

Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales.

Análisis paramétrico de las instalaciones de energía  
solar térmica para producción de agua caliente  
sanitaria

Autor: Jesús Chulián Sarmiento

Tutor: D. José Guerra Macho

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

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Análisis paramétrico de las instalaciones de energía solar térmica para producción de agua caliente sanitaria**

Autor:

Jesús Chulián Sarmiento

Tutor:

D. José Guerra Macho

Catedrático de Universidad

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado: Análisis paramétrico de las instalaciones de energía solar térmica para producción de agua caliente sanitaria

Autor: Jesús Chulián Sarmiento

Tutor: D. José Guerra Macho

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

A mis padres por el apoyo que me han dado en los momentos más duros de mi etapa universitaria. A mi hermano por ser mi inspiración de cada día.

*Jesús Chulián Sarmiento*

*Sevilla, 2021*



Este trabajo se ha dividido en 4 capítulos. El primer capítulo titulado memoria descriptiva y comentará los aspectos más importantes de una instalación solar térmica. Este explicará la configuración de los sistemas, distinguiendo entre sistemas solares prefabricados y sistemas solares a medida. Además, diferenciará los tres distintos tamaños en los que se dividen las instalaciones y definirá los sistemas y circuitos que componen a estas. En este apartado se tratará de definir los criterios de clasificación de las pequeñas, las medianas y las grandes instalaciones, por último, para acabar el apartado de configuración se comentará las configuraciones de las instalaciones en edificios multiviviendas. En la memoria descriptiva se hablará acerca de los componentes, de cuál será la temperatura de trabajo y de su compatibilidad con los fluidos de trabajo. Seguidamente, se explicará de manera breve la función de un captador solar plano y se describirán sus partes, así como los diferentes tipos de captadores solares planos que existen. Otro punto para tratar en la memoria descriptiva será las condiciones de trabajo, siendo estas las necesarias para sacar el máximo rendimiento y evitar problemas en nuestra instalación además se añadirá un subapartado en el cual se aporta una serie de indicaciones a la hora de incorporar una instalación a un edificio, a continuación, se describirán los sistemas de captación, acumulación e intercambio que son los tres sistemas que componen la parte hidráulica y térmica de la instalación. Para acabar este capítulo se explicarán algunas pautas a seguir para realizar un adecuado montaje, puesta en marcha, mantenimiento y uso de la instalación.

El segundo capítulo, titulado métodos de cálculo realizará un pequeño estudio de herramientas de simulación como son el método TRNSYS, el método f-CHART, ACSOL y CHEQ4. Prestando mayor atención en este último. La herramienta TRNSYS es un programa de simulación para sistemas energéticos en régimen dinámico. Se diseñó con la intención de resolver sistemas complejos donde cada uno de los componentes se describe mediante subrutinas más simples, llamadas TYPEs. El método f-CHART es un método simplificado, cuyo fundamento es un día representativo de cada mes. Cabe destacar que el método f-Chart es reconocido como uno de los mejores métodos simplificados para cuantificar la contribución solar en base anual de una instalación de energía solar para la producción de agua caliente sanitaria. El método ACSOL es un programa de simulación que utiliza como motor de cálculo a TRNSYS, este método es un software que calcula los parámetros de los sistemas solares térmicos de baja temperatura ayudando al usuario a no tener que programar ni verificar modelos. El método CHEQ4 utiliza un software que IDAE ofrece de forma gratuita al sector de la energía solar térmica. Es un software desarrollado en un entorno que resulta agradable para el usuario, fácil de utilizar y con una estructura clara y organizada. Como se ha mencionado anteriormente se explicará cada ventana de CHEQ4 detalladamente, incluyendo imágenes de las mismas ventanas del programa y se comentará las posibles alternativas que se deben aplicar cuando el programa muestre algún problema, bien sea producido por un error en la introducción de datos o por la falta de convergencias de estos mismos. Para acabar el capítulo se mostrarán las ventajas del método de CHEQ4 con respecto a los demás métodos.

El tercer capítulo se titula análisis de casos. Este capítulo comenzará describiendo la estructura y funcionamiento de los sistemas de producción de ACS que aparecen en CHEQ4. Cabe destacar que de los sistemas incluidos en CHEQ4 se estudiarán todos a excepción de la instalación con intercambiador y piscina cubierta dentro de los sistemas de consumo único. Se continuará el capítulo definiendo el caso base, este caso, es uno que se ha elegido en concreto para aplicar a cada sistema. El caso base es muy importante ya que a este caso se le establece una serie de parámetros y será la variación de estos parámetros lo que nos definan los demás 360 casos que se van a analizar. Para acabar este capítulo se estudiarán los demás casos diferentes definidos, considerando en cada uno de los siete sistemas la variación de parámetros como son la localidad, el número de captadores, longitud del circuito primario, distribución, subestaciones y temperatura de impulsión.

Por último, el cuarto capítulo será un resumen del trabajo y las conclusiones obtenidas acerca del estudio realizado.

# Abstract

---

This work has been divided into 4 chapters. The first chapter entitled descriptive memory and will comment on the most important aspects of a solar thermal installation. This will explain the configuration of the systems, distinguishing between prefabricated solar systems and custom solar systems. In addition, it will differentiate the three different sizes into which the facilities are divided and will define the systems and circuits that make up these. In this section we will try to define the classification criteria for small, medium and large facilities, finally, to finish the configuration section, we will comment on the configurations of the facilities in multi-dwelling buildings. In the specification we will talk about the components, what the working temperature will be and their compatibility with the working fluids. Next, the function of a flat solar collector will be briefly explained and its parts will be described, as well as the different types of flat solar collectors that exist. Another point to deal with in the descriptive memory will be the working conditions, these being the ones necessary to get the most performance and avoid problems in our installation, a subsection will also be added in which a series of indications is provided when incorporating an installation to a building, then the collection, accumulation and exchange systems will be described, which are the three systems that make up the hydraulic and thermal part of the installation. At the end of this chapter, some guidelines to follow will be explained to carry out a proper assembly, start-up, maintenance and use of the installation.

The second chapter, entitled calculation methods, will carry out a small study of simulation tools such as the TRNSYS method, the f-CHART method, ACSOL and CHEQ4. Paying more attention to the latter. The TRNSYS tool is a simulation program for energy systems in dynamic regime. It was designed with the intention of solving complex systems where each of the components is described by simpler subroutines, called TYPEs. The f-CHART method is a simplified method, based on a representative day of each month. It should be noted that the f-Chart method is recognized as one of the best simplified methods to quantify the solar contribution on an annual basis of a solar energy installation for the production of domestic hot water. The ACSOL method is a simulation program that uses TRNSYS as a calculation engine. This method is a software that calculates the parameters of low-temperature solar thermal systems, helping the user not to have to program or verify models. The CHEQ4 method uses software that IDAE offers free of charge to the solar thermal energy sector. It is software developed in an environment that is pleasant for the user, easy to use and with a clear and organized structure. As mentioned above, each CHEQ4 window will be explained in detail, including images of the same program windows, and the possible alternatives that should be applied when the program shows a problem will be discussed, whether it is caused by an error in the data entry or due to the lack of convergences of these. To finish the chapter, the advantages of the CHEQ4 method over the other methods will be shown.

The third chapter is titled Case Analysis. This chapter will begin by describing the structure and operation of the DHW production systems that appear in CHEQ4. It should be noted that all of the systems included in CHEQ4 will be studied except for the installation with exchanger and covered swimming pool within the single consumption systems. The chapter will continue defining the base case, this case is one that has been specifically chosen to apply to each system. The base case is very important since in this case a series of parameters is established and it will be the variation of these parameters that will define the other 360 cases that are going to be analyzed. To finish this chapter, the other different defined cases will be studied, considering in each one of the seven systems the variation of parameters such as the location, the number of collectors, length of the primary circuit, distribution, substations and discharge temperature.

Finally, the fourth chapter will be a summary of the work and the conclusions obtained about the study carried out.

