C y cambiar la temperatura de ACS. Despejando, el resultado será el caudal necesario a otras temperaturas

Nuestras posibles temperaturas de impulsión, junto con los caudales serán las siguientes:

Tipo de calefacción	Temperatura de impulsión	Consumo de acs
Suelo radiante	40	180
Convector	50	144
Radiador	60	120

Tabla 3.1. m_{acs} demandado según la temperatura de impulsión

Con esto, ya se obtendrá el caudal de ACS necesario para suplir la demanda y la temperatura a la que debe de ser suministrado, sin embargo, nos interesa expresarlo en términos energéticos.

$$Q_{acs} = m_{acs} * Cp_{agua} * (T_{acs} - T_{red})$$

El único término constante será el $Cp_{agua} = 4,18 \text{ kJ/kgK}$. El resto de parámetros tendrán una variación horaria.

La temperatura del agua de red será un parámetro que variará a lo largo de los meses del año y es la que hace que la demanda energética de ACS varíe.

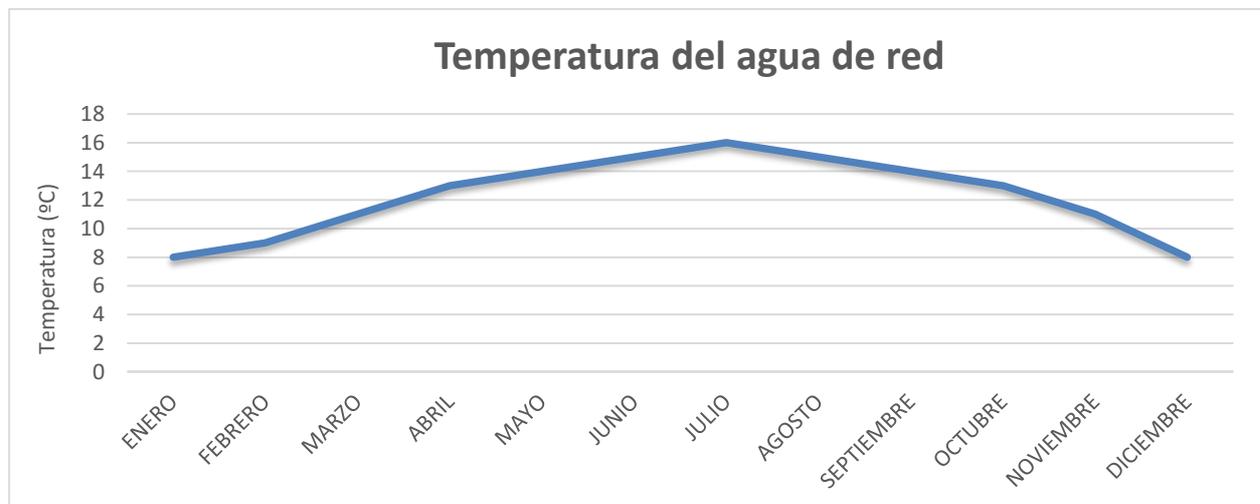


Fig. 3.9. T^a del agua de red

Este perfil de demanda, se carga en la simulación con el archivo *Load Profile*, que indica, hora a hora, cual es el porcentaje de consumo dentro del total del día. El perfil de temperaturas del agua de red se establece gracias al *TYPE14e*.

Finalmente, se verá como sería el perfil energético de demanda de ACS en un año:

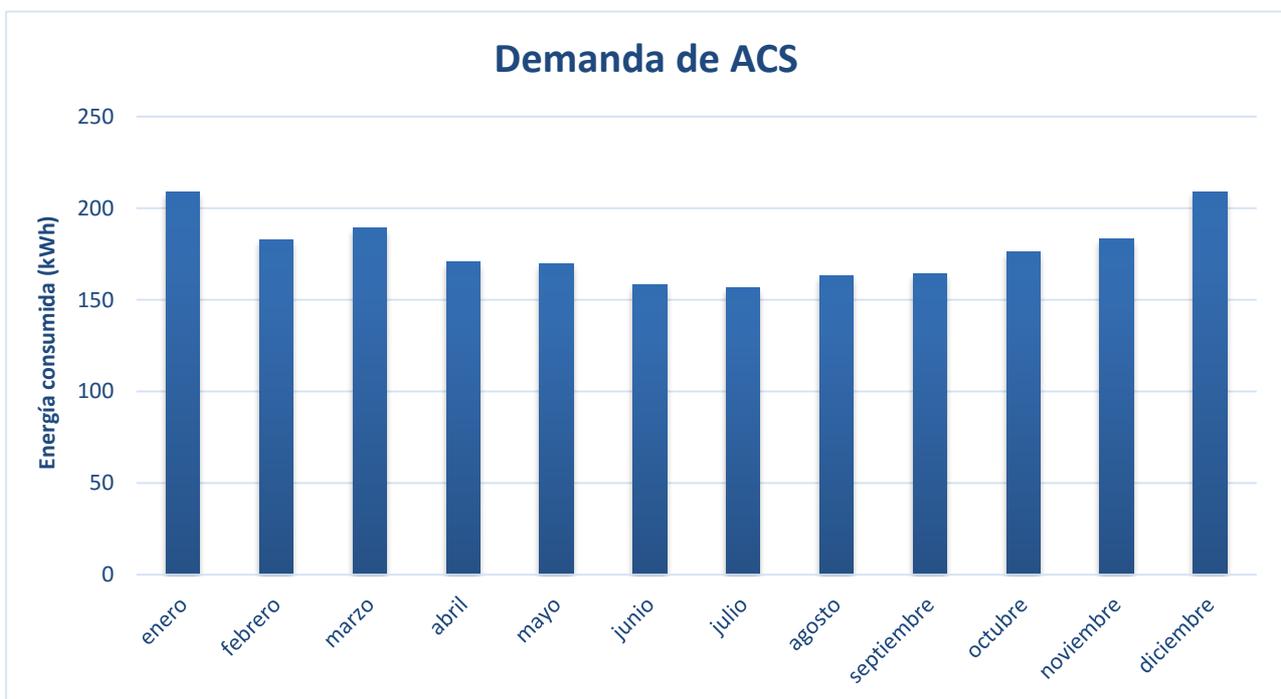
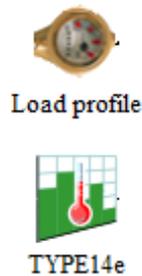


Fig. 3.10. Perfil de demanda de ACS (kWh)

2. Demanda de calefacción

La demanda energética de calefacción, en términos generales, será bastante mayor que la de acs, sin embargo, no se mantiene constante a lo largo del año, y en 7 meses del año permanece prácticamente nula, lo que hará que se sobredimensione el campo y más de la mitad del año, la energía captada se desperdicie.

El perfil de demanda de calefacción a lo largo del año en Sevilla es el siguiente:

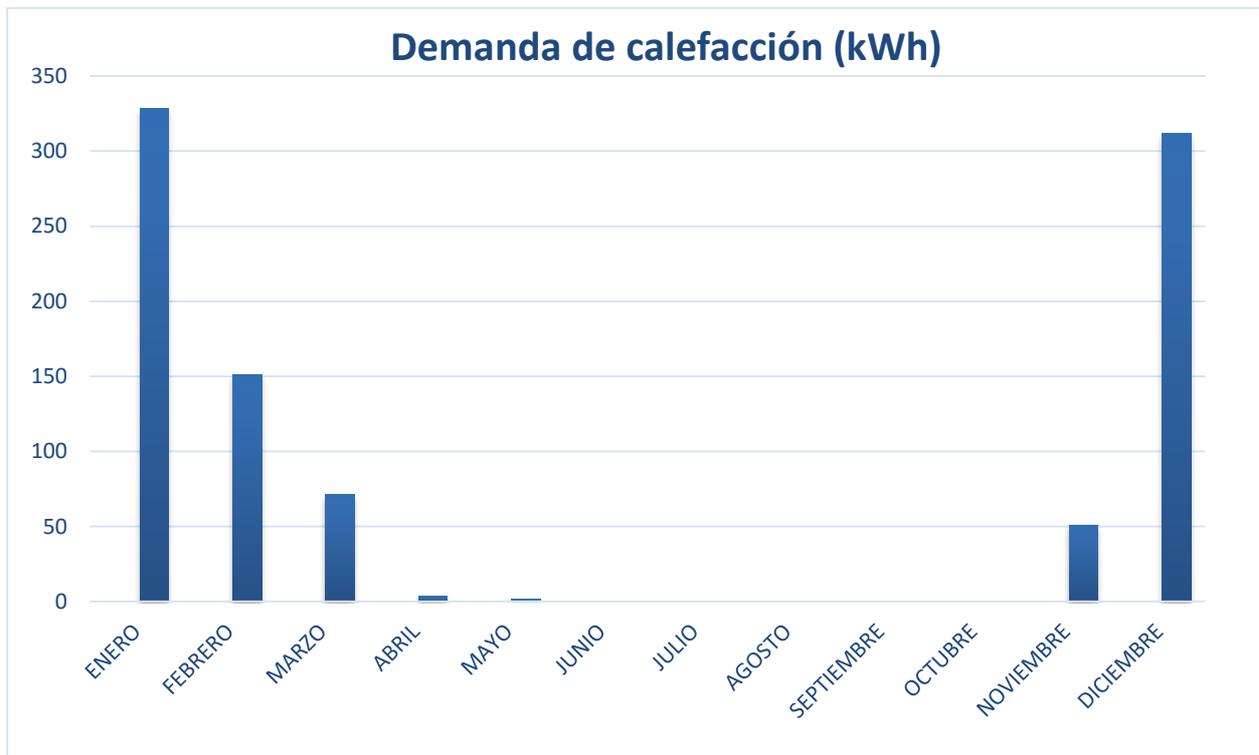


Fig. 3.11. Perfil de demanda de calefacción (KWh)

También es interesante ver cual es el perfil de demanda de calefacción a lo largo de un día, por ello se muestra distintos días de un mes:

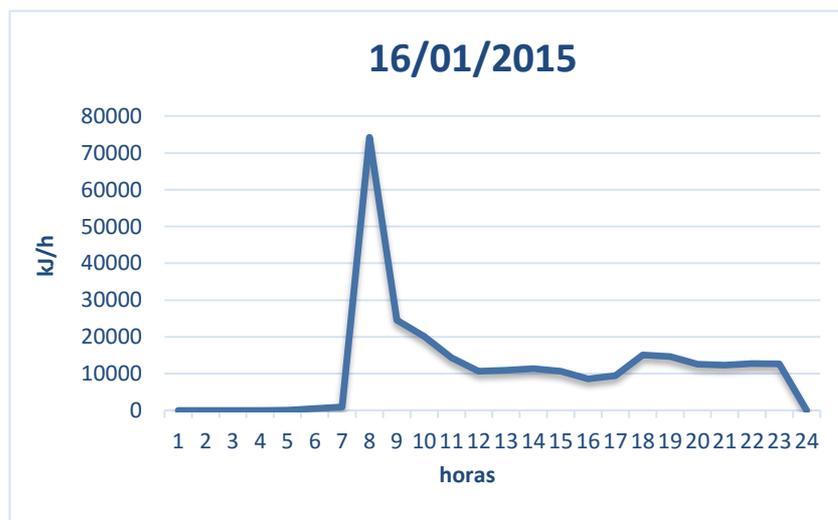


Fig. 3.12. Perfil diario de demanda de calefacción (1)

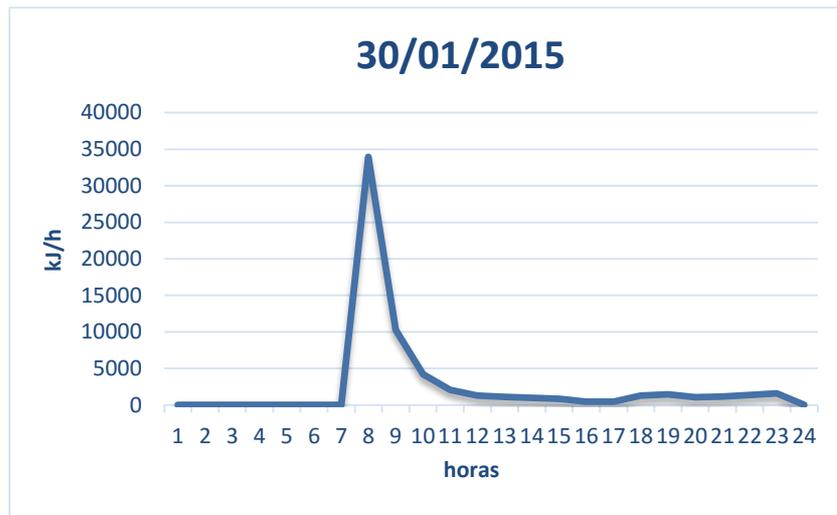


Fig. 3.13. Perfil diario de demanda de calefacción (2)

Si se observan los perfiles de demanda de los diferentes días, en todos ellos se ve que, al principio de la mañana, en torno a las 7, se produce un pico bastante elevado. Se debe al arranque del sistema de calefacción, que consume tanta energía al principio porque emplea toda su potencia en poner la vivienda a la temperatura que se demanda en el menor tiempo posible, trabajando luego el resto del día a carga parcial (pues la máquina sería dimensionada con una potencia tal que fuera capaz de suplir ese arranque), por ello, existe la posibilidad de suavizarlo a la hora de simular, ya que, se es consciente de que en una vivienda no hace falta ponerla a la temperatura solicitada desde el principio, sino que se tendrá en cuenta que desde que se conecta la calefacción pasará un tiempo hasta conseguir la temperatura deseada, ya que se conseguirá de manera suave. En nuestra simulación, no se acotará dicho pico de demanda, para ver cual es el comportamiento del sistema frente a esto y analizar como afecta al factor de demanda subierta. Sin embargo, suavizando estas curvas de demanda, se podría dimensionar el campo solar para una menor energía demandada, y por lo tanto sería más fácil alcanzar la amortización de la instalación en menos años.

Volviendo a la simulación que hace el programa, la demanda de calefacción se ha obtenido del estudio energético de una vivienda unifamiliar, dicho estudio no es objeto de este proyecto y por eso se usarán directamente los datos obtenidos leyéndolos a partir de un fichero, que contiene la demanda hora a hora a lo largo de un año.



A diferencia del agua caliente, en el caso de la calefacción, el programa toma como entrada dicha demanda, ya en términos de energía. Ahora interesa saber cual será el caudal necesario, sabiendo la temperatura de impulsión, para suplir dicha demanda. Esto se obtiene de la siguiente manera:

$$Q_{calef} = m_{calef} * C_{p_{agua}} * (T_{imp} - T_{ret})$$

Despejando:

$$m_{calef} = \frac{Q_{calef}}{Cp_{agua} * (T_{imp} - T_{ret})}$$

Como se ha dicho con anterioridad, la temperatura de impulsión y la de retorno dependerá del tipo de calefacción que usemos, por lo tanto, serán términos fijos en la ecuación.

3. Demanda total

La demanda energética total será la suma de las dos anteriores:

$$Q_{total} = Q_{acs} + Q_{calef}$$



Fig 3.14. Perfil de demanda energética total del sistema

En esta gráfica se muestra la demanda total, diferenciando que parte de esta es por calefacción y que parte por ACS. Se aprecia que, en los meses de invierno es mucho más significativa la carga por calefacción frente a la de ACS. Sin embargo, durante 8 meses del año, prácticamente, lo único que hay es demanda de ACS, por eso, el dimensionar la instalación para la demanda de calefacción se penaliza mucho la rentabilidad, ya que en gran parte del año no se usa en su totalidad la instalación y se tendrán excedentes de energía.