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Agradecimientos</b>  | <b>vii</b>  |
| <b>Resumen</b>  | <b>ix</b>   |
| <b>Abstract</b>   | <b>x</b>    |
| <b>Índice</b>   | <b>xi</b>   |
| <b>Índice de Tablas</b>   | <b>xii</b>  |
| <b>Índice de Figuras</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>1 INTRODUCCIÓN</b>   | <b>1</b>    |
| 1.1. <i>INTRODUCCIÓN</i>  | 1           |
| 1.2. <i>CONFIGURACIÓN</i>   | 1           |
| 1.2.1 Sistemas solares prefabricados y sistemas solares a medida.                   | 1           |
| 1.2.2 Tamaño de las instalaciones solares térmicas.                                 | 2           |
| 1.2.3 Definición de sistemas y circuitos de las instalaciones solares térmicas.     | 3           |
| 1.2.4 Criterios de clasificación de las pequeña instalaciones.                      | 4           |
| 1.2.5 Configuraciones de las instalaciones medianas y grandes.                      | 8           |
| 1.2.6 Configuraciones de instalaciones en edificios multivivienda                   | 9           |
| 1.3. <i>COMPONENTES</i>   | 13          |
| 1.3.1 Captadores solares planos   | 13          |
| 1.3.2 Resto de componentes de una instalación solar                                 | 15          |
| 1.4. <i>CONDICIONES DE TRABAJO</i>  | 16          |
| 1.5. <i>INCORPORACIÓN EN LOS EDIFICIOS</i>  | 16          |
| 1.6. <i>DISEÑO HIDRÁULICO Y TÉRMICO</i>   | 17          |
| 1.6.1 Sistema de captación  | 17          |
| 1.6.2 Sistema de acumulación  | 17          |
| 1.6.3 Sistema de intercambio  | 17          |
| 1.6.4 Circuito hidráulico   | 18          |
| 1.7. <i>CÁLCULO DE PRESTACIONES ENERGÉTICAS</i>                                     | 18          |
| 1.8. <i>MONTAJE, PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA</i>                                     | 18          |
| 1.9. <i>OPERACIÓN, USO Y MANTENIMIENTO</i>  | 19          |
| 1.10 <i>EL MERCADO DE LA ENERGÍA SOLAR EN ESPAÑA</i>                                | 19          |
| <b>2 MÉTODOS DE CÁLCULO</b>   | <b>24</b>   |
| 2.1 <i>INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DE CÁLCULO</i>                                    | 24          |
| 2.2 <i>MÉTODO TRNSYS</i>  | 24          |
| 2.3 <i>MÉTODO f-Chart</i>   | 26          |
| 2.4 <i>MÉTODO ACSOL</i>   | 29          |
| 2.5 <i>MÉTODO CHEQ4</i>   | 31          |
| 2.6 <i>COMPARACIÓN DEL MÉTODO CHEQ4 CON RESPECTO A LOS OTROS MÉTODOS DE CÁLCULO</i> | 42          |
| <b>3 ANÁLISIS DE CASOS</b>  | <b>44</b>   |
| 3.1 <i>INTRODUCCIÓN</i>   | 44          |
| 3.2 <i>DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE ACS</i>                         | 44          |
| 3.3 <i>DEFINICIÓN DEL CASO BASE</i>   | 48          |
| 3.4 <i>CASOS ANALIZADOS</i>   | 51          |
| <b>4 RESUMEN Y CONCLUSIONES</b>   | <b>62</b>   |
| <b>Referencias</b>  | <b>64</b>   |
| <b>Glosario</b>   | <b>65</b>   |

# ÍNDICE DE TABLAS

---

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Tamaño de las instalaciones solares térmicas                | 2  |
| Tabla 2. Comparación entre los dos tipos de circulación.             | 4  |
| Tabla 3. Comparación de criterios entre los dos tipos de intercambio | 5  |
| Tabla 4. Comparación entre las diferentes configuraciones.           | 14 |
| Tabla 5. Superficie acumulada instalada en España en 2018 [3]        | 21 |
| Tabla 6. Diferentes TYPEs  | 24 |
| Tabla 7. Configuraciones de CHEQ4. Enumeración y consumos.           | 35 |
| Tabla 8. Descripción de cada configuración                           | 35 |
| Tabla 9. Tabla de aislantes  | 36 |
| Tabla 10. Tipos de sistemas  | 37 |
| Tabla 11. Tipos de combustible CHEQ4                                 | 37 |
| Tabla 12. Indicadores de "Tabla de resultados" [5]                   | 41 |
| Tabla 13. Valores de energía anuales en caso base                    | 48 |
| Tabla 14. Contribución solar en los sistemas del caso base           | 49 |
| Tabla 15. Relación G/D en los sistemas del caso base                 | 49 |
| Tabla 16. Parámetros de entrada del caso base                        | 50 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Esquema simplificado ACS.   | 3  |
| Figura 2: Sistemas directos de circulación forzada. [1]                             | 6  |
| Figura 3. Distintos tipos de acoplamiento. [1]                                      | 7  |
| Figura 4: Sistemas directos de circulación natural.[1]                              | 8  |
| Figura 5: Sistemas indirectos de circulación forzada. [1]                           | 8  |
| Figura 6: Sistemas indirectos de circulación natural. [1]                           | 8  |
| Figura 7: Instalación solar y sistema de apoyo centralizado. [1]                    | 10 |
| Figura 8: Instalación solar centralizada con sistema de apoyo distribuido. [1]      | 11 |
| Figura 9: Instalación solar con acumulación distribuida. [1]                        | 11 |
| Figura 10: Instalación solar centralizada con intercambio distribuido. [1]          | 12 |
| Figura 11: Instalación con doble acumulación solar, centralizada y distribuida. [1] | 12 |
| Figura 12. Sección de un captador solar plano indicando sus componentes.            | 15 |
| Figura 13. Distribución por tipo de captador y sistema en 2019 [2]                  | 20 |
| Figura 14. Distribución por segmentos de mercado [2]                                | 20 |
| Figura 15. Viviendas iniciadas 2000-2008 [2]  | 22 |
| Figura 16. Viviendas finalizadas 2000-2018 [2]                                      | 22 |
| Figura 17. Desarrollo del mercado de 2006-2019 [2]                                  | 23 |
| Figura 18. Distribución por origen de fabricación en 2019 [2]                       | 23 |
| Figura 19. Equema de entradas, parámetros y salidass de TYPES                       | 25 |
| Figura 20. Pantalla de ACSOL. Selección de configuración [4]                        | 30 |
| Figura 21. Pantalla de inicio CHEQ4 [5]   | 32 |
| Figura 22. Distintas pantallas de CHEQ4 [5]   | 33 |
| Figura 23. Localización. CHEQ4  | 34 |
| Figura 24: Configuración.   | 34 |
| Figura 25. Pantalla de “Demanda” para sistemas de consumo único                     | 37 |
| Figura 26. Pantalla de “Demanda” para sistemas de consumo múltiple                  | 38 |
| Figura 27. Solar/ Apoyo   | 39 |
| Figura 28. Pantalla “otros parámetros” para instalaciones de consumo único          | 39 |
| Figura 29. Pantalla “otros parámetros” para instalaciones de consumo múltiple       | 40 |
| Figura 30: Resultados.  | 40 |
| Figura 31: Revisión de seguimiento de normativa. [4]                                | 41 |
| Figura 32: Informe final.   | 42 |
| Figura 33. Instalación con sistema prefabricado                                     | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 34. Instalación con interacumulador   | 45 |
| Figura 35. Instalación con interacumulador independiente                                 | 45 |
| Figura 36. Instalación con todo centralizado   | 46 |
| Figura 37. Instalación con apoyo distribuido   | 46 |
| Figura 38. Instalación con acumulación distribuida                                       | 47 |
| Figura 39. Instalación con intercambio distribuido                                       | 47 |
| Figura 40. Fbruta vs G/Dbruta  | 51 |
| Figura 41. Fbruta vs Fneta   | 52 |
| Figura 42. Influencia del sistema (Sistema 1 frente a Sistema 2)                         | 53 |
| Figura 43. Influencia del sistema (Sistema 2 frente a Sistema 3)                         | 53 |
| Figura 44. Influencia del sistema (Sistema 3 frente a Sistema 4)                         | 54 |
| Figura 45. Influencia del sistema (Sistema 4 frente a Sistema 5)                         | 54 |
| Figura 46. Influencia del sistema (Sistema 4 frente a Sistema 6)                         | 55 |
| Figura 47. Influencia del sistema (Sistema 4 frente a Sistema 7)                         | 55 |
| Figura 48. Influencia del sistema (Sistema 6 frente a Sistema 7)                         | 56 |
| Figura 49. Influencia de la longitud del circuito primario (10 m frente a 50 m)          | 56 |
| Figura 50. Influencia de la longitud del circuito primario (10 m frente a 100 m)         | 57 |
| Figura 51. Influencia de la longitud del circuito primario (50 m frente a 100 m)         | 57 |
| Figura 52. Influencia de la longitud del circuito de distribución (10 m frente a 100 m)  | 58 |
| Figura 53. Influencia de la longitud del circuito de distribución (10 m frente a 200 m)  | 58 |
| Figura 54. Influencia de la longitud del circuito de distribución (100 m frente a 200 m) | 59 |
| Figura 55. Influencia de la longitud del circuito de subestaciones (1 m frente a 10 m)   | 59 |
| Figura 56. Influencia de la longitud del circuito de subestaciones (1 m frente a 50 m)   | 60 |
| Figura 57. Influencia de la longitud del circuito de subestaciones (10 m frente a 50 m)  | 60 |
| Figura 58. Influencia de la temperatura de impulsión del agua caliente                   | 61 |



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se pretende poner de manifiesto todos los aspectos más importantes de una instalación considerando algunos aspectos más críticos que otros en cuanto a su diseño, montaje, operación, selección de materiales y mantenimiento.

En primer lugar, se realizará un pequeño estudio sobre la configuración de una instalación solar térmica ya que es estrictamente necesario seleccionar la que más se adapte a las necesidades de uso exigidas por los usuarios o por el edificio en el que se quiere instalar, encontrando así un adecuado equilibrio entre lo técnico y lo económico. Dentro de este apartado de configuración se hará referencia a los sistemas solares prefabricados y a los sistemas solares a medida definiendo sus características y diferencias, ya sean de tamaño, estructuras, funcionamiento...

Posteriormente, se mostrarán los componentes de una instalación ya que es muy importante saber hacer un buen uso de estos, así como seleccionarlos de un material adecuado para la instalación. Seguidamente se definirán las condiciones de trabajo como son las presiones y temperaturas máximas, ya que juegan un papel importante en las instalaciones térmicas.

En este mismo capítulo se definirán algunas pautas a seguir para la incorporación de la instalación al edificio, además se explicará algunas partes del diseño hidráulico y térmico. Además de lo comentado anteriormente, en este capítulo se realizará un cálculo de prestaciones energéticas dando a conocer los dos objetivos claros que definen las condiciones a satisfacer.

Para acabar la memoria de descripción se mostrarán dos apartados en los que se explica el funcionamiento, montaje, puesta en marcha, uso, etc...

## 1.2. CONFIGURACIÓN

En este apartado se presta toda la atención a las instalaciones solares de producción de ACS, definiendo los diferentes tipos de instalación solar térmica, las denominaciones que se recomiendan utilizar, los distintos tipos de configuraciones que se pueden emplear y los criterios que se van a tomar para su selección.

Se ha comprobado de manera más que suficiente que el empleo adecuado de estos esquemas maximizará la fiabilidad del funcionamiento de las instalaciones solares, a pesar de ello es necesario incidir en que no sólo basta una buena elección de una configuración para un buen funcionamiento de la instalación. Asimismo, existen otras configuraciones que no se han incluido en el trabajo, ya que para conocerlas suficiente se requeriría mayor experiencia en su utilización y de esta manera poder verificar su fiabilidad. En ese caso, se podría evaluar la idoneidad de sus estrategias de funcionamiento, así como definir los criterios de integración de los distintos componentes. Para finalizar, se debe enfatizar que para el diseño de la instalación se debe evitar la complejidad ya que las configuraciones más sencillas acostumbra a dar como resultados instalaciones más fiables.

### 1.2.1 Sistemas solares prefabricados y sistemas solares a medida.

Por una parte, se encuentran los sistemas solares prefabricados también conocidos como sistema solar térmico (SST). Son sistemas cuya finalidad es producir ACS destinada a satisfacer pequeños consumos, estos sistemas se venden como una unidad directamente preparada para ser instalada. Para certificar su durabilidad y eficiencia, el SST puede estar constituido por un único componente integral, o bien, por un conjunto de componentes normalizados en cuanto a características, ensamblaje y configuración. Además, el SST debe ser ensayado como una unidad completa para certificar su eficiencia, durabilidad, etc. De manera que el resultado que proporcione sea representativo para todos los sistemas con la misma marca, componentes, configuración y dimensiones. Cabe destacar que, si un sistema prefabricado es modificado o alterado su configuración, ya sea cambiando uno

o más componentes, el sistema modificado se considero un sistema nuevo, para cuya caracterización sería necesario realizar un nuevo ensayo.

Por otro lado, existen los sistemas solares de calentamiento a medida también se conocen por instalaciones solares térmicas (IST), están definidos como sistemas contruidos de forma única y montados eligiéndolos de una lista de componentes. Las IST se consideran un conjunto de componentes que a pesar de ser ensayados separados unos de otros, los resultados de los ensayos se acoplan en una evaluación del sistema completo. Los sistemas solares de calentamiento a medida se dividen en sistemas pequeños a medida que forman parte del catálogo de un fabricante de productos, en el cual se especifican todos los componentes y posibles configuraciones de los sistemas. Cada posible combinación de componentes que conforma una configuración de la lista se considera un solo sistema a medida. La otra subdivisión es en sistemas grandes a medida que son diseñados de forma única para situaciones específicas. En general diseñados por fabricantes, ingenieros y otra serie de expertos.

### 1.2.2 Tamaño de las instalaciones solares térmicas.

Se realiza una division en 3 tipos de instalaciones. Las primeras son instalaciones inferiores a 7 kW, estas son instalaciones de unos 10  $m^2$ . Suelen ser sistemas prefabricados por lo que se elimina el riesgo a realizar un mal diseño y simplifica su montaje. Cabe destacar que las características constructivas del edificio, la radiación solar y la temperatura del lugar donde se encuentre la instalación condiciona la selección entre sistemas termosifón o de circulación forzada. En segundo lugar, se encuentran las instalaciones de tamaño mediano, las cuales suelen presentar entre 7 y 70 kW. Estas instalaciones abarcan entre 10 y 100  $m^2$  de superficie ocupada. Para las instalaciones de 7 a 35 kW para reducir el mantenimiento y el coste económico se emplean sistemas de intercambio de calor interiores al acumulador. Sin embargo, para instalaciones mayores, con una potencia de 35 a 70 kW, se recomienda el uso de sistemas de intercambio externo. Por último, se encuentran las instalaciones de gran tamaño o superiores a 70 kW, estas ocupan en torno a unos 100  $m^2$  aproximadamente. En este caso se emplean acumuladores de inercia en lugar de acumuladores de agua caliente sanitaria para compensar el coste económico a medida que aumenta el tamaño de la instalación. El coste del acumulador de inercia compensa el coste adicional del intercambiador y bomba.

Tabla 1. Tamaño de las instalaciones solares térmicas

| <b>Tamaño de las instalaciones</b>       | <b>Pequeñas</b> | <b>Medianas</b>      | <b>Grandes</b> |
|--|-----------------|----------------------|----------------|
| <i>Superficie de captación</i>           | $A < 10$        | $10 < A < 100$       | $A < 100$      |
| <i>Potencia solar (Ps)</i>               | $Ps < 7$        | $7 < Ps < 70$        | $Ps > 70$      |
| <i>Volumen de acumulación aproximado</i> | $V < 1.000$     | $1.000 < V < 10.000$ | $V > 10.000$   |

Como anotación acerca de las unidades de la Tabla 1, la superficie de captación (A) se ha evaluado en  $m^2$ , el volumen de acumulación aproximado (V) en litros y la Potencia Solar (Ps) en kW. Por último, hacer mención a que Ps es igual a la superficie de captación por  $0,7 \text{ kW}/m^2$ .