La demanda total será la usada para el posterior cálculo de la demanda cubierta:

$$f = \frac{\text{Energía solar}}{Q_{total}}$$

Se calcula gracias a una calculadora que toma como entradas las demandas calculadas en dos calculadoras anteriores, una para la de ACS y otra para la de calefacción. Este calculo sirve tanto para calcular la f como hemos dicho antes, como para calcular el caudal total demandado a la instalación y la temperatura de mezcla entre en agua de red y el agua de retorno del sistema de calefacción.

Dicho calculo se hará de la siguiente manera:

$$m_{total} = m_{acs} + m_{calef}$$

El calculo de la temperatura de la mezcla es algo más complejo y se hace mediante el siguiente balance energético:

$$m_{acs} * Cp * (T_{red} - T_{ref}) + m_{calef} * Cp * (T_{ret} - T_{ref}) = (m_{acs} + m_{calef}) * Cp * (T_{mezcla} - T_{ref})$$

Despejando se obtiene la T_{mezcla} deseada.

3.2.3. Diverter

El *Diverter* es el encargado de separar el caudal que viene de la demanda total. Separará una parte del caudal hacia la zona de consumo y la otra irá hacia el almacenamiento para que sea calentada por el sistema de captación. El funcionamiento del *Diverter* está controlado mediante una señal de temperatura que tiene como entrada la temperatura de la parte alta (o parte caliente) del acumulador.



Diverter

Según la temperatura a la que esté el agua de almacenamiento, se hará un balance de energía para ver que caudal es necesario en cada uno de los conductos. Se tiene en cuenta también la temperatura de consumo. Se calculará cuanto caudal irá para canal mediante este balance de energía:

$$m_{total} = m_{caliente} + m_{fria}$$

$$m_{total} * Cp * (T_{mezcla} - T_{ref}) = m_{caliente} * Cp * (T_{almac} - T_{ref}) + m_{fria} * Cp * (T_{mezcla} - T_{ref})$$

Siendo $T_{ref} = 0^{\circ}\text{C}$

Por ejemplo, si la temperatura del almacenamiento es mayor que la requerida en el consumo, parte del

caudal demandado tendrá que ir directamente a la temperatura de mezcla al punto de consumo, para que, al unirse al caudal a temperatura del almacenamiento se obtenga la temperatura deseada.

Este elemento, no tiene parámetros de caracterización, pero si los tiene de entrada y salida.

Variables de entrada:

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Inlet temperature	20.0	C	More...		
2	Inlet flow rate	100.0	kg/hr	More...		
3	Heat source temperature	55.0	C	More...		
4	Set point temperature	45	C	More...		

Fig 3.15. Parámetros de entrada del *Diverter*

Variables de salida:

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Temperature at outlet 1	C	More...	<input type="checkbox"/>		
2	Flowrate at outlet 1	kg/hr	More...	<input type="checkbox"/>		
3	Temperature at outlet 2	C	More...	<input type="checkbox"/>		
4	Flow rate at outlet 2	kg/hr	More...	<input type="checkbox"/>		
5	Control function	dimensionless	More...	<input type="checkbox"/>		

Fig. 3.16. Variables de salida del *Diverter*

La temperatura a la salida 1 será hacia el almacenamiento, a la salida 2 será hacia el consumo y las temperaturas de ambas salidas serán la misma e igual a la de mezcla.

3.2.4. Almacenamiento

El almacenamiento es el encargado de acumular el agua que se va calentando en los captadores. Para que la simulación se asemeje más al comportamiento de un acumulador real, se establecen varios nodos, que son las distintas estratificaciones de temperatura que tendrá nuestro tanque. En este caso, se han establecido seis nodos, uno es el nodo de entrada del agua a T_m , y otro, el nodo de la parte alta del tanque, que es el nodo que está a más temperatura dentro del tanque, pues es donde entra directamente el agua que se ha calentado en los captadores. los demás son nodos intermedios que distan entre si una distancia de 0.3 metros



Otros parámetros que se usan para caracterizan el comportamiento que va a tener el almacenamiento serán los siguientes:

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Variable inlet positions	2	-	More...		
2	Tank volume	0.300	m ³	More...		
3	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K	More...		
4	Fluid density	1000.0	kg/m ³	More...		
5	Tank loss coefficient	2.5	kJ/hr.m ² .K	More...		
6	Height of node-1	0.3	m	More...		
7	Height of node-2	0.3	m	More...		
8	Height of node-3	0.3	m	More...		
9	Height of node-4	0.3	m	More...		

Fig. 3.17. Parámetros que caracterizan el almacenamiento

Como se puede ver, se establece el fluido caloportador que se va a usar, caracterizándolo con su densidad y su calor específico.

Otro aspecto que hace que el tanque se asemeje a la realidad es el coeficiente de pérdida de calor.

Las entradas a este dispositivo serán, la temperatura de la mezcla entre el agua de red y el agua de retorno de la calefacción, y, el caudal total demandado que necesita ser calentador, es decir el flujo a la salida del *Diverter*.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Hot-side temperature	45.0	C	More...		
2	Hot-side flowrate	0	kg/hr	More...		
3	Cold-side temperature	15	C	More...		
4	Cold-side flowrate	0	kg/hr	More...		
5	Environment temperature	20	C	More...		
6	Control signal for element-1	1	-	More...		
7	Control signal for element-2	0.0	-	More...		

Fig. 3.18. Parámetros de entrada del Tanque

Todo el caudal que entra en el almacenamiento, sale por el nodo del punto caliente a la temperatura que en ese momento esté el tanque.

Lo que ocurre en el tanque, es que, cuando hay demanda de agua, y no hay radiación, el agua en el interior se va enfriando porque entra agua fría, y sale el agua caliente, sin reponerse de agua caliente proveniente de los captadores, ya que no están en funcionamiento. Sin embargo, en las horas de alta radiación, no suele haber consumo, y por lo tanto lo que ocurre, es que la temperatura general en el interior va aumentando.

La temperatura de salida del almacenamiento dependerá de la temperatura a la que este el agua del interior, ocurriendo a veces, que esta temperatura de salida sea menor que la temperatura demandada. Esto será una de las cosas que nos interesa estudiar, ya que, cada vez que esta temperatura de salida sea menor que la requerida, se necesitará un calentamiento auxiliar.

3.2.5. Bomba

El bombeo, es el encargado de impulsar el caudal que sale del almacenamiento hacia los paneles solares para que sea calentado. La bomba de nuestro sistema está regida por un sistema de control, que controla el arranque/parada de la bomba.



El funcionamiento estará controlado por un ciclo de histéresis, alimentado por dos mediciones de temperatura, uno en el almacenamiento en la parte superior de este y otro a la salida del agua de los captadores. El controlador le manda una señal de 0, si quiere que la bomba este en OFF, y una señal de 1 si quiere que la bomba comience a funcionar (ON).

Se generará una señal de 1 o 0 según si ocurre una cosa u otra:

$T_{salida\ captadores} - T_{nodo\ caliente} > 10\ ^\circ C$ se generará una señal de ON

$T_{salida\ captadores} - T_{nodo\ caliente} < 2\ ^\circ C$ se generará una señal de OFF



Type2b

El sentido de este control es que no se bombee agua a través del circuito de captación cuando no haya radiación, ya que sería un gasto inútil de energía en el bombeo, o bien, que no se bombee cuando el agua almacenada se encuentre a una temperatura mayor, que la del agua que me pueda aportar el circuito de captación, ya que de esta manera estaríamos enfriando el agua del almacenamiento, lo que sería una pérdida innecesaria de energía.

3.2.6. Sistema de captación

El sistema de captación es el encargado de elevar la temperatura del agua que pasa a través del campo solar. En nuestra herramienta de simulación, este dispositivo toma como entrada la radiación global incidente (kW/m²) del emplazamiento donde tengamos la instalación y la temperatura ambiente, todo esto hora a hora.



Para caracterizar el funcionamiento de los captadores solares se hace fijando unos parámetros, que son los siguientes:

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Number in series	1	-	More...		
2	Collector area	5	m ²	More...		
3	Fluid specific heat	4.190000	kJ/kg.K	More...		
4	Efficiency mode	1	-	More...		
5	Tested flow rate	40	kg/hr.m ²	More...		
6	Intercept efficiency	0.800000	-	More...		
7	Efficiency slope	13	kJ/hr.m ² .K	More...		
8	Efficiency curvature	0.050000	kJ/hr.m ² .K ²	More...		
9	Optical mode 2	2	-	More...		

Fig. 3.19. Parámetros de caracterización de los paneles solares

En esta pantalla, se puede modificar el área de captación y su configuración. Esto es interesante, ya que se hará un estudio de como influye el área de captación en la variación de la demanda cubierta, es decir, ver si, aumentando el doble el área de captación, aumenta el doble la demanda cubierta.

El resto de parámetros, se obtendrán del catálogo de un captador solar real, para que se asemejen lo más posible al comportamiento que tendría la tecnología comercial que está ahora mismo en los mercados.

Como entradas, los captadores toman el flujo de corriente que viene de la bomba y la temperatura del mismo. Y como salidas dan, la temperatura del flujo a la salida de los captadores y el flujo a la salida, que será el mismo que el flujo a la entrada, ya que la pérdida de carga es despreciable. También se puede ver la energía ganada por el fluido a su paso por los captadores.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Inlet temperature	20	C	More...		
2	Inlet flowrate	100	kg/hr	More...		
3	Ambient temperature	10	C	More...		
4	Incident radiation	0	kJ/hr.m ²	More...		
5	Total horizontal radiation	0	kJ/hr.m ²	More...		
6	Horizontal diffuse radiation	0	kJ/hr.m ²	More...		
7	Ground reflectance	0.200000	-	More...		
8	Incidence angle	45	degrees	More...		
9	Collector slope	0	degrees	More...		

Fig. 3.20. Parámetros de entrada del sistema de captación

Y las salidas son las siguientes:

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Outlet temperature	C	More...	<input type="checkbox"/>		
2	Outlet flowrate	kg/hr	More...	<input type="checkbox"/>		
3	Useful energy gain	kJ/hr	More...	<input type="checkbox"/>		

Fig. 3.21. Variables de salida del sistema de captación

El funcionamiento de los captadores es gobernado por una serie de ecuaciones que son las siguientes:

$$Q_{ganada} = m_{total} C_p * (T_s - T_e)$$

$$\eta = \frac{Q_{ganada}}{E_{incidente}}$$

Para hacerse una idea de la energía que incide en cada mes (por metro cuadrado) en los captadores hemos realizado una gráfica, tomando como datos, los de radiación de un año meteorológico tipo:

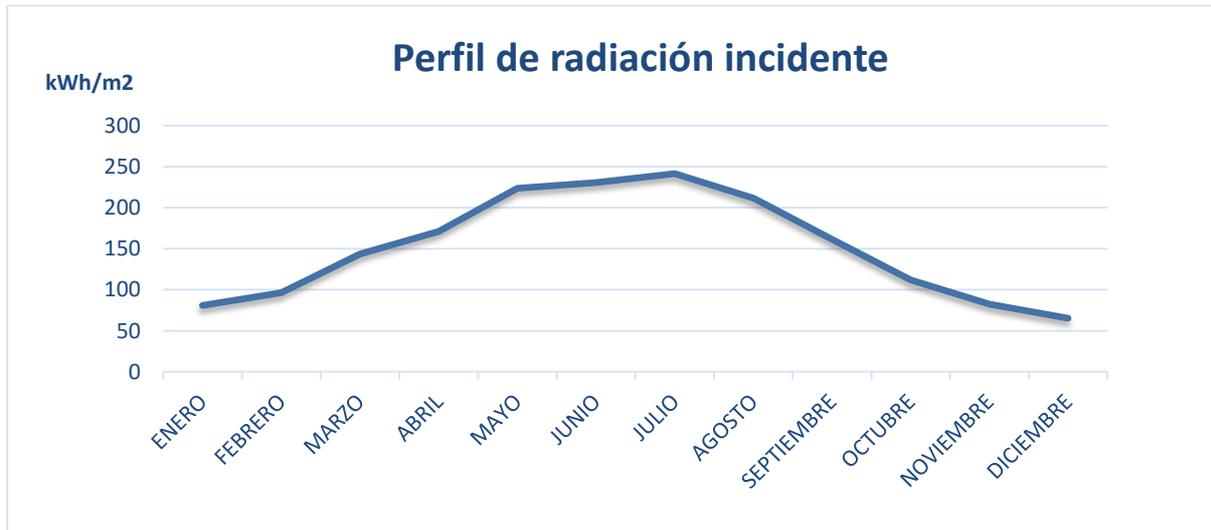


Fig. 3.22. Perfil de radiación incidente (kWh/m2)

Comparando esta gráfica con la de consumo de calefacción, se ve, que en los meses donde menos energía es posible de obtener porque menos incide es donde más energía es requerida.

3.2.7. Tee piece



El *Tee piece* es la herramienta que sirve para mezclar las dos corrientes, la que proviene caliente del almacenamiento, y la que proviene fría directa de la mezcla entre agua de retorno y agua de red.

Al dispositivo lo gobiernan las siguientes ecuaciones:

$$m_{total} = m_{alm} + m_{red}$$

$$m_{total} * Cp * (T_{caliente} - T_{ref}) = m_{alm} * Cp * (T_{caliente} - T_{ref}) + m_{red} * Cp * (T_{mezcla} - T_{ref})$$

Se puede deducir que toma como entradas, el flujo de agua fría que proviene del *Diverter* y el flujo que viene del almacenamiento, junto con sus respectivas temperaturas.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Temperature at inlet 1	20.0	C	More...		
2	Flow rate at inlet 1	100.0	kg/hr	More...		
3	Temperature at inlet 2	20.0	C	More...		
4	Flow rate at inlet 2	100.0	kg/hr	More...		

Fig. 3.23. Parámetros de entrada al **Tee Piece**

Como salida tendrá, el flujo total demandado (m_{total}) que es la suma de la demanda de calefacción y de acs, a una temperatura de agua caliente, que no tiene porque ser la temperatura demandada.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Outlet temperature	C	More...	<input type="checkbox"/>		
2	Outlet flow rate	kg/hr	More...	<input type="checkbox"/>		

Fig. 3.24. Variables de salida del **Tee Piece**

Si la temperatura en el almacenamiento no es lo suficientemente elevada como para llegar a la temperatura demandada, el flujo de agua que proviene del agua fría, será cero. Sin embargo, si la temperatura del almacenamiento es demasiado elevada, este caudal no será cero, y se obtendrá a la salida de este *Tee piece* el total de la demanda cubierta.

3.2.8. Sistema auxiliar



TYPE6

Esta herramienta sirve para aportar el calor necesario al sistema cuando este no puede suplir toda la demanda. Los parámetros usados para la caracterización de esta herramienta son los siguientes:

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Maximum heating rate	10000				kJ/hr
2	Specific heat of fluid	4.19				kJ/kg.K
3	Overall loss coefficient for heater during operation	0.0				kJ/hr.K
4	Efficiency of auxiliary heater	1.0				-

Fig. 3.25. Parámetros de caracterización del **sistema auxiliar**

Se especifica cual es el fluido que se necesita calentar, y además el *Maximum Heating Rate* sirve para el dimensionado del sistema. Hay que dimensionarlo como si no existiera el aporte solar, ya que puede ocurrir que haya varios días sin radiación y el sistema este sin funcionamiento y se debe asegurar que la demanda va a estar cubierta. Por eso, se podrá un ratio de calentamiento mayor que cualquier demanda registrada y así asegurar el suministro.

Esta herramienta toma como entrada el flujo total demandado y la temperatura del fluido a la entrada del dispositivo. Tiene establecido un *Set Point*, que hace que, si la temperatura a la entrada del calentador auxiliar no es igual a la temperatura del set point, salte el sistema auxiliar y aporte energía hasta alcanzar esta temperatura.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Inlet fluid temperature	20.0				C
2	Fluid mass flow rate	100.0				kg/hr
3	Control Function	1				-
4	Set point temperature	40				C
5	Temperature of surroundings	20.0				C

Fig. 3.26. Parámetros de entrada del **sistema auxiliar**

Por lo tanto, la temperatura del *set point* será la temperatura que tenga como salida, y el flujo a la salida será el mismo que a la entrada. La temperatura del set point variará según el sistema de calefacción usado, y se tendrá entonces que variar en cada simulación realizada para los distintos sistemas de calefacción.

Gracias a este elemento, se verá cual es la energía aportada por el sistema auxiliar en cada momento y poder compararla con la energía demandada para obtener la demanda cubierta por la energía solar.

3.2.9. Cálculo de f



f

Por último, se tiene la calculadora de demanda cubierta. Esta calculadora toma como entrada el cálculo de la demanda total de energía, y también la temperatura a la salida del *Tee Piece*. Con estas entradas, se establece una serie de cálculos en ella, como por ejemplo la energía que necesita aportar el sistema auxiliar. Se hace para ello el siguiente cálculo:

$$Q_{aux} = m_{total} * Cp * (T_{caliente} - T_{acs})$$

El porcentaje de demanda cubierta será entonces:

$$f = 1 - \frac{Q_{aux}}{Q_{total}}$$

Estos cálculos serán hora a hora y se exportarán a un documento de Excel para su posterior análisis. También se representarán gráficamente para ver mejor visualmente cual es la evolución del sistema en el tiempo.

4 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado, se analizará el comportamiento del sistema ante distintas situaciones. Con esto se busca establecer que variable tiene mayor importancia a la hora de obtener mayor cobertura solar, además de ver cual es la demanda cubierta en cada una de estas situaciones para, finalmente, determinar que configuración del sistema se elegirá.

4.1. Datos de partida

Como se ha esbozado en el apartado anterior, para que la simulación llevada a cabo se asemeje al comportamiento que tendría una instalación real de este tipo, se deben de caracterizar los elementos del sistema.

Para cada uno de los elementos se fijarán unos parámetros característicos y unas variables de partida.

Para comenzar, el archivo de *Deman_calef* tiene como unidad el kWh, y en nuestro sistema, los balances energéticos son en kJ/h. Para que la salida de este archivo me de en las unidades correctas, lo multiplicamos por un factor de 3.6.

Un dato inicial importante es el de la temperatura del tanque de almacenamiento. El nodo superior comenzará en una t^a de 60 °C. Esto hará que, aunque las primeras horas del mes de enero no haya mucha radiación, el factor de demanda cubierta sea alto, como consecuencia de que la temperatura a la que esta la acumulación es mayor que la requerida. Mientras que el nodo inferior, comienza a una temperatura de 15 °C. Otros parámetros que caracterizan el almacenamiento son el fluido de trabajo, que se especifica indicando su C_p (en este caso, como se trabaja con agua, $C_p= 4,19 \text{ Kj/kgK}$), también se especifica su densidad (1000 kg/m³) y el coeficiente de pérdidas (2.5 kJ/hr*m²*K).

Los captadores se caracterizan con el número de paneles que se pondrán en serie (1), el fluido de trabajo ($C_p=4.19 \text{ kJ/kgK}$), el ángulo de incidencia de la radiación sobre el panel (45°C) y la eficiencia de captación (0.8)

Por último, la caldera auxiliar, se parametriza fijando el *Maximum heating rate* (10000 kJ/h) y el fluido de trabajo ($C_p=4,19 \text{ kJ/kgK}$).

4.2. Introducción a las simulaciones realizadas

Uno de los objetivos de este proyecto es diseñar una instalación solar, en base a una optimización de su tamaño a través de criterios económicos. Se quiere ver cual es el estado en que se encuentran estas instalaciones actualmente y establecer en cuantos años estas instalaciones serán realmente interesantes y competitivas en el mercado.

Previo al estudio económico de las distintas posibilidades de configuración, se debe hacer un análisis de las simulaciones realizadas para distintas situaciones. De esta manera, se podrá ver cual es el factor de demanda cubierta en cada una de ellas y ver en que medida se ahorra en gas natural.

Las dos variables que tienen una mayor importancia en el comportamiento de la instalación son el área de captación y el volumen de acumulación del tanque, lo que tiene como consecuencia, que las principales variables estudiadas sean estas. Las distintas situaciones que se van a tener en cuenta en las simulaciones son las siguientes:

En primer lugar, se considerará la demanda proporcionada originalmente. Primero se simulará el sistema durante 48 h para ver detalladamente su comportamiento y dar explicación a aquellos resultados que pueden dar lugar a una comprensión equivocada del funcionamiento. La segunda simulación comprenderá un año completo, con un paso de tiempo entre los resultados de las variables de una hora. Dentro de este estudio vamos a hacer varias simulaciones: en una de ellas, se variará el área de captación, llevando esta variable desde 2 m², que es lo que suele tener un captador solar plano de superficie, hasta 150 m², que será el valor con el que se alcance una cobertura solar de la demanda del 100%. Todo esto, se hará manteniendo el valor del volumen del tanque en 500 litros. En otra, lo que se variará será el volumen de acumulación, desde 500 litros hasta 1500 litros, esta vez, manteniendo el área de captación. Las últimas de las simulaciones será un análisis de sensibilidad, que se hará variando ambos parámetros simultáneamente, para ver cuales son todas las posibles variables de comportamiento (tendremos todas las posibles combinaciones que puede tener la instalación) para posteriormente escoger aquella que mejor convenga.

Lo que se busca, es analizar cual de las dos variables tiene una mayor influencia en la demanda cubierta. Esto ayudará, a la hora de optimizar, saber que variable escoger para que, con un menor aumento de esta, tenga un mayor incremento en el factor de demanda cubierta, y así poder alcanzar una mayor rentabilidad en un menor número de años.

En segundo lugar, se considerará una demanda de calefacción reducida en un 10% con respecto a la inicial. Se busca analizar si, una mejora en los cerramientos y en el aislamiento de la vivienda merece la pena para que se reduzca el tamaño de la instalación o a mismo tamaño, aumente la demanda cubierta por el sol. Este análisis se hará ya directamente sobre el año completo y variando ambos parámetros simultáneamente, ya que el objetivo es hacer una comparación con los resultados de la simulación con la demanda inicial.

En tercer y último lugar, se analizará como afecta al comportamiento de la instalación, cambiar el sistema de calefacción usado, variando el suelo radiante usado en el resto de las simulaciones por un sistema de radiadores de baja temperatura (que trabajan a una temperatura de 60°C) y por un sistema de fancoils (que trabajan a 50°C). El objetivo es comparar los resultados de los 3 sistemas de calefacción y ver de que manera se ve perjudicado el sistema en el caso de aumentar la temperatura a

la que se impulsa el agua.

4.3. Simulación con la demanda energética inicial

4.3.1. Simulación de 48 h

Para poder ver más detalladamente como evolucionan cada una de las variables en la simulación, se hará una simulación de solamente 48 horas. No se toman las primeras 48 h del año, porque la demanda de calefacción tarda varios días en normalizarse, y podría dar lugar a equivocación.

La simulación mostrada es de una instalación de 2 m² y 500 litros de acumulación durante 48 horas y estos son los resultados:

FECHA	HORA	Caudal total demandado (m_total)	Tmezcla	T_entrada tanque (T1)	Caudal entrada tanque (m_1)	T a consumo (T2)	Caudal a consumo (T2)
-	-	kg/h	°C	°C	kg/hr	°C	kg/hr
04/01/2015	1:00	0.00	0.00	20.00	100.00	0.00	20.00
	2:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	7:00	36.00	8.00	8.00	23.34	8.00	12.66
	8:00	36.00	8.00	8.00	24.84	8.00	11.16
	9:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	10:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	11:00	18.00	8.00	8.00	13.17	8.00	4.83
	12:00	18.00	8.00	8.00	13.68	8.00	4.32
	13:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	14:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	15:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	16:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	17:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	18:00	18.00	8.00	8.00	14.55	8.00	3.45
	19:00	18.00	8.00	8.00	15.09	8.00	2.91
	20:00	18.00	8.00	8.00	15.61	8.00	2.39
	21:00	18.00	8.00	8.00	16.09	8.00	1.91
	22:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	23:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 4.1. Variables de la instalación las primeras 24 horas (1)

Diseño y dimensionado de una instalación de calefacción y ACS mediante energía solar térmica para una vivienda unifamiliar

FECHA	HORA	Caudal total demandado (m_total)	Tmezcla	T_entrada tanque (T1)	Caudal entrada tanque (m_1)	T a consumo (T2)
-	-	kg/h	°C	°C	kg/hr	°C
05/01/2015	1:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	7:00	36.00	8.00	8.00	34.59	8.00
	8:00	49.53	14.01	14.01	49.53	14.01
	9:00	4.78	30.00	30.00	4.78	30.00
	10:00	0.42	30.00	30.00	0.42	30.00
	11:00	18.00	8.00	8.00	18.00	8.00
	12:00	18.00	8.00	8.00	18.00	8.00
	13:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	14:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	15:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	16:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	17:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	18:00	18.00	8.00	8.00	18.00	8.00
	19:00	18.00	8.00	8.00	18.00	8.00
	20:00	18.00	8.00	8.00	18.00	8.00
	21:00	18.00	8.00	8.00	18.00	8.00
	22:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	23:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 4.2. Variables de la instalación las segundas 24 horas (1)

FECHA	HORA	m bomba	ghi	T_entrada_cap	T_sal_cap	SaltoTª captadores	Caudal salida tanque	T tanque
-	-	kg/hr	kJ/h m2	°C	°C	°C	kg/hr	°C
04/01/2015	1:00	0.00	0.00	15.00	20.00	5.00	0.00	60.00
	2:00	0.00	0.00	15.01	10.40	-4.61	0.00	59.88
	3:00	0.00	0.00	15.04	9.60	-5.44	0.00	59.64
	4:00	0.00	0.00	15.07	8.80	-6.27	0.00	59.40
	5:00	0.00	0.00	15.10	8.00	-7.10	0.00	59.17
	6:00	0.00	0.00	15.13	7.15	-7.98	0.00	58.93
	7:00	0.00	0.00	14.25	6.30	-7.95	23.34	57.32
	8:00	0.00	0.00	12.72	5.50	-7.22	24.84	54.38
	9:00	0.00	0.00	12.09	4.70	-7.39	0.00	52.85
	10:00	200.00	360.00	14.08	15.26	1.18	0.00	52.66
	11:00	0.00	1011.60	14.48	101.48	87.01	13.17	51.72
	12:00	200.00	1454.40	17.49	22.58	5.09	13.68	50.06
	13:00	200.00	1868.40	22.96	29.35	6.39	0.00	49.16
	14:00	200.00	1980.00	27.72	34.46	6.74	0.00	48.99
	15:00	200.00	1854.00	31.70	37.98	6.28	0.00	48.81
	16:00	200.00	1508.40	35.15	39.85	4.70	0.00	48.64
	17:00	0.00	734.40	36.14	77.02	40.88	0.00	48.47
	18:00	0.00	187.20	33.73	28.80	-4.94	14.55	47.59
	19:00	0.00	0.00	29.48	12.61	-16.87	15.09	46.14
	20:00	0.00	0.00	25.83	12.21	-13.61	15.61	44.88
	21:00	0.00	0.00	22.72	11.75	-10.97	16.09	43.78
	22:00	0.00	0.00	21.33	11.25	-10.08	0.00	43.21
	23:00	0.00	0.00	21.32	10.75	-10.57	0.00	43.07
	0:00	0.00	0.00	21.31	10.25	-11.06	0.00	42.93

Tabla 4.3. Variables de la instalación las primeras 24h (2)

Diseño y dimensionado de una instalación de calefacción y ACS mediante energía solar térmica para una vivienda unifamiliar

FECHA	HORA	m_bomba	ghi	T_entrada_cap	T_sal_cap	SaltoT ² captadores	Caudal salida tanque	T_tanque
-	-	kg/hr	kJ/h m ²	°C	°C	°C	kg/hr	°C
05/01/2015	1:00	0.00	0.00	21.31	9.78	-11.53	0.00	42.80
	2:00	0.00	0.00	21.30	9.45	-11.85	0.00	42.66
	3:00	0.00	0.00	21.29	9.10	-12.19	0.00	42.52
	4:00	0.00	0.00	21.28	8.75	-12.53	0.00	42.39
	5:00	0.00	0.00	21.28	8.40	-12.88	0.00	42.26
	6:00	0.00	0.00	21.27	8.05	-13.22	0.00	42.12
	7:00	0.00	0.00	18.86	7.70	-11.16	34.59	41.29
	8:00	0.00	0.00	16.10	7.34	-8.75	49.53	39.73
	9:00	0.00	0.00	15.56	6.97	-8.60	4.78	38.88
	10:00	200.00	291.60	17.09	18.01	0.92	0.42	38.70
	11:00	0.00	705.60	16.82	66.82	50.00	18.00	38.32
	12:00	200.00	522.00	15.82	16.45	0.64	18.00	37.70
	13:00	0.00	1065.60	15.79	77.72	61.93	0.00	37.35
	14:00	200.00	1022.40	18.74	20.80	2.06	0.00	37.24
	15:00	0.00	1540.80	20.10	123.30	103.21	0.00	37.14
	16:00	200.00	932.40	21.75	24.00	2.25	0.00	37.04
	17:00	0.00	475.20	22.50	42.96	20.46	0.00	36.93
	18:00	0.00	118.80	21.03	17.83	-3.21	18.00	36.57
	19:00	0.00	0.00	18.50	12.18	-6.33	18.00	35.94
	20:00	0.00	0.00	16.48	11.66	-4.82	18.00	35.28
	21:00	0.00	0.00	14.85	11.10	-3.75	18.00	34.58
	22:00	0.00	0.00	14.17	10.50	-3.67	0.00	34.19
	23:00	0.00	0.00	14.21	9.95	-4.26	0.00	34.10
	0:00	0.00	0.00	14.24	9.40	-4.84	0.00	34.02

Tabla 4.4. Variables de la instalación de las segundas 24h (2)

FECHA	HORA	T_salida (entrada a aux)	Demanda cubierta	Demanda_Total	f
-	-	°C	kJ/h	kJ/h	-
05/01/2015	1:00	42.81	0.00	0.00	0.00
	2:00	42.81	0.00	0.00	0.00
	3:00	42.81	0.00	0.00	0.00
	4:00	42.81	0.00	0.00	0.00
	5:00	42.81	0.00	0.00	0.00
	6:00	42.81	0.00	0.00	0.00
	7:00	39.99	4813.39	4815.36	1.00
	8:00	39.73	5325.68	5381.06	0.99
	9:00	38.88	177.45	199.85	0.89
	10:00	38.70	15.09	17.36	0.87
	11:00	38.32	2281.09	2407.68	0.95
	12:00	37.70	2234.59	2407.68	0.93
	13:00	37.06	0.00	0.00	0.00
	14:00	37.06	0.00	0.00	0.00
	15:00	37.06	0.00	0.00	0.00
	16:00	37.06	0.00	0.00	0.00
	17:00	37.06	0.00	0.00	0.00
	18:00	36.57	2149.50	2407.68	0.89
	19:00	35.94	2102.27	2407.68	0.87
	20:00	35.28	2052.19	2407.68	0.85
	21:00	34.58	1999.58	2407.68	0.83
	22:00	33.85	0.00	0.00	0.00
	23:00	33.85	0.00	0.00	0.00
	0:00	33.85	0.00	0.00	0.00