### 1.2.3 Definición de sistemas y circuitos de las instalaciones solares térmicas.

Una instalación solar térmica se dividirá en partes, estas partes la formarán sistemas que se caracterizan por las distintas funciones que desempeñan. Se establece la denominación de los sistemas y circuitos que componen una instalación solar térmica para el ACS que, en el caso más general, pueden estar constituidas por siete sistemas básicos y dos sistemas de interconexión.

De izquierda a derecha el primer sistema que aparece es el sistema de captación que se encarga de convertir la radiación que incide sobre el campo de captadores en energía térmica posteriormente, esta energía aumentará la temperatura de un fluido de trabajo que circula por el circuito primario. En segundo lugar, se tiene el sistema de intercambio cuya función es transferir el calor portado por el fluido de trabajo hacia el circuito secundario. En este caso se transfiere directamente al agua de consumo (Figura 1). Cuando ocurre esto se refiere a que tenemos un intercambio solar o de carga.

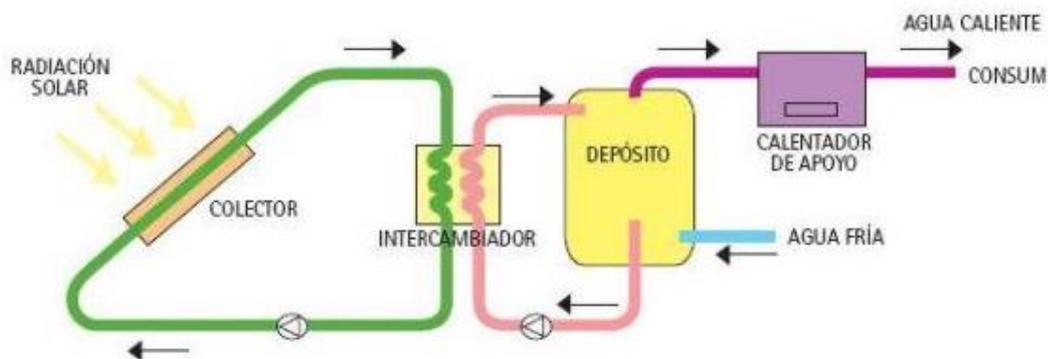


Figura 1: Esquema simplificado ACS.

Otra opción que aparece en este caso es el “intercambio de descarga”. Cuando el fluido de trabajo transfiere el calor al acumulador de inercia y este lo transfiere al agua de consumo.

En cualquiera de los dos casos el intercambiador puede ser interno o externo dependiendo si se incorpora dentro del acumulador correspondiente o si es un componente externo o independiente de la instalación.

El siguiente sistema de nuestro esquema simplificado es el sistema de acumulación cuya principal utilidad es la acumulación de la energía térmica hasta que se precise su uso, esta se almacena principalmente en un fluido líquido o en agua caliente. Dividiéndose en acumulación de inercia cuando utiliza un fluido intermedio que no se consume o en acumulación de consumo cuando contiene agua para consumo humano. Otros dos sistemas importantes a tener en cuenta son el sistema de apoyo que ayuda a proporcionar la energía que nos falta para cubrir la demanda prevista y el sistema de consumo que se compone de aparatos sanitarios para dar servicio de ACS. Otro sistema es el sistema hidráulico que está compuesto por tuberías, bombas, válvulas y otros accesorios que conectan los distintos sistemas entre sí. Se distinguen siete tipos distintos de circuitos:

- 1.- Circuito primario o solar que transporta la energía térmica en el campo de captadores.
- 2.- Circuito de carga cuya función es realizar el calentamiento del sistema de acumulación de inercia.
- 3.- Circuito de descarga encargado de la extracción el calor del sistema de acumulación de inercia
- 4.- Circuito secundario que es un circuito de agua para consumo humano que realiza el calentamiento del sistema de acumulación de consumo.
- 5.- Circuito de consumo que está comprendido desde la entrada de agua fría hasta la salida de agua caliente del sistema de apoyo.
- 6.- Circuito de distribución, comprende desde la salida de agua caliente sanitaria del sistema de apoyo hasta los

puntos de uso.

7.- Circuito de recirculación, se encarga de canalizar el circuito de retorno desde puntos del circuito de distribución próximos a los de consumo hasta el sistema de apoyo.

Para acabar, se encuentra el sistema de control, es el encargado, como su nombre indica, de controlar, bien sean las funciones de arranque y parada de bombas, así como otras actuaciones electromecánicas que se requieran.

#### 1.2.4 Criterios de clasificación de las pequeña instalaciones.

Las instalaciones pequeñas se rigen por el principio de circulación, este hace alusión al movimiento del fluido que se produce por el circuito primario de captadores. Estas pequeñas instalaciones tienen dos tipos de circulación. La circulación natural también conocido como termosifón. El fluido circula por convección libre que se produce por la diferencia de densidad entre el fluido caliente y el frío. Tiene la ventaja de que no necesita bomba de circulación y control, por tanto, se abaratan los costes, pero presenta mayor dificultad en cuanto a su integración arquitectónica. El otro tipo de circulación es la forzada. Esta se caracteriza por tener una bomba circuladora que produce el movimiento del fluido. Su integración arquitectónica es más sencilla y necesita un sistema de control. Cabe destacar que este tipo de circulación tiene costes adicionales como el de la energía eléctrica.

Tabla 2. Comparación entre los dos tipos de circulación.

| <b>CRITERIO</b>                                    | <b>Circulación Forzada</b>         | <b>Circulación Natural</b>                           |
|--|------------------------------------|--|
| <i>Bomba de circulación y control</i>              | Si necesita                        | No necesita  |
| <i>Caudales de calentamiento</i>                   | Caudal fijo                        | Función de la radiación solar                        |
| <i>Regulación de caudal</i>                        | Para ajustar saltos de temperatura | No es necesaria. Es natural                          |
| <i>Posición relativa del captador y acumulador</i> | No afecta al funcionamiento        | Acumulador debe situarse más elevado que el captador |
| <i>Pérdida de carga componentes</i>                | No es importante                   | Baja facilita el efecto termosifón                   |
| <i>Integración arquitectónica</i>                  | Más sencilla                       | Con mayor dificultad                                 |
| <i>Salto temperatura en captador</i>               | Pequeño (entre 5 y 10°C)           | Mayor (entre 10 y 20 °C)                             |
| <i>Temperatura máxima acumulador</i>               | Necesario sistema de control       | Sólo controlable por diseño                          |
| <i>Coste de la inversión</i>                       | Normalmente es mayor               | Suele ser menor                                      |
| <i>Coste de mantenimiento</i>                      | Mayor por control y bomba          | No tiene control ni bomba                            |
| <i>Coste de explotación</i>                        | Coste de la energía eléctrica      | No tiene costos adicionales                          |

Las pequeñas instalaciones poseen un sistema de intercambio que ayuda a transferir energía del circuito del campo de captadores al circuito de consumo. Este sistema de intercambio puede ser un sistema directo cuando la transferencia es directa ya que el fluido de trabajo es el agua de consumo, o sistema indirecto cuando el fluido de trabajo se encuentra en un circuito independiente, separado para que no sea distribuido por el circuito de consumo. El hecho de poder utilizar un intercambiador en los sistemas indirectos provoca que aumente la temperatura en el circuito primario, de esta manera se compensa la pérdida de efectividad del proceso de transferencia de calor a través de un intercambiador entre acumulador y captadores, si el aumento de temperatura fuera lo suficientemente importante se podría producir una disminución en el rendimiento del captador pero el efecto no es importante si el dimensionado y el mantenimiento del intercambiador es adecuado.

La utilización del intercambiador se justifica diciendo que este elimina o reduce los problemas que aparecen en los sistemas directos por depósitos calcáreos, heladas o presiones elevadas en el circuito primario. Se concluye comentando que no se recomienda el uso de los sistemas directos. En el cuadro siguiente se comparan varios criterios para la evaluación:

Tabla 3. Comparación de criterios entre los dos tipos de intercambio

| <b>Criterio</b>                           | <b>Sistema directo</b>        | <b>Sistema indirecto</b>                                |
|---|-------------------------------|---|
| <i>Fluido de trabajo</i>                  | Agua de la red                | Agua y el fluido del primario                           |
| <i>Presión de trabajo en circuitos</i>    | Todo a presión de suministro  | Pueden diseñarse los circuitos para presiones distintas |
| <i>Sistema de llenado</i>                 | No necesita                   | Si necesita   |
| <i>Sistema constructivo del conjunto</i>  | Más sencillo                  | Más complejo  |
| <i>Evolución del rendimiento</i>          | Empeora con el tiempo         | Se mantiene constante                                   |
| <i>Uso en zonas con riesgo de heladas</i> | Desaconsejado                 | Recomendado   |
| <i>Coste de la inversión</i>              | Menor                         | Mayor   |
| <i>Mayor costo de mantenimiento</i>       | Limpieza interna del captador | Fluido del circuito cerrado                             |

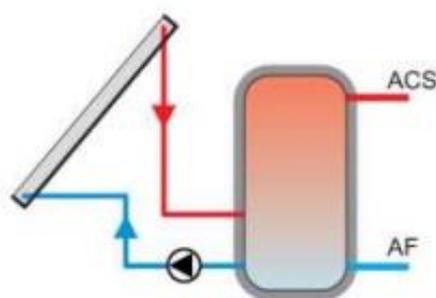


Figura 2: Sistemas directos de circulación forzada. [1]

El sistema de expansión es otro de los sistemas característicos de las instalaciones pequeñas, este se caracteriza porque el volumen del fluido se ve variado debido a la acción de la temperatura. Los sistemas de expansión se utilizan como medio para absorber dichas variaciones. La expansión puede ser abierta cuando el circuito se encuentra comunicado con la atmósfera de forma continua, o cerrada cuando el circuito no está en comunicación con la atmósfera. En la práctica solo se utilizan sistemas de expansión cerrados ya que el uso de sistemas abiertos provoca que el fluido se evapore y sea necesario una continua reposición de oxígeno y sales que producen corrosión.

En relación con el contenido de líquido, los circuitos primarios de las instalaciones solares pueden ser de dos tipos: De circuito lleno, cuando el circuito permanece siempre completamente lleno con el fluido caloportador, y cuando ha sido debidamente purgado, no contiene nada de aire. El otro tipo es de circuito con drenaje: cuando el circuito está a la vez parcialmente lleno de agua y de aire de forma que el líquido contenido en los captadores se puede vaciar dejando estos llenos solo con aire. El drenaje puede ser interior o exterior.

El drenaje interior cuando el aire permite hacer el vaciado de parte del circuito cerrado se alberga en el interior de éste. Normalmente dispone de un depósito o volumen adicional para acumular el líquido caloportador drenado de tal forma que, cuando la bomba se detiene, el fluido contenido en los captadores cae por gravedad ocupando completamente el depósito que está situado en la parte inferior desplazando el aire contenido en él que ascenderá llenando los captadores que están en la parte superior.

El drenaje exterior cuando el líquido caloportador puede ser drenado desde el captador hasta un desagüe o un recipiente externo si se quiere recuperar. El rellenado requeriría volver a aportar líquido al circuito y, por tanto, prever la reposición continua desde el exterior.

No son recomendable las instalaciones que utilizan el sistema de drenaje exterior por el contacto del circuito con el aire exterior y la necesaria reposición continua de fluido que puede afectar a la durabilidad del circuito. Si el líquido es agua de consumo y la reposición es con agua de la red, los problemas de durabilidad pueden agravarse en función de la calidad del agua. Los sistemas de circuito lleno y los de drenaje interior deberían ser los utilizados en los circuitos primarios de las instalaciones solares. Desde el punto de vista constructivo, son más complejos los de drenaje interior ya que requieren un cuidadoso trazado de tuberías con pendiente para que el vaciado sea completo y para que el aire sea completamente evacuado cuando la instalación comienza a funcionar.

Los sistemas de drenaje interior están siendo cada vez más utilizados en sistemas prefabricados para pequeñas instalaciones o como sistemas a medida de diseño normalizado desarrollado por fabricantes que lo comercializan con todas las garantías e instrucciones necesarias para su correcta ejecución. En lugar de proyectar estos sistemas, se recomienda el uso de los sistemas completos anteriormente referenciados que tienen resueltas las precauciones que es necesario adoptar en el diseño y dimensionado de estos sistemas para su correcto funcionamiento, entre otras: bomba de llenado y de circulación, distancias y alturas máximas y capacidades fluidos a acumular, etc.

Dependiendo de la forma de acoplamiento de los principales componentes, captador y acumulador las pequeñas

instalaciones se pueden clasificar en tres tipos:

Un sistema en el que todos los componentes, ya sean acumulador, captadores o los restos de accesorios se encuentran todos montados en una sola unidad lista para instalar, se le denomina sistema compacto, aunque físicamente estén diferenciados. Estos suelen ser característicos por ser montados en terrazas horizontales, que van dotadas de estructuras con soportes, o en tejados inclinados donde destaca la complejidad de la integración arquitectónica.

Otro sistema es el sistema integrado, este se denomina así cuando dentro del mismo sistema se realizan las funciones de captación y acumulación de energía, es decir, captador y acumulador constituyen un único componente y no es posible distinguirlos físicamente.

Por último, se diferencia el sistema partido, se denomina de esta forma cuando existe una separación física y distancia considerable entre el sistema de captación y el de acumulación. Estos sistemas tienen más diversidad a la hora de la integración arquitectónica, ya que pueden tratar de forma independiente los sistemas de acumulación y los de captación. Estos sistemas son sistemas de circulación forzada, a pesar de ello pueden funcionar por termosifón si la ubicación, distancias, trazados de tuberías y diseños, son adecuadas.

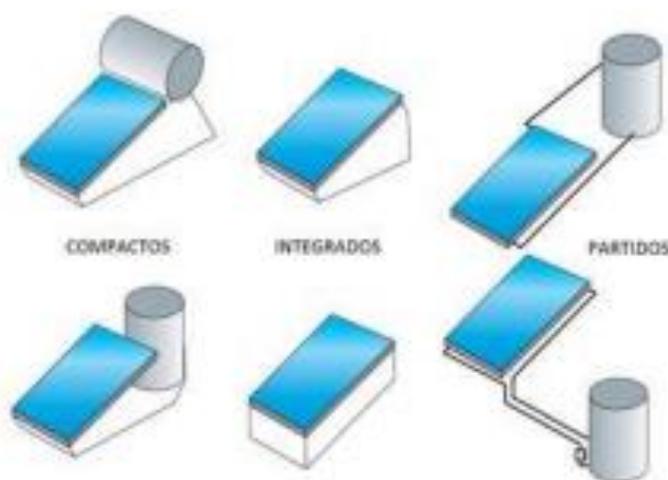


Figura 3. Distintos tipos de acoplamiento. [1]

A excepción de los sistemas compactos e integrados, las pequeñas instalaciones solares térmicas de ACS suelen utilizar captadores y acumuladores estándar que ayudan a ser utilizados de forma segura, de tal manera, que el diseño en su conjunto puede resolverse bien como sistema prefabricado o como sistema a medida, dependiendo de las necesidades de consumo. Se dice que a excepción de los sistemas compactos e integrados porque estos sistemas pueden incluir componentes específicamente desarrollados para ellos.

Cuando se tiene el sistema prefabricado se entiende que el equipo se ha diseñado por el fabricante. Este mismo lo ensaya en sus instalaciones, busca el resultado óptimo y lo pone en el mercado. Además, el fabricante lo trata en el laboratorio para acreditar su certificación. Los resultados son muy fiables y nos aseguran que siempre se repitan las instrucciones de montaje. Por lo que se concluye que los sistemas funcionarán correctamente y con las mismas prestaciones.

Con los sistemas pequeños a medida, no sucede lo mismo, al contrario de los sistemas prefabricados, el técnico tiene que diseñar pequeñas instalaciones conectando captadores solares, depósitos, estructuras, tuberías, etc. Este procedimiento se convierte en algo poco estable, sobre todo, si es necesario diseñar circuitos donde la circulación sea por termosifón, ya que el funcionamiento correcto de estos no se puede optimizar y en el caso de querer replicar el diseño, sería bastante difícil garantizar un funcionamiento uniforme de los mismos.