Tabla 4.5. Variables de la instalación las primeras 24 h (3)

Diseño y dimensionado de una instalación de calefacción y ACS mediante energía solar térmica para una vivienda unifamiliar

FECHA	HORA	T salida (entrada a aux)	Demanda cubierta	Demanda Total	f
-	-	°C	kJ/h	kJ/h	-
04/01/2015	1:00	20.00	0.00	0.00	0.00
	2:00	56.60	0.00	0.00	0.00
	3:00	56.60	0.00	0.00	0.00
	4:00	56.60	0.00	0.00	0.00
	5:00	56.60	0.00	0.00	0.00
	6:00	56.60	0.00	0.00	0.00
	7:00	39.98	4811.62	4815.36	1.00
	8:00	40.00	4815.05	4815.36	1.00
	9:00	51.28	0.00	0.00	0.00
	10:00	51.28	0.00	0.00	0.00
	11:00	39.99	2406.99	2407.68	1.00
	12:00	39.98	2405.99	2407.68	1.00
	13:00	48.37	0.00	0.00	0.00
	14:00	48.37	0.00	0.00	0.00
	15:00	48.37	0.00	0.00	0.00
	16:00	48.37	0.00	0.00	0.00
	17:00	48.37	0.00	0.00	0.00
	18:00	39.99	2406.97	2407.68	1.00
	19:00	39.98	2406.34	2407.68	1.00
	20:00	39.99	2406.58	2407.68	1.00
	21:00	39.99	2406.80	2407.68	1.00
	22:00	42.81	0.00	0.00	0.00
	23:00	42.81	0.00	0.00	0.00
	0:00	42.81	0.00	0.00	0.00

Tabla 4.6. Variables de la instalación las segundas 24 h (3)

La primera variable es el caudal demandado. En el primer día simulado se puede apreciar que no hay demanda de calefacción y simplemente la instalación requiere el caudal de ACS que es a algunas horas 36 kg/h y a otras la mitad. En el segundo día si se tiene una pequeña demanda de calefacción y la variable varia de los valores dichos.

La temperatura de mezcla es aquella que tiene lugar del caudal de agua fría a la temperatura de agua de red y el caudal de retorno de la calefacción. Cuando no hay demanda, la T_{mezcla} es 0, cuando solo hay demanda de ACS, la temperatura es la temperatura del agua de red en ese mes, cuando únicamente hay demanda de calefacción, la temperatura es la de retorno de calefacción (en este caso 30°C), y cuando hay ambas demandas, se obtiene una temperatura intermedia.

Los siguientes parámetros que tenemos son tanto el caudal como la temperatura de los dos flujos que salen del *Diverter*. Si se observa la temperatura del tanque, cuando esta es superior a 40°C (que es la temperatura a la que tenemos la demanda), hay una parte del caudal que pasa por el tanque y otra parte que va directamente al consumo. Sin embargo, si la temperatura es menor de 40 será necesario que todo el caudal pase por el tanque, para que se alcance la mayor temperatura posible y el aporte del sistema auxiliar sea el mínimo.

Si se analiza el comportamiento del caudal que pasa por la bomba, se puede dar la siguiente explicación: en las horas de la madrugada, el salto de temperaturas en captadores es siempre negativo, por lo tanto, como la bomba cambia ON/OFF según el ciclo de histéresis que se ha descrito en el apartado anterior, el caudal que circula es 0, ya que la bomba se apaga para que la circulación de agua a estas horas no enfríe la temperatura conseguida en el almacenamiento durante el día. También se pone a 0 el caudal cuando hay gran cantidad de radiación y se obtiene un salto de temperaturas muy grande.

La evolución de la temperatura del tanque también es una variable importante para analizar. Como bien se ha dicho, se fija la temperatura de partida del nodo caliente del almacenamiento a 60 °C y es a esa temperatura a la que se encuentra el tanque inicialmente. Como está caracterizado con un coeficiente de pérdidas, se puede ver, como a lo largo de las horas nocturnas tiene una ligera pérdida de temperatura. A medida que la demanda es mayor, la temperatura del tanque va disminuyendo, ya que en estos meses apenas hay radiación y no le da tiempo a calentar el agua más rápidamente de lo que se demanda.

Finalmente, para ver la demanda cubierta, se observa la temperatura de entrada al sistema auxiliar. Al principio la temperatura que le llega es mayor de la demanda, y por eso se cubre toda la demanda energética. Sin embargo, ya en el segundo día, como ha disminuido la temperatura del tanque, la temperatura empieza a bajar por debajo de los 40 °C y el factor de demanda cubierta deja de ser 1.

4.3.2. Simulación del año completo

Para un estudio general del comportamiento de la instalación ante el cambio de variables, se hará una simulación del año completo, para ver el factor de demanda cubierta de cada mes, y el global del año. Con esos valores como números índices, se determinará que variable tiene una mayor influencia en la mejora de la cobertura solar.

Este análisis ayudará, al final del trabajo, a determinar cual es la mejor opción de configuración de la instalación.

4.3.2.1. Variando m² de captación

Para saber cual es la importancia de cada una de las variables en la instalación, se analiza como se comporta si se varía uno de esos parámetros. En este caso, comenzamos variando el área de captación.

La primera simulación ha sido con un área mínima de captación, que es de 2 m². El factor de demanda cubierta obtenido para los distintos meses es el siguiente:

	Demanda mensual (kJ/mes)		
	Demanda total	Demanda cubierta	f
Enero	1929068.73	492635.58	0.26
Febrero	1197821.36	422679.60	0.35
Marzo	932978.96	570844.63	0.61
Abril	622705.22	490406.84	0.79
Mayo	611064.17	514956.27	0.84
Junio	564300.00	499293.89	0.88
Julio	559785.60	543717.81	0.97
Agosto	583110.00	566949.89	0.97
Septiembre	586872.00	570512.50	0.97
Octubre	630216.89	537638.38	0.85
Noviembre	838247.83	377046.41	0.45
Diciembre	1869358.93	435605.19	0.23

Tabla 4.7. Factor de demanda cubierta para 2m²

Se puede observar que esta área de captación puede ser útil para viviendas que solo demanden agua caliente, ya que tiene un factor de demanda cubierta aceptable, para los meses en que la demanda de calefacción disminuye o se hace nula. Sin embargo, es muy baja en los meses de demanda de calefacción + ACS, ya que aparte de que la demanda total es bastante mayor, la radiación es baja

Para 4 m² los resultados obtenidos son:

	Demanda mensual (kJ/mes)		
	Demanda cubierta	Demanda total	f
Enero	961665.2482	1929068.73	0.50
Febrero	822545.69	1197821.36	0.69
Marzo	770011.2376	932978.96	0.83
Abril	621918.9713	622705.22	1.00
Mayo	610822.4531	611064.17	1.00
Junio	564182.076	564300.00	1.00
Julio	559671.7021	559785.60	1.00
Agosto	582990.3079	583110.00	1.00
Septiembre	586750.0213	586872.00	1.00
Octubre	629908.2395	630216.89	1.00
Noviembre	667285.9561	838247.83	0.78
Diciembre	828335.8227	1869358.93	0.44

Tabla 4.8. Factor de demanda cubierta para 4m²

Para 6 m², obtenemos lo siguiente:

	Demanda mensual (kJ/mes)		
	Demanda cubierta	Demanda total	f
Enero	1266208.782	1929068.73	0.66
Febrero	998065.1344	1197821.36	0.83
Marzo	818221.9275	932978.96	0.88
Abril	622564.0653	622705.22	1.00
Mayo	610942.0659	611064.17	1.00
Junio	564199.5106	564300.00	1.00
Julio	559708.1453	559785.60	1.00
Agosto	583027.9938	583110.00	1.00
Septiembre	586777.1772	586872.00	1.00
Octubre	630103.3287	630216.89	1.00
Noviembre	755663.3786	838247.83	0.90
Diciembre	1083717.026	1869358.93	0.58

4.9. Factor de demanda cubierta para 6 m²

Para 8 m²:

	Demanda mensual (kJ/mes)		
	Demanda cubierta	Demanda total	f
Enero	1438680.76	1929068.73	0.75
Febrero	1081255.662	1197821.36	0.90
Marzo	839260.8712	932978.96	0.90
Abril	622586.1555	622705.22	1.00
Mayo	610970.4075	611064.17	1.00
Junio	564223.482	564300.00	1.00
Julio	559721.692	559785.60	1.00
Agosto	583018.4988	583110.00	1.00
Septiembre	586741.5833	586872.00	1.00
Octubre	630121.848	630216.89	1.00
Noviembre	795387.9455	838247.83	0.95
Diciembre	1231913.23	1869358.93	0.66

Tabla 4.10. Factor de demanda cubierta para 8 m²

8m² sería la dimensión de 4 captadores aproximadamente. Es un tamaño aceptable para situarlo en la cubierta de una vivienda unifamiliar. Además, se obtiene, para la mayoría del año, un factor de demanda cubierta de 1. Solo los meses de diciembre y enero se obtiene un valor más bajo, pero es normal debido a la escasez de radiación y a la gran demanda, propiciada por unas temperaturas muy bajas en el exterior.

A medida que se superan medidas por encima de estos 8 m², nos damos cuenta de que la f empieza a alcanzar unos valores asintóticos, sin alcanzar nunca a ser 1 en todos los meses del año.

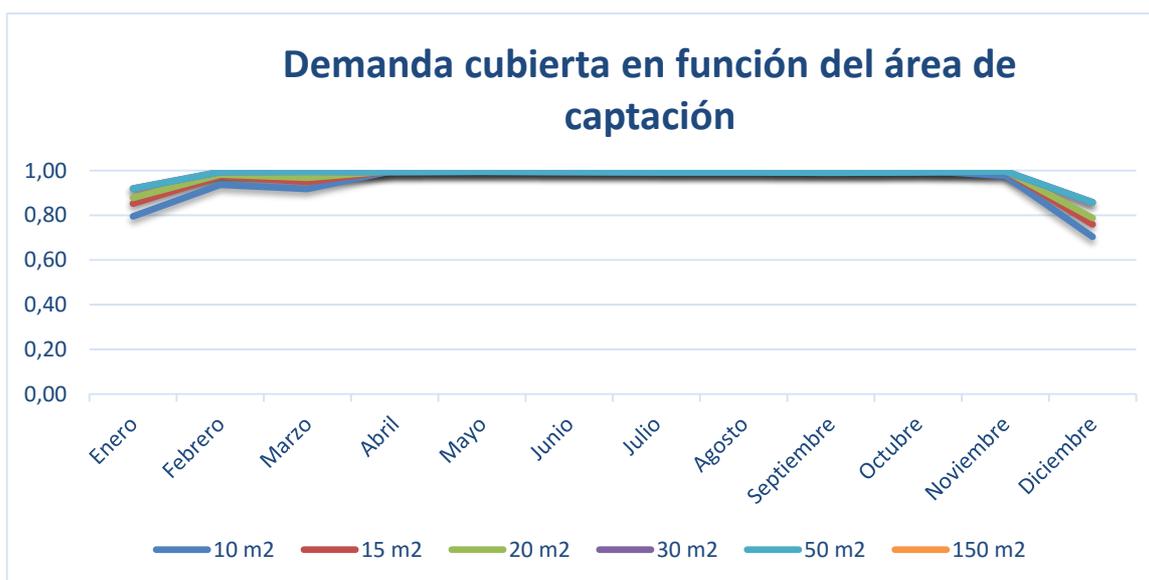


Fig. 4.1. Evolución de f en función del área de captación

	f					
	10 m ²	15 m ²	20 m ²	30 m ²	50 m ²	150 m ²
Enero	0.80	0.85	0.88	0.90	0.92	0.94
Febrero	0.94	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00
Marzo	0.92	0.95	0.97	0.99	0.99	0.99
Abril	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
Mayo	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
Junio	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
Julio	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99
Agosto	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
Septiembre	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98
Octubre	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
Noviembre	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Diciembre	0.70	0.76	0.79	0.83	0.86	0.87

Tabla 4.11. Factor de demanda cubierta para $>8 \text{ m}^2$

Aunque se aumente drásticamente el área de captación, como lo sería con 150 m^2 , los meses de invierno no se alcanza un 1 de factor de demanda cubierta. Se debe a que el volumen de acumulación es pequeño y aunque aumente el área, si no aumento el volumen del tanque, no se podrá almacenar toda la energía captada en forma de agua caliente.

En definitiva, se toma como conclusión, que es más ventajoso trabajar entre áreas de captación que se muevan entre 2 m^2 y 8 m^2 , ya que es en el rango donde mayor mejoría se alcanza cuando aumentamos la captación.

Todos los datos representados en una misma tabla para ver su evolución:

	f ₂	f ₄	f ₆	f ₈	f ₁₀	f ₁₅	f ₂₀	f ₃₀	f ₅₀	f ₁₅₀
Enero	0.26	0.5	0.66	0.75	0.8	0.85	0.88	0.9	0.92	0.94
Febrero	0.35	0.69	0.83	0.9	0.94	0.97	0.98	0.99	0.99	1
Marzo	0.61	0.83	0.88	0.9	0.92	0.95	0.97	0.99	0.99	0.99
Abril	0.79	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99
Mayo	0.84	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99
Junio	0.88	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99
Julio	0.97	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99	0.99
Agosto	0.97	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99
Septiembre	0.97	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.98
Octubre	0.85	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99
Noviembre	0.45	0.78	0.9	0.95	0.98	1	1	1	1	1
Diciembre	0.23	0.44	0.58	0.66	0.7	0.76	0.79	0.83	0.86	0.87

Tabla 4.12. Factor de demanda cubierta para todas las áreas

Para ser más exhaustivos en el análisis, se verá en que proporción mejora el factor de demanda cubierta cuando aumentamos el área de captación.

	Porcentaje de mejora con respecto a f_2			
	f_4	f_6	f_8	f_{10}
Enero	95%	157%	192%	211%
Febrero	95%	136%	156%	165%
Marzo	35%	43%	47%	50%
Abril	27%	27%	27%	27%
Mayo	19%	19%	19%	19%
Junio	13%	13%	13%	13%
Julio	3%	3%	3%	3%
Agosto	3%	3%	3%	3%
Septiembre	3%	3%	3%	3%
Octubre	17%	17%	17%	17%
Noviembre	72%	100%	111%	117%
Diciembre	90%	149%	183%	202%

Tabla 4.13. Porcentaje de mejora con respecto a f_2

Lo que la tabla pretende mostrar es que, por ejemplo, en el caso de 4 m^2 , la f es un 95% superior a la f para dos 2 m^2 y así sucesivamente.