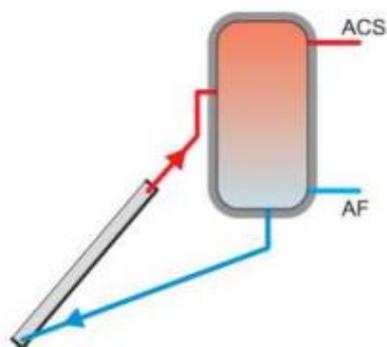


Figura 4: Sistemas directos de circulación natural.[1]

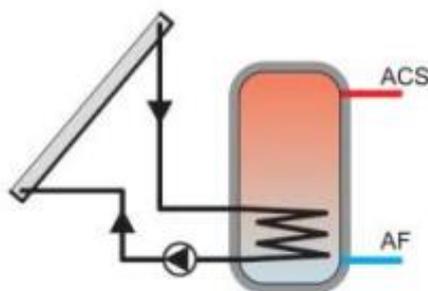


Figura 5: Sistemas indirectos de circulación forzada. [1]

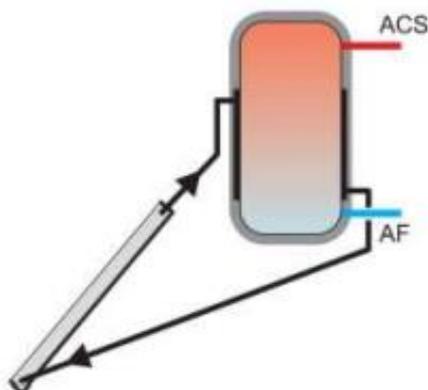


Figura 6: Sistemas indirectos de circulación natural. [1]

### 1.2.5 Configuraciones de las instalaciones medianas y grandes.

Los criterios de funcionamiento para este tipo de instalaciones son los mismos que para instalaciones pequeñas. Se le añadirán algunas observaciones:

En cuanto al principio de circulación este tipo de instalación debería de ser siempre de circulación forzada ya que un funcionamiento por termosifón puede suponer una reducción en el rendimiento térmico de la instalación. Esto se debe a que la diferencia de temperaturas necesaria para vencer la pérdida de carga aumenta a medida que lo hace el tamaño de las instalaciones, por lo que las temperaturas de trabajo son mayores haciendo que los captadores trabajen con peor rendimiento.

Si nos referimos al sistema de intercambio se recomienda usar sistemas indirectos con intercambiador. El problema que existe con los sistemas directos es que en zonas con riesgo de heladas aumenta la posibilidad de congelación del agua. Se recomienda que el diseño de las instalaciones debe prever que las incrustaciones calcáreas, sean los más pequeñas posibles en caso de existir y en caso de existir lo hagan en un componente accesible y fácil de mantener como debe ser un intercambiador de calor.

Se deberá tener en cuenta que cuanto mayor sea el campo de captadores más complejo es efectuar la instalación de drenaje interior por la dificultad que presenta el trazado de tuberías. Esto se debe a que debe haber una pendiente bastante pronunciada para que el vaciado sea completo.

Para seleccionar los sistemas de acumulación y de intercambio es necesario conocer los criterios que nos van a indicar qué acumulador es el adecuado, si el de inercia o el de consumo.

La limitación que presentan los acumuladores de consumo es la resistencia del tratamiento interior, sin embargo, los acumuladores de inercia solo están limitados por su propia resistencia a la temperatura máxima. Los acumuladores de consumo tienen como limitación la presión de red de alimentación de agua fría. El acumulador de inercia necesita dos sistemas de intercambio. El primer sistema el de carga que también lo necesita el acumulador de consumo, y el segundo sistema el de descarga.

A continuación, se describirán 2 criterios más para tratar de ver cual es el tipo de intercambiador que se necesita, bien interno o externo:

El primer criterio es el de estratificación, este se caracteriza porque con el intercambiador interno la estratificación es más fácil de realizarla. La instalación con intercambiador externo exige estudiar con más detalle las condiciones de circulación del agua producida por el circuito de carga.

El segundo criterio es la simplicidad, el intercambiador externo necesita dos circuitos forzados para su funcionamiento por lo que el intercambiador interno que solo dispone de un único circuito es más sencillo.

### **1.2.6 Configuraciones de instalaciones en edificios multivivienda**

Todas las configuraciones anteriormente mencionadas se pueden utilizar para la instalación de producción de ACS de un edificio multivivienda, simplemente teniendo en cuenta que se necesita añadir un sistema de distribución a cada una de las viviendas. Los elementos diferenciales y adicionales más significativos en estas instalaciones son la distribución de agua caliente o calor a cada una de las viviendas efectuada mediante un circuito de distribución, normalmente de largo recorrido y con recirculación, por lo que será necesario cuidar su diseño y ejecución para evitar unas pérdidas térmicas elevadas. Además, es necesario controlar el consumo en viviendas para realizar la distribución del gasto.

El primer sistema en clasificar será la instalación solar y sistema de apoyo centralizados. Toda la instalación incluyendo el sistema de apoyo, es centralizado y realiza la preparación del ACS que se suministra a las viviendas (Figura 7). El agua precalentada en la instalación solar pasa al sistema de apoyo donde, cuando es necesario, se termina de calentar hasta alcanzar la temperatura de consigna. Más tarde, el ACS se pone a disposición de cada una de las viviendas a través del circuito de distribución, en cada acometida a vivienda se debe instalar un contador para el control del consumo de agua caliente. Es importante que la lectura de contadores y la gestión de consumos como es la transmisión de datos, asignación de costes, emisión de recibos y gestión de cobro, sea lo más automatizada posible. Los sistemas de distribución requieren de un circuito de recirculación que permita garantizar la disponibilidad de agua caliente de forma casi instantánea en todas las viviendas.

Para instalar este tipo de configuración se quiere espacio suficiente en las zonas comunes, para que sea posible albergar tanto al sistema de captación como al de acumulación solar y al sistema de apoyo. Por el contrario, para los equipos de agua caliente en el interior de las viviendas no es necesario ningún espacio. En relación con las redes de suministro de agua, cada vivienda dispone de una acometida de agua fría con su correspondiente contador de la empresa de abastecimiento de agua situado en la centralización de contadores, y una acometida de agua caliente procedente del sistema de apoyo centralizado con su correspondiente contador de la comunidad de propietarios normalmente se sitúan en los rellanos del edificio, lo que viene siendo el exterior de la vivienda. Hay que destacar que el sistema solar a su vez deberá tener una acometida de agua fría con sección suficiente

para abastecer el consumo de todas las viviendas.

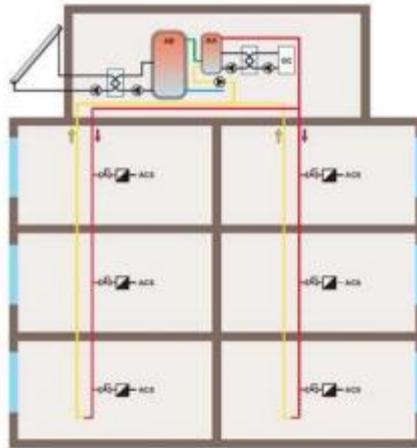


Figura 7: Instalación solar y sistema de apoyo centralizado. [1]

Otra instalación a tener en cuenta es la instalación solar centralizada con la variante de que ahora posee un sistema de apoyo distribuido (Figura 8), en este caso, la instalación solar centralizada, realiza el precalentamiento del agua que será llevada a su correspondiente temperatura de consigna mediante el sistema de apoyo que estará distribuido en cada una de las viviendas. Existe una única acometida y contador de agua fría para la instalación centralizada.

El circuito de distribución deberá poner a disposición de cada una de las viviendas agua precalentada por la instalación solar. Cada vivienda tendrá un contador de agua en la acometida de agua caliente que, en este caso, contabiliza el caudal de agua precalentada por la instalación solar. Cada vivienda tendrá un sistema de energía de apoyo individual que garantice que el agua alcance la temperatura de preparación y un circuito de distribución interior con recirculación para suministrar el agua caliente sanitaria a todos los puntos de consumo. Este tipo de instalaciones necesitan menos espacios comunes la instalación con todo centralizado, pero como defecto podríamos decir que necesita ocupar otros espacios de la vivienda donde se ubique el sistema de apoyo y los condicionantes que se necesitan para su instalación como son el suministro de energía, la ventilación y desagües, etc.