Es interesante saber, cual es el porcentaje de mejora cuando aumento el área con respecto a la inmediatamente anterior, y por eso mostramos las siguientes tablas:

	% de mejora con respecto a f_4		
	f_6	f_8	f_{10}
Enero	32%	50%	59%
Febrero	21%	31%	36%
Marzo	6%	9%	11%
Abril	0%	0%	0%
Mayo	0%	0%	0%
Junio	0%	0%	0%
Julio	0%	0%	0%
Agosto	0%	0%	0%
Septiembre	0%	0%	0%
Octubre	0%	0%	0%
Noviembre	16%	22%	26%
Diciembre	31%	49%	59%

Tabla 4.14. Porcentaje de mejora con respecto a f_4

	% mejora	
	f_8	f_{10}
Enero	14%	21%
Febrero	8%	12%
Marzo	3%	5%
Abril	0%	0%
Mayo	0%	0%
Junio	0%	0%
Julio	0%	0%
Agosto	0%	0%
Septiembre	0%	0%
Octubre	0%	0%
Noviembre	5%	8%
Diciembre	14%	21%

Tabla 4.15. Porcentaje de mejora con respecto a f_6

	% mejora
	f_{10}
Enero	7%
Febrero	4%
Marzo	2%
Abril	0%
Mayo	0%
Junio	0%
Julio	0%
Agosto	0%
Septiembre	0%
Octubre	0%
Noviembre	3%
Diciembre	7%

Tabla 4.16. Porcentaje de mejora con respecto a f_8

Se observa que el porcentaje de mejora más atractivo se obtiene cuando se aumenta el área de 2 m² a 4 m².

4.3.2.2. Variando m³ de acumulación

Ahora, manteniendo el área de captación fija en 2 m², se irá variando los m³ de acumulador en el rango entre 500 litros y 1500 litros.

	f _{0.5}	f _{0.7}	f ₁	f _{1.5}
Enero	0.27	0.28	0.28	0.29
Febrero	0.38	0.38	0.37	0.37
Marzo	0.64	0.64	0.62	0.61
Abril	0.85	0.85	0.83	0.81
Mayo	0.88	0.89	0.88	0.83
Junio	0.95	0.95	0.94	0.92
Julio	0.99	0.99	0.99	0.97
Agosto	0.99	1.00	1.00	0.99
Septiembre	1.00	1.00	1.00	0.99
Octubre	0.90	0.92	0.92	0.91
Noviembre	0.48	0.49	0.49	0.48
Diciembre	0.25	0.26	0.26	0.25

Tabla 4.17. Factor de demanda cubierta para distintos volúmenes

Se observa que, ante la variación de este parámetro, el incremento de la demanda cubierta no se ve muy afectada. Esto se debe a que, cuando se aumenta el volumen de acumulación, aumenta un poco la demanda cubierta, por que aumentan los litros de agua que podemos calentar, entonces, cuando la acumulación es pequeña, ocurre que el deposito alcanza una mayor temperatura más rápidamente, entonces, como la bomba funciona cuando la diferencia de temperatura no supera 100 °C y cuando es mayor de 0 °C, entonces en un deposito pequeño, se alcanza antes esta temperatura y no se utiliza más la radiación, sin embargo si se aumentan los litros, aumenta la inercia del deposito y la cantidad de agua que se tiene que calentar, entonces la bomba funcionara durante más tiempo y se aprovechará una mayor parte de la radiación solar.

Sin embargo, la f no aumenta tanto porque, al mantener el área de captación en 2 m², tiene un área muy limitada para recibir radiación, entonces 2 m² de captación no tienen la capacidad de calentar un gran volumen de acumulación, de hecho, en el caso de instalaciones de agua caliente sanitaria existe una relación entre el volumen de acumulación y el área de captación que es la siguiente:

$$50 < V/A < 100$$

Con esto se obtendría, para un área dada, el volumen máximo y mínimo recomendado.

4.3.2.3. Variando ambas variables

Una vez analizadas las variables más significativas de la instalación por separado, se realizará un análisis de sensibilidad. Se verá la respuesta que da la instalación cuando se varíen ambos parámetros, de esta manera se podrá establecer que combinación es la más ventajosa para satisfacer la mayor parte de la demanda.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

	0.5 m ³				
	2 m ²	4 m ²	6 m ²	8 m ²	10 m ²
Enero	0.27	0.53	0.70	0.80	0.86
Febrero	0.38	0.73	0.88	0.94	0.97
Marzo	0.64	0.85	0.92	0.94	0.96
Abril	0.85	1.00	1.00	1.00	1.00
Mayo	0.88	1.00	1.00	1.00	1.00
Junio	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00
Julio	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
Agosto	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
Septiembre	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Octubre	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00
Noviembre	0.48	0.84	0.94	0.98	1.00
Diciembre	0.25	0.48	0.63	0.72	0.77

Tabla 4.18. Demanda cubierta para 0.5 m³ y distintas áreas

	0.7 m ³				
	2 m ²	4 m ²	6 m ²	8 m ²	10 m ²
Enero	0.28	0.54	0.71	0.82	0.88
Febrero	0.38	0.73	0.90	0.96	1.00
Marzo	0.64	0.87	0.95	0.97	0.99
Abril	0.85	1.00	1.00	1.00	1.00
Mayo	0.89	1.00	1.00	1.00	1.00
Junio	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00
Julio	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
Agosto	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Septiembre	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Octubre	0.92	1.00	1.00	1.00	1.00
Noviembre	0.49	0.85	0.96	1.00	1.00
Diciembre	0.26	0.49	0.65	0.75	0.81

Tabla 4.19. Demanda cubierta para 0.7 m³ y distintas areas

	1 m ³				
	2 m ²	4 m ²	6 m ²	8 m ²	10 m ²
Enero	0.28	0.54	0.73	0.84	0.90
Febrero	0.37	0.75	0.91	0.99	1.00
Marzo	0.62	0.89	0.98	1.00	1.00
Abril	0.83	1.00	1.00	1.00	1.00
Mayo	0.88	1.00	1.00	1.00	1.00
Junio	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00
Julio	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
Agosto	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Septiembre	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Octubre	0.92	1.00	1.00	1.00	1.00
Noviembre	0.49	0.87	0.98	1.00	1.00
Diciembre	0.26	0.50	0.67	0.78	0.85

Tabla 4.20. Demanda cubierta para 1 m³ y distintas áreas

	1.5 m ³				
	2 m ²	4 m ²	6 m ²	8 m ²	10 m ²
Enero	0.29	0.54	0.74	0.86	0.92
Febrero	0.37	0.74	0.93	1.00	1.00
Marzo	0.61	0.91	1.00	1.00	1.00
Abril	0.81	1.00	1.00	1.00	1.00
Mayo	0.83	1.00	1.00	1.00	1.00
Junio	0.92	1.00	1.00	1.00	1.00
Julio	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00
Agosto	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
Septiembre	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
Octubre	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00
Noviembre	0.48	0.88	1.00	1.00	1.00
Diciembre	0.25	0.50	0.69	0.82	0.89

Tabla 4.21. Demanda cubierta para 1.5 m³ y distintas áreas

Desde el principio, se ha delimitado el rango del área de captación entre 2 m² y 10 m², y el de volumen de acumulación entre 500 litros y 1500 litros, sin embargo, para el supuesto de no tener un límite económico, es decir, que no importe la inversión y se busque priorizar que todos los meses se cubra la demanda, se ha hecho una simulación para ver a partir de que valores se alcanzaría $f=1$ para todos los meses del año.

El resultado obtenido para la simulación es el siguiente:

	30 m ²		50 m ²	
	1 m ³	1.5 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.98	1.00	1.00	1.00
Febrero	1.00	1.00	1.00	1.00
Marzo	1.00	1.00	1.00	1.00
Abril	1.00	1.00	1.00	1.00
Mayo	1.00	1.00	1.00	1.00
Junio	1.00	1.00	1.00	1.00
Julio	1.00	1.00	1.00	1.00
Agosto	1.00	1.00	1.00	1.00
Septiembre	1.00	1.00	1.00	1.00
Octubre	1.00	1.00	1.00	1.00
Noviembre	1.00	1.00	1.00	1.00
Diciembre	0.95	0.99	0.99	1.00

Tabla 4.22. Configuraciones para una cobertura solar total

Cuando se haga el estudio económico se verá si es mejor moverse entorno a volúmenes de acumulación más grandes, para alcanzar la mayor f posible o aumentar el área con volúmenes más pequeños.

4.4. Simulación con la demanda energética reducida

4.4.1. Simulación del año completo variando ambos parámetros

En esta simulación, lo que se busca es, ver de que manera afectará a la instalación si se redujera la demanda.

Los requerimientos de calefacción de un hogar se pueden disminuir en un 10% con medidas sencillas como mejorar los cerramientos de ventanas y puertas, o mejorar el aislamiento. Esto permitiría que las pérdidas térmicas fueran menores y con ello, que el calor empleado en la calefacción del hogar no se desperdiciara en pérdidas al exterior.

Esta serie de medidas no requieren una gran inversión, pero, si influirían positivamente en el factor de demanda cubierta que proporcione la instalación. Una instalación menor ahora, proporcionará una mayor cobertura, haciendo que sea rentable en menos años.

Aunque a simple vista, se puede ver que esta medida será beneficiosa para nuestro sistema, se hará una simulación para ver como se comporta la instalación y analizar en que medida se mejora la demanda cubierta.

Lo primero será ver cual es el nuevo perfil de demanda de calefacción. Simplemente, se ha reducido la demanda original de calefacción en un 10%.

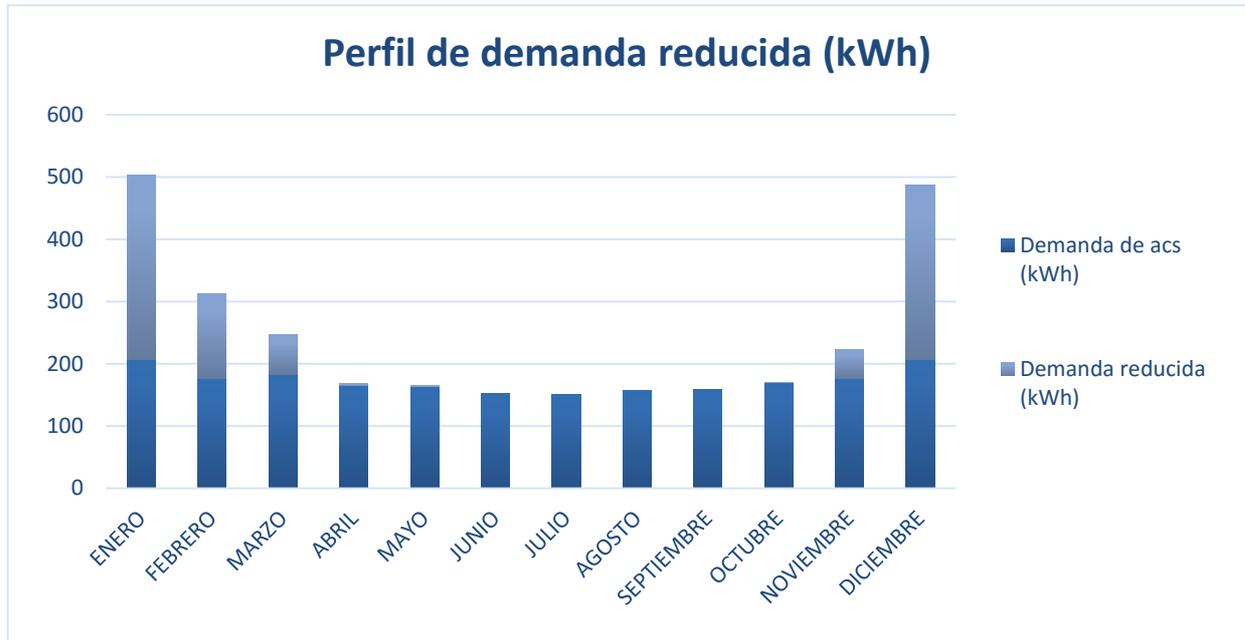


Fig 4.2. Perfil de demanda reducida

En los meses de abril a septiembre, las reducciones en los requerimientos de calefacción no afectan a la demanda total, ya que no hay demanda de calefacción.

Conociendo este nuevo perfil de demanda, se verá como afecta al factor de demanda cubierta. Se hará directamente variando ambos parámetros (área de captación y volumen de acumulación).

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Para un área de captación de 2 m²:

	2 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.29	0.30	0.30	0.31
Febrero	0.39	0.40	0.39	0.39
Marzo	0.66	0.65	0.64	0.63
Abril	0.85	0.85	0.83	0.81
Mayo	0.89	0.89	0.88	0.83
Junio	0.95	0.95	0.94	0.92
Julio	0.99	0.99	0.99	0.97
Agosto	0.99	1.00	1.00	0.99
Septiembre	1.00	1.00	1.00	0.99
Octubre	0.90	0.92	0.92	0.91
Noviembre	0.50	0.50	0.50	0.49
Diciembre	0.27	0.27	0.27	0.27

Tabla 4.23. Factor de demanda cubierta para 2 m² y distintos volúmenes de acumulación

Para 4 m²:

	4 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.56	0.58	0.58	0.58
Febrero	0.76	0.76	0.78	0.78
Marzo	0.87	0.88	0.91	0.93
Abril	1.00	1.00	1.00	1.00
Mayo	1.00	1.00	1.00	1.00
Junio	1.00	1.00	1.00	1.00
Julio	1.00	1.00	1.00	1.00
Agosto	1.00	1.00	1.00	1.00
Septiembre	1.00	1.00	1.00	1.00
Octubre	1.00	1.00	1.00	1.00
Noviembre	0.85	0.86	0.89	0.89
Diciembre	0.50	0.52	0.53	0.52

Tabla 4.24. Factor de demanda cubierta para 4 m² y distintos volúmenes de acumulación

Para 6 m²:

	6 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.73	0.75	0.76	0.77
Febrero	0.90	0.92	0.94	0.95
Marzo	0.93	0.96	0.99	1.00
Abril	1.00	1.00	1.00	1.00
Mayo	1.00	1.00	1.00	1.00
Junio	1.00	1.00	1.00	1.00
Julio	1.00	1.00	1.00	1.00
Agosto	1.00	1.00	1.00	1.00
Septiembre	1.00	1.00	1.00	1.00
Octubre	1.00	1.00	1.00	1.00
Noviembre	0.96	0.98	0.99	1.00
Diciembre	0.66	0.68	0.70	0.72

Tabla 4.25. Factor de demanda cubierta para 6 m² y distintos volúmenes de acumulación

Para 8 m²:

	8 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.83	0.85	0.87	0.88
Febrero	0.96	0.98	1.00	1.00
Marzo	0.95	0.98	1.00	1.00
Abril	1.00	1.00	1.00	1.00
Mayo	1.00	1.00	1.00	1.00
Junio	1.00	1.00	1.00	1.00
Julio	1.00	1.00	1.00	1.00
Agosto	1.00	1.00	1.00	1.00
Septiembre	1.00	1.00	1.00	1.00
Octubre	1.00	1.00	1.00	1.00
Noviembre	0.99	1.00	1.00	1.00
Diciembre	0.74	0.78	0.82	0.86

Tabla 4.26. Factor de demanda cubierta para 8 m² y distintos volúmenes de acumulación

Se obtienen valores de demanda cubierta más elevados que en la simulación con la demanda original. Para ver esta diferencia, en el siguiente apartado se compararán los resultados de ambas simulaciones.

4.4.2. Comparación entre simulación de demanda inicial y reducida

Para ver más claramente esta mejora, se comparará el factor de demanda cubierta cuando la demanda es reducida y cuando la demanda es la original. Se hará para unas determinadas condiciones, simplemente con carácter ilustrativo de la mejora.