Otra de las instalaciones a estudiar es la instalación solar con acumulación distribuida (Figura 9) la cual se caracteriza porque no precisa de la medida individualizada del consumo de agua caliente. En cada vivienda se instala un interacumulador solar donde el agua de consumo es precalentada antes de entrar en el sistema de apoyo. En un circuito cerrado se transfiere la energía solar captada a los circuitos primarios de todos los interacumuladores solares situados que se sitúan en cada vivienda. Este circuito de calentamiento puede ser directamente el circuito primario de captadores o bien un circuito de carga cuando se incorpora un intercambiador solar para independizar circuitos lo que se realiza normalmente para tener un circuito primario de menor tamaño lo que permite usar menos anticongelante y confinar las mayores temperaturas del circuito primario en las partes del edificio más fácilmente accesibles de la cubierta. En este caso, no se necesita contabilizar el aporte de energía solar térmica a cada vivienda debido a que no existe una asociación entre el consumo de combustible y la repercusión a cada usuario, que no justifica el sistema de medida. En su lugar, lo que se realiza es la contabilización de la energía solar producida de forma centralizada a los efectos de poder verificar su rendimiento.

En la configuración con acumulación distribuida, el circuito de calentamiento únicamente funcionará durante las horas de funcionamiento de la captación solar lo que es una gran ventaja por la disminución de las pérdidas térmicas que se puede producir en el mismo. Por el contrario, las pérdidas térmicas en los acumuladores pueden ser globalmente más significativas y hay que controlarlas. Se requieren significativos espacios en las viviendas debido a la necesidad de tener que ubicar el acumulador solar y el sistema de apoyo lo que puede suponer un

problema para su implantación.

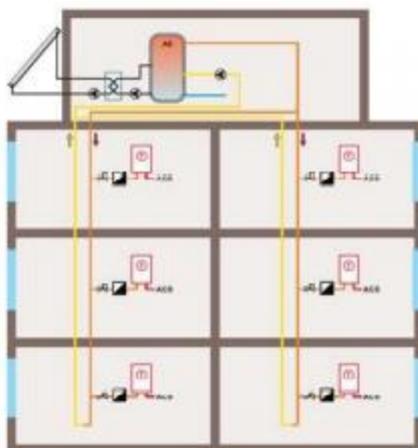


Figura 8: Instalación solar centralizada con sistema de apoyo distribuido. [1]

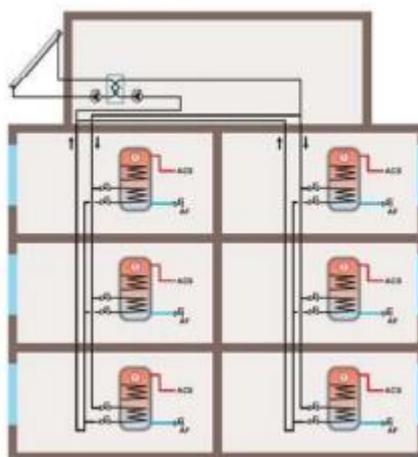


Figura 9: Instalación solar con acumulación distribuida. [1]

Otro tipo de instalación son las instalaciones solares centralizadas con intercambio distribuido (Figura 10). Al igual que ocurría en la configuración de acumulación solar distribuida, de la acometida de agua fría que tiene la vivienda se extrae la alimentación al sistema de preparación de agua caliente individual, de manera idéntica a como se haría en caso de no existir instalación solar. En este caso, cada vivienda dispone de un intercambiador de calor que realiza el precalentamiento del agua antes de la entrada al sistema de apoyo solo cuando ésta se consume. La instalación solar se realiza de forma que, desde un acumulador solar centralizado de inercia, se alimenta un circuito de descarga cerrado que alimenta a todos los primarios de los intercambiadores de consumo instalados en cada una de las viviendas. Este sistema de intercambio proporcionará un precalentamiento instantáneo del agua caliente cuando ésta se consuma.

Esta configuración, si la comparamos con la configuración de la acumulación distribuida, supone una menor ocupación de espacios, aunque, por el contrario, se necesite espacios de zonas comunes para albergar la acumulación centralizada.

Cabe resaltar en este caso la importancia que adquieren las pérdidas térmicas ya que son proporcionales a los tiempos de funcionamiento de los circuitos. El lazo de recirculación debe ser lo más próximo a los

intercambiadores individuales, de manera que cuando exista consumo, y se abra el paso del lazo de recirculación a éstos, no exista demora en producir el calentamiento del agua de consumo. Asimismo, la ubicación relativa, conexasión y control de cada intercambiador y el sistema de apoyo de forma que se minimicen encendidos innecesarios de éste y las pérdidas térmicas de los circuitos.

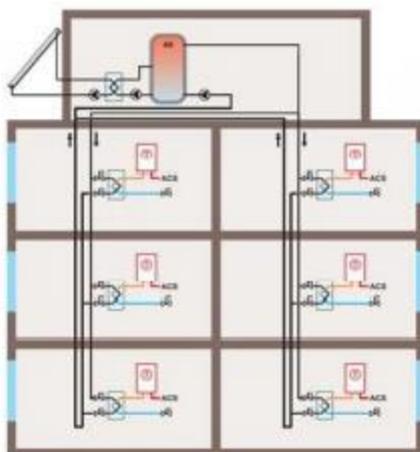


Figura 10: Instalación solar centralizada con intercambio distribuido. [1]

Por último, se destacará la instalación con doble acumulación solar, centralizada y distribuida (Figura 11). Se puede considerar una solución intermedia entre la acumulación solar distribuida y el intercambio distribuido. Se puede realizar de una manera más sencilla la integración del acumulador individual en la vivienda, para que se reduzca la capacidad de la acumulación distribuida, todo ello gracias a la existencia de un volumen solar centralizado. Esta configuración tiene una desventaja para su implantación, pero a su vez tiene la ventaja de poder reducir el volumen de los acumuladores en el interior de las viviendas. También, como en el caso de los sistemas con acumulación distribuida, es utilizable en zonas con aguas duras que dificultan la opción del intercambio distribuido. Además, tiene la ventaja de permitir la incorporación del sistema de apoyo distribuido en el acumulador solar. El circuito de distribución funciona bastantes horas al día por lo que, al contrario, esta configuración puede tener mayores pérdidas térmicas que las anteriores.

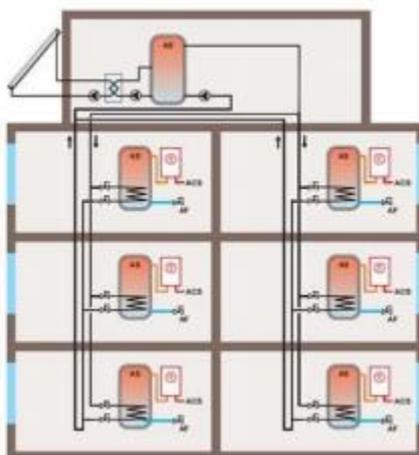


Figura 11: Instalación con doble acumulación solar, centralizada y distribuida. [1]

Las instalaciones, solar y de apoyo, completamente centralizadas son las más eficientes en edificios multivivienda que se utilizan, fundamentalmente, porque se utiliza un único sistema centralizado de generación

de calor de mejor rendimiento en lugar de equipos individuales por vivienda que son menos eficientes. Además, las prestaciones de los equipos individuales están muy afectadas por las múltiples actuaciones de marcha y paro para atender la demanda mientras que un servicio de ACS centralizado amortigua las variaciones de ocupación a la vez que aprovecha las condiciones de simultaneidad para alcanzar las mejores prestaciones.

Por el contrario, el mayor inconveniente y la principal atención que requiere esta configuración es la de minimizar las pérdidas térmicas de la instalación completa y, sobre todo, del circuito de distribución y recirculación. Es fundamental saber que estas pérdidas térmicas, llamadas de disponibilidad porque se generan solamente por disponer de ACS en las acometidas a las viviendas, existen, aunque el consumo de agua caliente sea muy pequeño o incluso nulo y pueden ser muy significativas si no se toman las medidas adecuadas de diseño y ejecución.