	4 m ² y 0.7 m ³	
	f _{demanda reducida}	f _{demanda original}
Enero	0.58	0.54
Febrero	0.76	0.73
Marzo	0.88	0.87
Abril	1.00	1.00
Mayo	1.00	1.00
Junio	1.00	1.00
Julio	1.00	1.00
Agosto	1.00	1.00
Septiembre	1.00	1.00
Octubre	1.00	1.00
Noviembre	0.86	0.85
Diciembre	0.52	0.49

Tabla 4.27. Factor de demanda cubierta nueva VS Factor de demanda cubierta original

Hemos mostrado la comparación para una determinada configuración, para ver, simplemente, en que porcentaje varía la demanda cubierta.

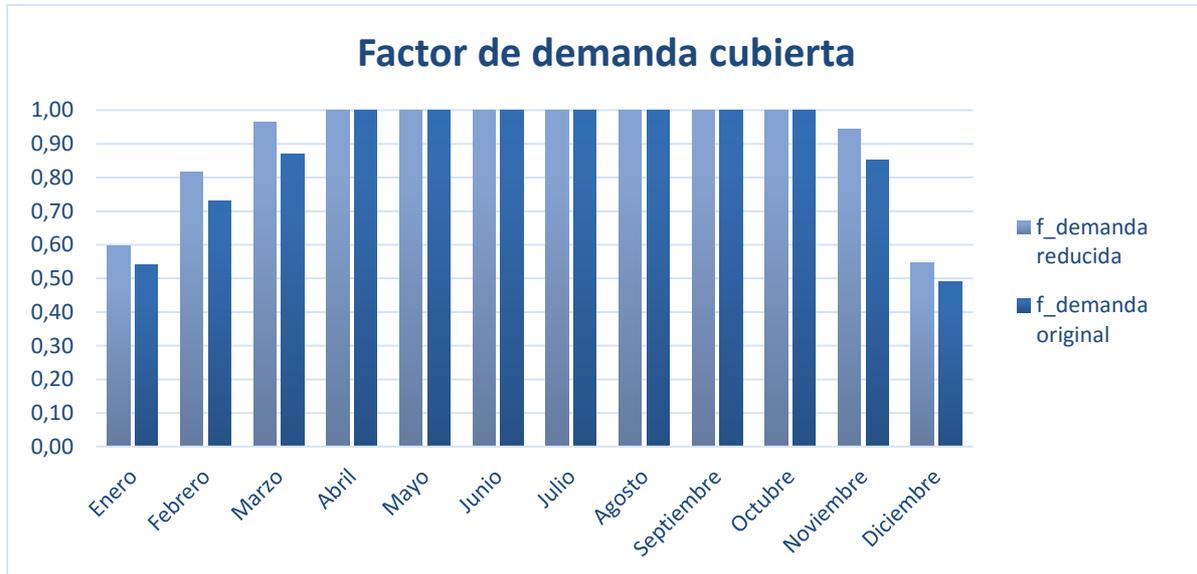


Fig. 4.3. Factor de demanda cubierta nueva VS Factor de demanda cubierta original

Se observa una mejoría mayor en los meses de radiación más baja (Enero, Febrero y Diciembre), esto se debe a que la reducción del 10% en la calefacción se hará más notoria aquí debido a que la demanda es mayor.

Por lo tanto, un edificio con una mejor envolvente, hará un provecho más beneficioso de este tipo de instalaciones.

4.5. Simulación de distintos sistemas de calefacción

Las simulaciones anteriores se han realizado para un mismo sistema de calefacción: el suelo radiante. Como es una instalación que debe de ponerse en la fase de construcción del edificio, no siempre será el sistema de calefacción del que se disponga. Aunque se sabe que es la combinación más ventajosa para un sistema que usa energía solar, en la mayoría de los casos, se tendrán casas ya construidas que dispongan de calefacción a través de radiadores o fan-coils. Por ello, se estudiará en que medida afecta a la instalación y al factor de demanda cubierta el uso de otros modos de calefacción.

4.5.1. Simulación de un año completo para una calefacción mediante fan-coils

Para ver como respondería el sistema de captación a una instalación de calefacción mediante fan-coils, lo que se hará será cambiar la temperatura de impulsión a 50°C y la de retorno a 40°C. También se cambiará la temperatura a la que se demanda el ACS a 50°C, como ya se dijo, por simplificación de la simulación.

El análisis se hará del mismo modo que en las simulaciones anteriores, se realizará un análisis de sensibilidad variando tanto el área de captación como el volumen de acumulación.

Los resultados obtenidos de factor de demanda cubierta son los siguientes:

Para 2 m²:

	2 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.20	0.20	0.20	0.20
Febrero	0.28	0.27	0.27	0.27
Marzo	0.43	0.42	0.42	0.41
Abril	0.53	0.54	0.54	0.52
Mayo	0.53	0.54	0.54	0.53
Junio	0.56	0.57	0.57	0.56
Julio	0.56	0.56	0.56	0.56
Agosto	0.57	0.57	0.57	0.57
Septiembre	0.58	0.58	0.58	0.58
Octubre	0.55	0.56	0.56	0.56
Noviembre	0.33	0.34	0.33	0.33
Diciembre	0.19	0.19	0.19	0.19

Tabla 4.28. Factor de demanda cubierta (2m²) y sistema de calefacción mediante fan-coils

Para 4 m²:

	4 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.27	0.28	0.28	0.28
Febrero	0.37	0.37	0.37	0.37
Marzo	0.46	0.46	0.46	0.46
Abril	0.57	0.57	0.57	0.57
Mayo	0.57	0.57	0.57	0.57
Junio	0.57	0.57	0.57	0.57
Julio	0.56	0.56	0.56	0.56
Agosto	0.57	0.57	0.57	0.57
Septiembre	0.58	0.58	0.58	0.58
Octubre	0.58	0.58	0.58	0.58
Noviembre	0.48	0.49	0.49	0.49
Diciembre	0.26	0.27	0.28	0.28

Tabla 4.29. Factor de demanda cubierta (4m²) y sistema de calefacción mediante fan-coils

Para 6 m²:

	6 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.28	0.28	0.28	0.28
Febrero	0.37	0.37	0.37	0.37
Marzo	0.46	0.46	0.46	0.46
Abril	0.57	0.57	0.57	0.57
Mayo	0.57	0.57	0.57	0.57
Junio	0.57	0.57	0.57	0.57
Julio	0.56	0.56	0.56	0.56
Agosto	0.57	0.57	0.57	0.57
Septiembre	0.58	0.58	0.58	0.58
Octubre	0.58	0.58	0.58	0.58
Noviembre	0.49	0.49	0.49	0.49
Diciembre	0.28	0.28	0.28	0.28

Tabla 4.30. Factor de demanda cubierta (6m²) y sistema de calefacción mediante fan-coils

Para 8 m²:

	8 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.28	0.28	0.28	0.28
Febrero	0.37	0.37	0.37	0.37
Marzo	0.46	0.46	0.46	0.46
Abril	0.57	0.57	0.57	0.57
Mayo	0.57	0.57	0.57	0.57
Junio	0.57	0.57	0.57	0.57
Julio	0.56	0.56	0.56	0.56
Agosto	0.57	0.57	0.57	0.57
Septiembre	0.58	0.58	0.58	0.58
Octubre	0.58	0.58	0.58	0.58
Noviembre	0.49	0.49	0.49	0.49
Diciembre	0.28	0.28	0.28	0.28

Tabla 4.31. Factor de demanda cubierta (8m²) y sistema de calefacción mediante fan-coils

Se observa, que, para una configuración dada, la demanda cubierta es menor que cuando se usa suelo radiante, esto se debe a que la demanda se hace a una mayor temperatura y para el sistema de captación es más difícil de alcanzar ya que el salto que se consigue en los captadores no es muy grande

Además, se puede ver el siguiente fenómeno: Primero, que a medida que se aumenta el tamaño de la instalación, la demanda cubierta aumenta muy poco y segundo, que a partir de 4 m² y 1 m³ la demanda cubierta se mantiene en los mismos valores por mucho que se aumenten las dimensiones. Esto se debe a que el consumo se hace a una temperatura elevada (de 50°C) y entre los captadores y la acumulación no pueden satisfacerme la demanda a esta temperatura. Siempre me va a tener que ayudar a elevar la temperatura el sistema convencional, por lo que estos valores de f que obtenemos serán los máximos que nos dará una instalación solar térmica de baja temperatura.

4.5.2. Simulación del año completo para una calefacción mediante radiadores.

En el caso de una instalación de calefacción mediante radiadores de baja temperatura, lo que se hará será cambiar la temperatura de impulsión a 60°C y la de retorno a 50°C. También se cambiará la temperatura a la que se demanda el ACS a 60°C.

El análisis se hará del mismo modo que en las simulaciones anteriores, se realizará un análisis de sensibilidad variando tanto el área de captación como el volumen de acumulación.

Los resultados obtenidos de factor de demanda cubierta son los siguientes:

Para 2 m²:

	2 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.10	0.10	0.10	0.10
Febrero	0.17	0.17	0.17	0.17
Marzo	0.26	0.26	0.26	0.26
Abril	0.36	0.36	0.36	0.36
Mayo	0.36	0.36	0.36	0.36
Junio	0.37	0.37	0.37	0.37
Julio	0.36	0.36	0.36	0.36
Agosto	0.37	0.37	0.37	0.37
Septiembre	0.38	0.38	0.38	0.38
Octubre	0.37	0.38	0.38	0.38
Noviembre	0.23	0.24	0.24	0.23
Diciembre	0.09	0.09	0.09	0.09

Tabla 4.32. Factor de demanda cubierta (2m²) y sistema de calefacción mediante radiadores

Para 4 m²:

	4 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.10	0.10	0.10	0.10
Febrero	0.17	0.17	0.17	0.17
Marzo	0.26	0.26	0.26	0.26
Abril	0.37	0.37	0.37	0.37
Mayo	0.37	0.37	0.37	0.37
Junio	0.37	0.37	0.37	0.37
Julio	0.36	0.36	0.36	0.36
Agosto	0.37	0.37	0.37	0.37
Septiembre	0.38	0.38	0.38	0.38
Octubre	0.38	0.38	0.38	0.38
Noviembre	0.28	0.28	0.28	0.28
Diciembre	0.09	0.09	0.09	0.09

Tabla 4.33. Factor de demanda cubierta (4m²) y sistema de calefacción mediante radiadores

Para 6 m²:

	6 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.10	0.10	0.10	0.10
Febrero	0.17	0.17	0.17	0.17
Marzo	0.26	0.26	0.26	0.26
Abril	0.37	0.37	0.37	0.37
Mayo	0.37	0.37	0.37	0.37
Junio	0.37	0.37	0.37	0.37
Julio	0.36	0.36	0.36	0.36
Agosto	0.37	0.37	0.37	0.37
Septiembre	0.38	0.38	0.38	0.38
Octubre	0.38	0.38	0.38	0.38
Noviembre	0.28	0.28	0.28	0.28
Diciembre	0.09	0.09	0.09	0.09

Tabla 4.34. Factor de demanda cubierta (6m²) y sistema de calefacción mediante radiadores

Para 8 m²:

	8 m ²			
	0.5 m ³	0.7 m ³	1 m ³	1.5 m ³
Enero	0.10	0.10	0.10	0.10
Febrero	0.17	0.17	0.17	0.17
Marzo	0.26	0.26	0.26	0.26
Abril	0.37	0.37	0.37	0.37
Mayo	0.37	0.37	0.37	0.37
Junio	0.37	0.37	0.37	0.37
Julio	0.36	0.36	0.36	0.36
Agosto	0.37	0.37	0.37	0.37
Septiembre	0.38	0.38	0.38	0.38
Octubre	0.38	0.38	0.38	0.38
Noviembre	0.28	0.28	0.28	0.28
Diciembre	0.09	0.09	0.09	0.09

Tabla 4.35. Factor de demanda cubierta (8m²) y sistema de calefacción mediante radiadores

Al igual que para el caso anterior, la demanda cubierta es menor, por el mismo motivo y en mayor medida ya que se demanda a 60°C. Además, la eficiencia de captadores se ve perjudicada debido a que el agua de retorno vuelve a una temperatura elevada (50°C) y esta entra en el almacenamiento, lo que hará que el nodo más bajo del tanque aumente su temperatura, como consecuencia se bombeará hacia los captadores agua a una temperatura mayor y esto se ha visto que es perjudicial para la eficiencia de los paneles.

Como se esperaba, el fenómeno descrito para el caso anterior, también se da para este, pero con unos valores del factor de demanda cubierta mucho más bajos, la caldera de gas natural necesitará aportar mucha más energía ya que la temperatura se solicita a mayor temperatura (60%)

4.5.3. Comparación entre los 3 posibles sistemas de calefacción

Para ver de manera más clara como afecta el cambiar el sistema de calefacción, se ha mostrado conjuntamente los resultados obtenidos de las simulaciones de los distintos sistemas:

	2 m ²											
	Suelo radiante				Fan-coils				Radiadores			
	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³
Enero	0.27	0.28	0.28	0.29	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10
Febrero	0.38	0.38	0.37	0.37	0.28	0.27	0.27	0.27	0.17	0.17	0.17	0.17
Marzo	0.64	0.64	0.62	0.61	0.43	0.42	0.42	0.41	0.26	0.26	0.26	0.26
Abril	0.85	0.85	0.83	0.81	0.53	0.54	0.54	0.52	0.36	0.36	0.36	0.36
Mayo	0.88	0.89	0.88	0.83	0.53	0.54	0.54	0.53	0.36	0.36	0.36	0.36
Junio	0.95	0.95	0.94	0.92	0.56	0.57	0.57	0.56	0.37	0.37	0.37	0.37
Julio	0.99	0.99	0.99	0.97	0.56	0.56	0.56	0.56	0.36	0.36	0.36	0.36
Agosto	0.99	1	1	0.99	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Septiembre	1	1	1	0.99	0.58	0.58	0.58	0.58	0.38	0.38	0.38	0.38
Octubre	0.9	0.92	0.92	0.91	0.55	0.56	0.56	0.56	0.37	0.38	0.38	0.38
Noviembre	0.48	0.49	0.49	0.48	0.33	0.34	0.33	0.33	0.23	0.24	0.24	0.23
Diciembre	0.25	0.26	0.26	0.25	0.19	0.19	0.19	0.19	0.09	0.09	0.09	0.09

Tabla 4.36. Comparación del factor de demanda cubierta para 2 m² de captación y distintos sistemas de calefacción

	4 m ²											
	Suelo radiante				Fan-coils				Radiadores			
	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³
Enero	0.53	0.54	0.54	0.54	0.27	0.28	0.28	0.28	0.10	0.10	0.10	0.10
Febrero	0.73	0.73	0.75	0.74	0.37	0.37	0.37	0.37	0.17	0.17	0.17	0.17
Marzo	0.85	0.87	0.89	0.91	0.46	0.46	0.46	0.46	0.26	0.26	0.26	0.26
Abril	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Mayo	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Junio	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Julio	1.00	1.00	1.00	1.00	0.56	0.56	0.56	0.56	0.36	0.36	0.36	0.36
Agosto	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Septiembre	1.00	1.00	1.00	1.00	0.58	0.58	0.58	0.58	0.38	0.38	0.38	0.38
Octubre	1.00	1.00	1.00	1.00	0.58	0.58	0.58	0.58	0.38	0.38	0.38	0.38
Noviembre	0.84	0.85	0.87	0.88	0.48	0.49	0.49	0.49	0.28	0.28	0.28	0.28
Diciembre	0.48	0.49	0.50	0.50	0.26	0.27	0.28	0.28	0.09	0.09	0.09	0.09

Tabla 4.37. Comparación del factor de demanda cubierta para 4 m² de captación y distintos sistemas de calefacción

	6 m ²											
	Suelo radiante				Fan-coils				Radiadores			
	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³
Enero	0.70	0.71	0.73	0.74	0.28	0.28	0.28	0.28	0.10	0.10	0.10	0.10
Febrero	0.88	0.90	0.91	0.93	0.37	0.37	0.37	0.37	0.17	0.17	0.17	0.17
Marzo	0.92	0.95	0.98	1.00	0.46	0.46	0.46	0.46	0.26	0.26	0.26	0.26
Abril	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Mayo	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Junio	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Julio	1.00	1.00	1.00	1.00	0.56	0.56	0.56	0.56	0.36	0.36	0.36	0.36
Agosto	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Septiembre	1.00	1.00	1.00	1.00	0.58	0.58	0.58	0.58	0.38	0.38	0.38	0.38
Octubre	1.00	1.00	1.00	1.00	0.58	0.58	0.58	0.58	0.38	0.38	0.38	0.38
Noviembre	0.94	0.96	0.98	1.00	0.49	0.49	0.49	0.49	0.28	0.28	0.28	0.28
Diciembre	0.63	0.65	0.67	0.69	0.28	0.28	0.28	0.28	0.09	0.09	0.09	0.09

Tabla 4.38. Comparación del factor de demanda cubierta para 6 m² de captación y distintos sistemas de calefacción

	8 m ²											
	Suelo radiante				Fan-coils				Radiadores			
	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³	0.5m ³	0.7m ³	1m ³	1.5m ³
Enero	0.80	0.82	0.84	0.86	0.28	0.28	0.28	0.28	0.10	0.10	0.10	0.10
Febrero	0.94	0.96	0.99	1.00	0.37	0.37	0.37	0.37	0.17	0.17	0.17	0.17
Marzo	0.94	0.97	1.00	1.00	0.46	0.46	0.46	0.46	0.26	0.26	0.26	0.26
Abril	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Mayo	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Junio	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Julio	1.00	1.00	1.00	1.00	0.56	0.56	0.56	0.56	0.36	0.36	0.36	0.36
Agosto	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57	0.57	0.57	0.57	0.37	0.37	0.37	0.37
Septiembre	1.00	1.00	1.00	1.00	0.58	0.58	0.58	0.58	0.38	0.38	0.38	0.38
Octubre	1.00	1.00	1.00	1.00	0.58	0.58	0.58	0.58	0.38	0.38	0.38	0.38
Noviembre	0.98	1.00	1.00	1.00	0.49	0.49	0.49	0.49	0.28	0.28	0.28	0.28
Diciembre	0.72	0.75	0.78	0.82	0.28	0.28	0.28	0.28	0.09	0.09	0.09	0.09

Tabla 4.39. Comparación del factor de demanda cubierta para 8 m² de captación y distintos sistemas de calefacción

Se observa que la única posibilidad de que sean viables estas instalaciones es en combinación con un sistema de suelo radiante. Una instalación de energía solar térmica se ve muy perjudicada tanto en su rendimiento como en la cobertura solar que proporciona, a medida que se aumenta la temperatura de impulsión.

5 ESTUDIO ECONÓMICO

En este proyecto, aparte del diseño de una instalación de captadores solares térmicos, para suministrar ACS y calefacción, se hace un estudio económico acerca de estas instalaciones para ver, actualmente, cuán lejos se está de que sea rentables. Es decir, en la situación que se encuentran en la actualidad.

5.1. Costes unitarios de los componentes

Para analizar el coste de las distintas posibilidades de configuración de la instalación se verán cuales son los costes unitarios que puede tener una instalación como esta.

Para ello, los precios bases se han obtenido de la *Base de costes de la construcción de Andalucía (BCCA)*.

Los equipos considerados en los costes son los siguientes: m² de captación, volumen del tanque de acumulación. La caldera auxiliar no se va a considerar como un coste, ya que es de suponer que no es un coste adicional por hacer la instalación, sino, que, si no se dispusiera de esta instalación, existiría esta caldera.

Los costes unitarios de la instalación serán:

Equipos	ud	€ /ud
Captadores instalados	m ²	600
Acumulador	m ³	900

Tabla 5.1. Costes unitarios de los equipos

Para simplificar dichos costes unitarios, se han considerado ya con la instalación (llave en mano) del sistema, incluyendo también los costes de tuberías y bombas necesarias para la circulación del agua.

No se han puesto los costes detallados de la mano de obra y de todos los elementos necesarios, sino que se ha incluido en el coste unitario tanto del tanque como de captadores, ya que no es objeto de este proyecto hacer un estudio económico exhaustivo. Simplemente se quieren saber números índices de los costes que conllevan estas instalaciones actualmente.

5.2. Coste de la instalación

Suponiendo los costes unitarios anteriores, y variando las dimensiones del sistema, se obtienen los siguientes costes:

m2	m3	Coste de la instalación
2	0.5	1,650 €
2	0.7	1,830 €
2	1	2,100 €
2	1.5	2,550 €
4	0.5	2,850 €
4	0.7	3,030 €
4	1	3,300 €
4	1.5	3,750 €
6	0.5	4,050 €
6	0.7	4,230 €
6	1	4,500 €
6	1.5	4,950 €
8	0.5	5,250 €
8	0.7	5,430 €
8	1	5,700 €
8	1.5	6,150 €

Tabla 5.2. Resumen de costes para distintos tamaños

Para ver claramente la progresión de costes:

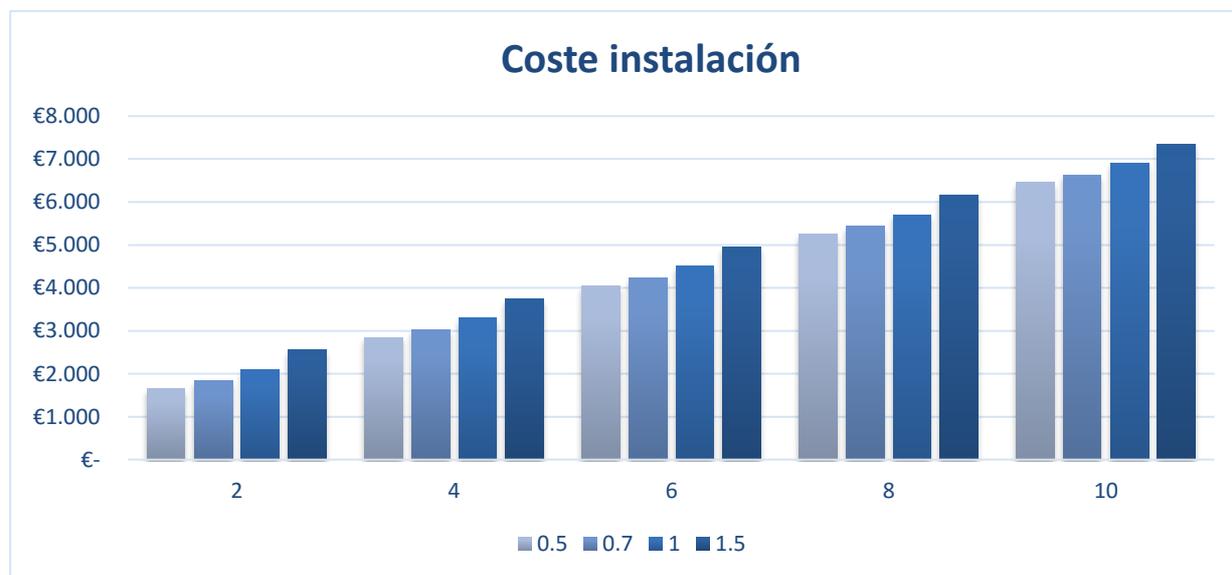


Fig. 5.1. Progresión del coste de la instalación para distintos tamaños

5.3. €/kWh de energía térmica con gas natural.

El objetivo de este apartado es ver cual es el precio del kWh producido a partir de gas natural, para, posteriormente, calcular cuanto se ahorraría de la factura si parte de la demanda se supliera con energía solar. El precio actual está en 0.057 €/kWh

Si la totalidad de la demanda inicial se supliera con gas natural:

	€/kWh	Demanda total kWh/mes	€ (coste variable)	€/mes (coste fijo)	coste total
Enero	0.057	535.8528542	30.54 €	4.46 €	35.01 €
Febrero	0.057	332.7284216	18.97 €	4.03 €	23.00 €
Marzo	0.057	259.1610304	14.77 €	4.46 €	19.24 €
Abril	0.057	172.9738093	9.86 €	4.32 €	14.18 €
Mayo	0.057	169.740184	9.68 €	4.46 €	14.14 €
Junio	0.057	156.7501254	8.93 €	4.32 €	13.25 €
Julio	0.057	155.4961244	8.86 €	4.46 €	13.33 €
Agosto	0.057	161.9751296	9.23 €	4.46 €	13.70 €
Sept	0.057	163.0201304	9.29 €	4.32 €	13.61 €
Octubre	0.057	175.060388	9.98 €	4.46 €	14.44 €
Noviembre	0.057	232.8468052	13.27 €	4.32 €	17.59 €
Diciembre	0.057	519.2667849	29.60 €	4.46 €	34.06 €

Tabla 5.3. Factura de gas natural para demanda original

El coste anual en suministro de gas sería de 225.55 €

Sin embargo, si se reduce la demanda de calefacción la factura de gas natural sería la siguiente:

	€/kWh	Demanda total kWh/mes	€ (coste variable)	€/mes (coste fijo)	coste total
Enero	0.057	482.2675683	27.49 €	4.46 €	31.95 €
Febrero	0.057	299.4555796	17.07 €	4.03 €	21.10 €
Marzo	0.057	233.2449266	13.29 €	4.46 €	17.75 €
Abril	0.057	155.6764295	8.87 €	4.32 €	13.19 €
Mayo	0.057	152.7661647	8.71 €	4.46 €	13.17 €
Junio	0.057	141.0751129	8.04 €	4.32 €	12.36 €
Julio	0.057	139.946512	7.98 €	4.46 €	12.44 €
Agosto	0.057	145.7776166	8.31 €	4.46 €	12.77 €
Septiembre	0.057	146.7181174	8.36 €	4.32 €	12.68 €
Octubre	0.057	157.5543485	8.98 €	4.46 €	13.44 €
Noviembre	0.057	209.5621251	11.95 €	4.32 €	16.27 €
Diciembre	0.057	467.3401064	26.64 €	4.46 €	31.10 €

Tabla 5.4. Factura de gas natural con una demanda reducida

Y el coste anual del suministro sería de 208.22 €

5.4. Amortización

5.4.1. Amortización de la instalación con demanda inicial

Suponiendo los costes unitarios anteriores, y variando las dimensiones del sistema, se obtienen los siguientes costes con los respectivos años de amortización:

m2	m3	Coste de la instalación	Ahorro en combustible	Amortización (años)
2	0.5	1,650 €	100.30 €	17
2	0.7	1,830 €	101.20 €	19
2	1	2,100 €	100.67 €	21
2	1.5	2,550 €	98.91 €	26
4	0.5	2,850 €	133.60 €	22
4	0.7	3,030 €	134.87 €	23
4	1	3,300 €	136.01 €	25
4	1.5	3,750 €	136.25 €	28
6	0.5	4,050 €	148.43 €	28
6	0.7	4,230 €	150.61 €	29
6	1	4,500 €	152.65 €	30
6	1.5	4,950 €	154.40 €	33
8	0.5	5,250 €	156.17 €	34
8	0.7	5,430 €	158.82 €	35
8	1	5,700 €	161.42 €	36
8	1.5	6,150 €	163.39 €	38

Tabla 5.5. Resumen de costes, ahorro y amortización para distintos tamaños

Para ver claramente la progresión del ahorro en combustible para los distintos tamaños posibles también se ha representado gráficamente.

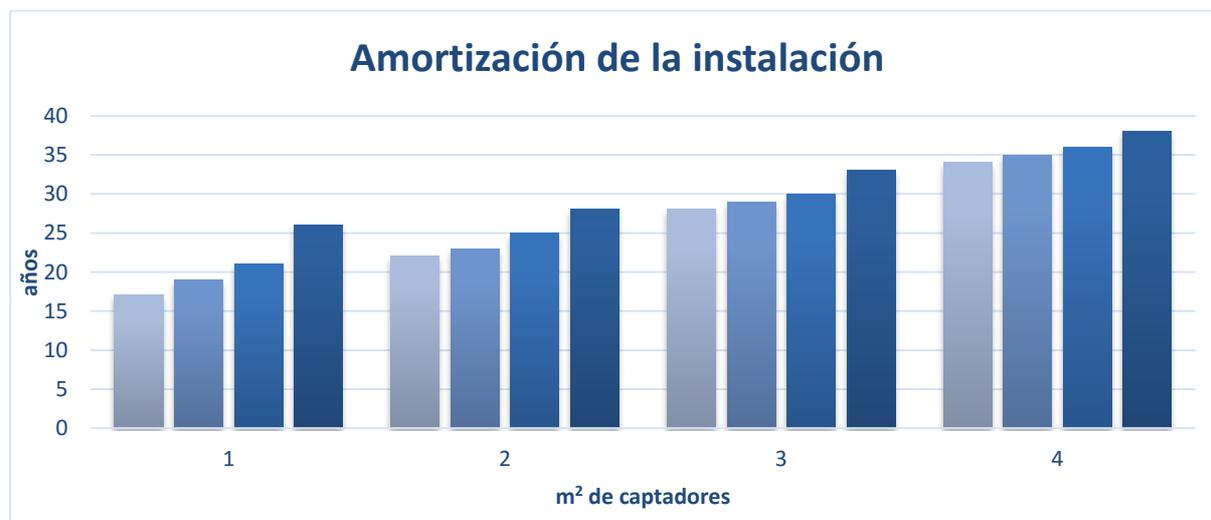


Fig. 5.2. Amortización de la instalación (demanda inicial) para las distintas configuraciones

5.4.2. Amortización de la instalación con demanda reducida

Suponiendo los costes unitarios anteriores, y variando las dimensiones del sistema, se obtienen los siguientes costes con los respectivos años de amortización:

m2	m3	Coste	Ahorro de gas natural	Amortización (años)
2	0.5	1,650 €	88.44 €	19
2	0.7	1,830 €	89.11 €	21
2	1	2,100 €	88.69 €	24
2	1.5	2,550 €	86.79 €	30
4	0.5	2,850 €	121.10 €	24
4	0.7	3,030 €	122.44 €	25
4	1	3,300 €	123.48 €	27
4	1.5	3,750 €	123.81 €	31
6	0.5	4,050 €	135.00 €	30
6	0.7	4,230 €	137.13 €	31
6	1	4,500 €	139.01 €	33
6	1.5	4,950 €	140.66 €	36
8	0.5	5,250 €	141.87 €	38
8	0.7	5,430 €	144.51 €	38
8	1	5,700 €	146.73 €	39
8	1.5	6,150 €	148.30 €	42

Tabla 5.6. Coste y amortización de la instalación para distintas dimensiones

Para ver claramente la progresión del ahorro en combustible para los distintos tamaños posibles también se ha representado gráficamente:

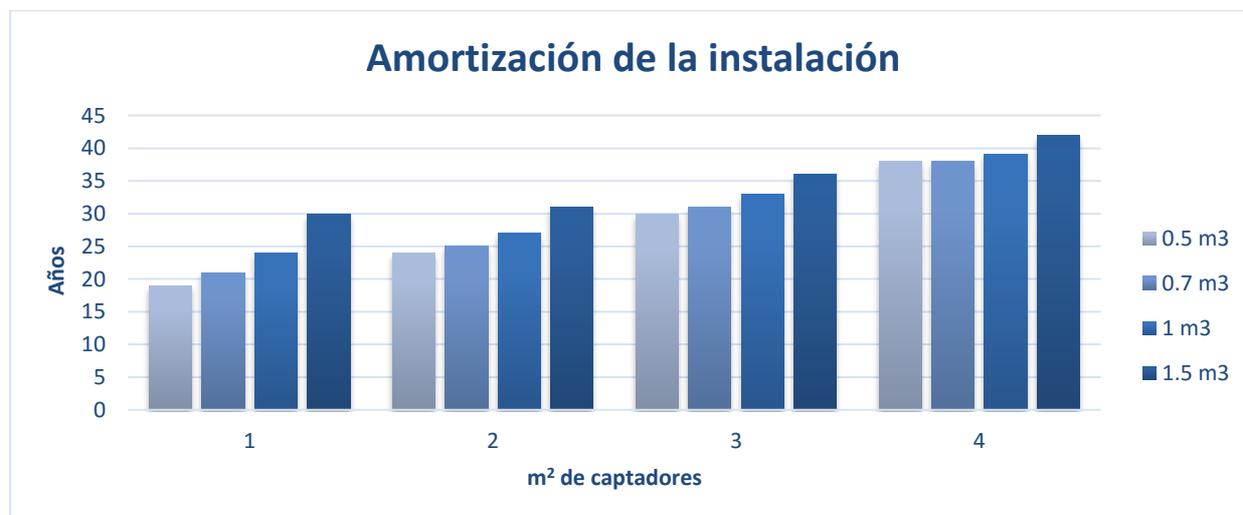


Fig 5.3. Amortización de la instalación (demanda reducida) para las distintas configuraciones

5.4.3. Comparación

Se compararán los resultados obtenidos para ambas demandas para así determinar si la reducción de esta tiene verdaderamente dichos efectos beneficiosos en la instalación:

m2	m3	Amortización (años)	
		Demanda original	Demanda reducida
2	0.5	17	19
2	0.7	19	21
2	1	21	24
2	1.5	26	30
4	0.5	22	24
4	0.7	23	25
4	1	25	27
4	1.5	28	31
6	0.5	28	30
6	0.7	29	31
6	1	30	33
6	1.5	33	36
8	0.5	34	38
8	0.7	35	38
8	1	36	39
8	1.5	38	42

Tabla 5.7. Comparación de los años de amortización de ambas situaciones

Se ha visto que, en cuanto al factor de demanda cubierta, si aumenta ligeramente cuando se reduce la demanda.

Sin embargo, al disminuir la demanda también se reduciría el coste de la factura de gas natural si se supliera todo mediante un sistema de caldera convencional, por lo tanto, el ahorro en la factura es menor y los años de amortización salen algo mayores que cuando la demanda es la inicial.

5.5 Dimensiones de la instalación elegida para cada caso

El objeto de este apartado es justificar la elección del tamaño de la instalación para cada una de las situaciones que se han simulado.

Para el caso de la demanda inicial, se podría elegir un tamaño de la instalación de 2 m^2 y 0.7 m^3 de acumulación. La fracción de demanda cubierta, se considera que tiene un buen valor de cobertura solar cuando se está por encima de 0.7. En este caso, estaríamos por encima de dicho valor durante 7 meses del año. El coste de la instalación tampoco es muy elevado, 1830 €, que es el coste en el que se mueven las instalaciones que se hacen actualmente para agua caliente sanitaria.

Además, la vida útil de la instalación ronda los 20 años, y la amortización en este caso sería de 19 años.

Mes	f
Enero	0.28
Febrero	0.38
Marzo	0.64
Abril	0.85
Mayo	0.89
Junio	0.95
Julio	0.99
Agosto	1.00
Septiembre	1.00
Octubre	0.92
Noviembre	0.49
Diciembre	0.26

Tabla 5.8. Fracción de demanda cubierta para 2 m^2 y 0.7 m^3

Cuando se trata de la demanda reducida, las dimensiones elegidas serían de 2 m^2 y 0.5 m^3 . Para esta configuración, se tiene un factor de demanda cubierta mayor que en el caso anterior. De la misma manera, se está por encima de una $f > 0.7$ durante 7 meses del año. El coste de la instalación sería algo menor que en el caso anterior, ya que se ha elegido un tamaño más pequeño del volumen de acumulación. En este caso, estaría en un coste de 1650 €.

Sin embargo, la instalación se amortizará en 19 años igualmente, debido a que el ahorro en la factura de gas es menor.

Mes	f
Enero	0.29
Febrero	0.39
Marzo	0.66
Abril	0.85
Mayo	0.89
Junio	0.95
Julio	0.99
Agosto	0.99
Septiembre	1.00
Octubre	0.90
Noviembre	0.50
Diciembre	0.27

Tabla 5.9. Fracción de demanda cubierta para 2 m^2 y 0.5 m^3

5.6. Amortización de la instalación a medida que aumenta €/kWh de gas natural

Como uno de los objetivos del proyecto era ver cuanto faltaba para que estas instalaciones fueran viables económicamente, se ha hecho un análisis sobre los años en que se amortizaría una instalación que diera una cobertura casi total de la demanda, si se tiene en cuenta que el coste de los recursos fósiles irán incrementándose.

Vamos a suponer que el coste fijo mensual no va a encarecer, sino que lo que encarecerá será el término variable.

Si seleccionamos una configuración de la instalación que me satisfaga la mayoría de la demanda, elegiremos la de 8m^2 y 1 m^3 de acumulación. Todos los meses excepto 2 tienen un factor de demanda cubierta igual a 1, y estos dos meses están por encima del 80% de cobertura solar del requerimiento energético.

Mediante una gráfica donde se muestre la progresión del aumento del coste del gas natural, se verá como decae los años de amortización de la instalación.

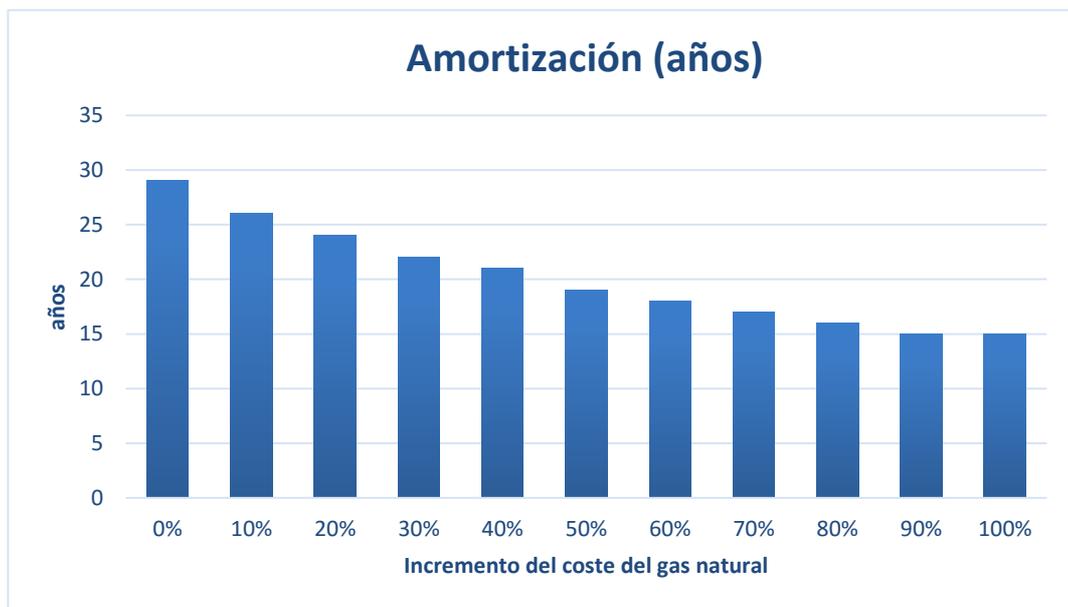


Fig. 5.4. Amortización de la instalación (8 m^2 y 1 m^3) a medida que se incrementa el coste del gas natural

Para que se llegue a alcanzar la rentabilidad de una instalación que prácticamente me satisfaga toda la demanda a lo largo del año, se tiene que dar un incremento del 80% (Es decir, un coste de 0.1026 €/kWh) en el gas natural.

Para una instalación algo más pequeña (6 m^2 y 0.7 m^3), que también tiene una demanda cubierta bastante alta, se llegaría a amortizar a los 19 años con un incremento del 50% del coste (0.0855 €/kWh). Un coste que difiere del actual en 0.0285 €/kWh .

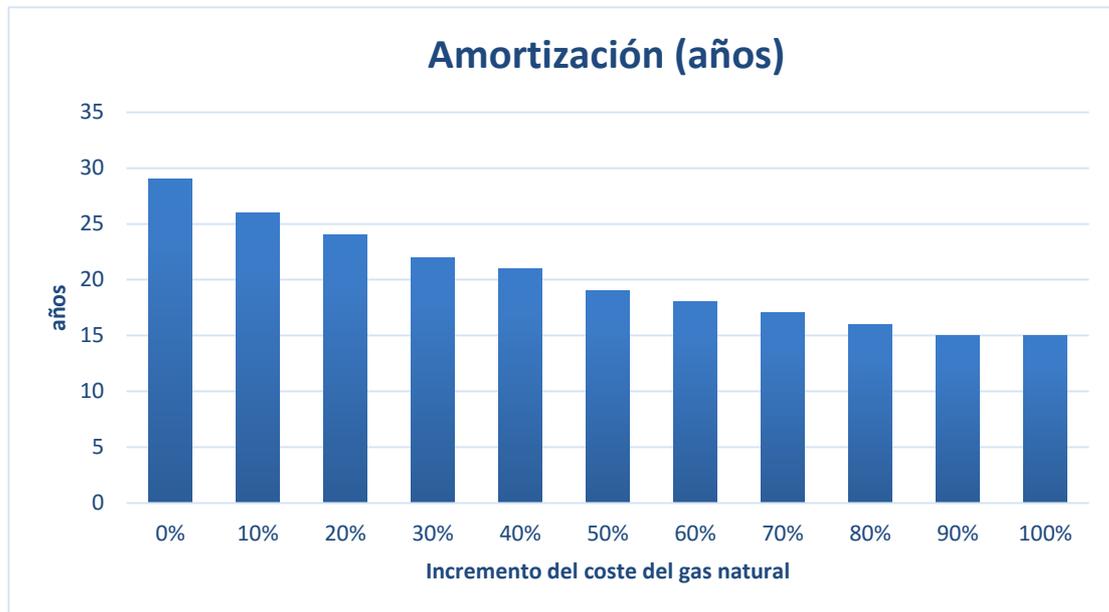


Fig. 5.5. Amortización de la instalación (6 m^2 y 0.7 m^3) a medida que se incrementa el coste del gas natural

6 CONCLUSIONES

Brevemente comentar, que lo que se ha desarrollado en este proyecto, es un estudio, tanto del diseño como de las dimensiones que debe de tener una instalación solar térmica para satisfacer una demanda de ACS y de calefacción, viendo los distintos porcentajes de demanda cubierta que se obtienen de los distintos tamaños, finalmente sabiendo las diferentes configuraciones hemos hecho un análisis económico viendo los años en que sería amortizada la instalación teniendo en cuenta el ahorro en la factura de gas que nos reportaría dicha instalación.

Como conclusión, se puede decir que, mientras el precio del gas natural y los combustibles fósiles en general sigan relativamente bajos, estas instalaciones no tienen cabida desde el punto de vista económico.

Actualmente, las instalaciones solares térmicas de baja temperatura se implementan en los hogares para satisfacer la demanda de agua caliente sanitaria, ya que con un captador de 4 m² y 0.5 m³ de acumulación se satisface casi en su totalidad la demanda energética por ACS, tanto en los meses de verano como en invierno. Estas dimensiones tienen un coste de 2850 € y que llevarían a ahorrar casi la factura de gas natural por completo, por lo que están amortizadas a los 13 o 14 años. Sin embargo, si se añade una demanda de calefacción, la instalación debe de tener unas dimensiones mucho mayores, lo que nos lleva a costes muy elevados que no son amortizables en los años de vida útil de un sistema de captación solar.

Son instalaciones que no son rentables económicamente a día de hoy, pero son posibles. Dejando al margen el factor económico, estos sistemas aportan un valor a la sociedad. Se disminuyen las emisiones de CO₂. Sobrepasar los valores establecidos de emisiones tienen un coste para el país, por lo que se ayudaría a reducirlo. También daría una mayor independencia energética del país, ya que necesitaríamos importar menos combustibles fósiles.

Finalmente, se puede decir que aún deben de pasar varios años para que sean rentables estas instalaciones, sin embargo, se pueden considerar para el apoyo al sistema auxiliar y proporcionar parte de la demanda. Además, serán mas rentables en edificios de nueva construcción, debido a la instalación de un sistema de calefacción mediante suelo radiante, ya que los edificios actuales que no disponen de este sistema, y que usan métodos tradicionales de calefacción como los fan-coils o los radiadores perjudican notablemente el factor de demanda cubierta de la instalación.

REFERENCIAS

- http://awsassets.wwf.es/downloads/informe_de_emisiones_de_gei_en_espana_1990_2012.pdf
- <http://cecu.es/campanas/medio%20ambiente/res&rue/hm/dossier/3%20solar%20termica.htm#3>.
Tipología de colectores solares térmicos
- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70549/fichero/Capitulo+7.pdf>
- <http://web.mit.edu/parmstr/Public/TRNSYS/04-MathematicalReference.pdf>
- <https://canal.uned.es/uploads/materials/resources/pdf/4/1/1319025174814.pdf>
- https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_t%C3%A9rmica
- https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/energia_solar_termica_a_baja_temperatura_generalidades.pdf
- http://www.epsem.upc.edu/intercanviadorsdecalor/castella/tubs_concentrics.html
- <http://cespedesas09.blogspot.com.es/2011/04/la-informacion-mostrada-continuacion.html>
- <http://www.madrid.org/cs/BlobServer?blobcol=urldata&blobtable=MungoBlobs&blobheadervalue1=filename%3D12+Capitulo07.pdf&blobkey=id&blobheadername1=Content-Disposition&blobwhere=1119133574065&blobheader=application%2Fpdf>
- http://www.inega.es/informacion/preguntas_frecuentes/enerxia_solar_termica.html?idioma=es
- http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000300007
- <http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/portal-web/web/areas/vivienda/texto/706e4686-1fbd-11e0-89b8-998a90d310ed>
- <http://www.soliclimala.es/calefaccion-solar>
- <http://energiasolarvalencia.es/calefaccion-solar>
- <http://www.lainesinasolar.com.ar/calefaccion-solar/>
- https://ev.us.es/bbcswebdav/pid-1644130-dt-content-rid-5333765_1/courses/201516-2210048-221-EC/04_Acumulaci%C3%B3n.pdf
- <http://ovacen.com/mejora-de-la-eficiencia-energetica/>
- http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf
- Apuntes centrales solares/Radiación solar/Departamento de Termodinámica/ETSI

GLOSARIO

BCCA: Banco de costes de la construcción andaluz

4