Se ha llegado a la conclusión de que la configuración completamente centralizada es la que supone una menor inversión y costes de explotación si se ejecuta de manera adecuada. Esta es la configuración que se debería utilizar por defecto, aunque, en algunos casos, debido a distintas circunstancias, sea necesario utilizar cualquiera de las otras, que, por lo general, no aportarán mayores ventajas que las derivadas de la individualización de los sistemas de apoyo y su coste de explotación.

En la Tabla 4 se mostrará a modo de resumen algunas de las características de cada instalación. Cabe destacar que:

1. Instalación solar y sistema de apoyo centralizados.
2. Instalación solar centralizada con sistema de apoyo distribuido.
3. Instalación solar con acumulación distribuida.
4. Instalación solar centralizada con intercambio distribuido
5. Instalación doble acumulación solar, centralizada y distribuida.

### **1.3. COMPONENTES**

Es fundamental hacer uso de unos materiales y componentes que se adapten de la forma óptima posible a las condiciones de uso para asegurarnos así una larga durabilidad en el tiempo.

Para la selección del tipo de captador solar se tendrá en cuenta, principalmente, cuál va a ser la temperatura de trabajo de la instalación, esta temperatura estará ligada a la aplicación a la que se va a abastecer. En caso de necesitar altas temperaturas de operación, se hará uso de captadores con curvas de rendimientos que proporcionen saltos térmicos significativos.

Para seleccionar los componentes, como pueden ser los acumuladores solares para el ACS, será imprescindible definir las temperaturas y presiones, máximas y mínimas, que se van a alcanzar en cada uno de los tramos de los circuitos. Se tendrá que prestar especial atención en los revestimientos interiores de protección, así como en los componentes que van a quedar situados en el exterior.

Para los materiales utilizados en el exterior será fundamental conocer sus especificaciones, sus requisitos de resistencia a condiciones extremas.

Por último, se revisará la compatibilidad de todos los componentes y materiales utilizados con fluidos de trabajo que se vayan a utilizar ya sea el agua de red o una mezcla anticongelante.

#### **1.3.1 Captadores solares planos**

Es un dispositivo que convierte la radiación solar captada en la energía térmica que se transfiere a un fluido de trabajo aumentando su temperatura. El captador solar plano es el que genera calor en las instalaciones solares térmicas, siendo este el principal componente del sistema de captación. El captador deberá estar preparado para soportar condiciones climáticas adversas, y en algunas condiciones, extremas.

Los captadores solares planos basan su funcionamiento en el denominado “efecto invernadero” que aprovecha las propiedades de transmisión de la cubierta que permite el paso de la radiación solar que a su vez incide en la superficie del absorbedor calentando un fluido.

Tabla 4. Comparación entre las diferentes configuraciones.

| <b>Diferentes Instalaciones</b>  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |
|--|--|--|--|--|--|
| <i>Alimentación de agua fría a la instalación solar</i>                  | Centralizada   | Centralizada   | Individual   | Individual   | Individual   |
| <i>Contador del consumo de agua fría de la empresa de abastecimiento</i> | Para consumo de agua caliente centralizada de la comunidad | Para consumo de agua caliente centralizada de la comunidad | Para consumo de agua fría y preparación de ACS individual por vivienda | Para consumo de agua fría y preparación de ACS individual por vivienda | Para consumo de agua fría y preparación de ACS individual por vivienda |
| <i>Contador del consumo individual de agua caliente</i>                  | Necesario. Gestión por la comunidad                        | Necesario. Gestión por la comunidad                        | No necesita  | No necesita  | No necesita  |
| <i>Sistema de apoyo</i>  | Centralizado   | Individual   | Individual   | Individual   | Individual   |
| <i>Eficiencia del sistema de apoyo</i>                                   | Máximo   | Menor  | Menor  | Menor  | Menor  |

Los captadores en su mayoría, suelen estar formados por una cubierta transparente que suele ser de vidrio atendiendo a varias funciones entre ellas reducir las pérdidas por radiación y convección, asegura la estanqueidad del captador protegiendo a los componentes interiores frente de agentes externos. El absorbedor, es una placa, en su mayoría de metal, que se calienta al recibir la radiación del sol que ha atravesado la cubierta, el rendimiento del captador depende en gran medida del tipo y calidad del tratamiento superficial del absorbedor que básicamente determina su capacidad de absorber radiación y su capacidad de emitir radiación cuando se calienta. Otro componente del captador solar plano es un circuito hidráulico por el cual circula el fluido caloportador, este debe garantizar la correcta transferencia del calor generado en el absorbedor. El aumento de la temperatura del fluido es el efecto útil que se pretende conseguir que, a su vez, hace disminuir la temperatura del absorbedor. Es imprescindible un buen contacto térmico entre la parte plana del absorbedor y las tuberías del circuito para facilitar la transferencia de calor al fluido por conducción. Los captadores además poseen un aislamiento en la parte posterior y en los laterales que reducen las pérdidas térmicas del absorbedor. Normalmente se utiliza lana de vidrio o lana mineral y, en algunas veces, poliuretano rígido, pero en este caso y para que no le afecten las elevadas temperaturas de estancamiento del captador, se toman medidas incorporando una capa de lana mineral intermedia entre el absorbedor y el poliuretano. Por último, la carcasa. Esta es la caja que contiene al resto de los componentes, los protege del exterior y da rigidez al conjunto. La carcasa debe tener una elevada resistencia mecánica, un buen comportamiento frente a la corrosión y a las variaciones de temperatura. Habitualmente se

emplea aluminio, acero inoxidable, acero galvanizado y lacado o material plástico reforzado con fibra de vidrio. Normalmente se fabrican las carcasas con perfiles extruidos para construir el marco y una lámina plana en el fondo, aunque también se utilizan las carcasas realizadas con una única chapa, normalmente de aluminio, a la que se proporciona su forma por embutición.

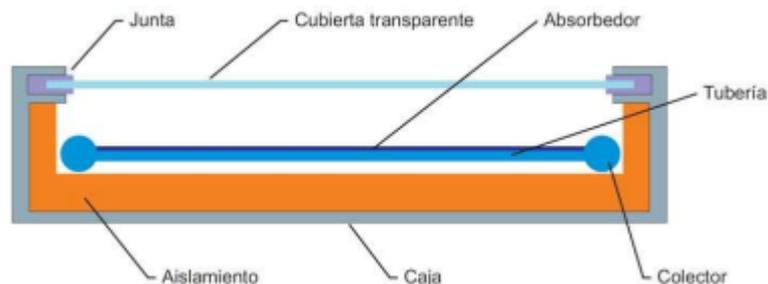


Figura 12. Sección de un captador solar plano indicando sus componentes.

Existe una gran variedad de captadores solares. Entre ellos se encuentran los captadores sin cubierta, estos a pesar de no tener cubierta ni carcasa resisten bien a las condiciones externas para la producción de ACS. Existen también los captadores con varias cubiertas, estos son más caros, tienen una transmitancia más pequeña lo que provoca que se disminuyan las pérdidas por la cara que está expuesta a la radiación solar. Otra variación de captadores son los que tienen cubierta TIM, estos utilizan aislantes TIM, que son estructuras transparentes que reducen bastante las pérdidas por convección. Los captadores pueden ser de tipo CPC, que con captadores de concentración cilindro-parabólico compuesto, estos disponen de canales reflectores con tubos con pequeñas aletas. También existen captadores planos de vacío cuyos captadores se les hace el vacío en su interior. Por último, se destacan los captadores híbridos, estos se caracterizan por producir electricidad y dar calor combinando en un mismo panel las tecnologías fotovoltaicas y térmicas.

Para la correcta selección del captador solar se deben evaluar algunos factores como son la vigencia del certificado de homologación del captador emitido por el organismo competente conforme a la normativa establecida. La disponibilidad de los resultados del ensayo: parámetros de rendimiento del captador, la pérdida de carga, temperatura de estancamiento y durabilidad. Las características de los materiales que lo componen: espesor y calidad del vidrio, materiales y tratamiento del absorbedor, material del circuito hidráulico, formas de conexionado exterior, tipo de aislamiento y materiales de la carcasa. La facilidad para configurar baterías de captadores y los tipos de accesorios de conexión y de sujeción, número máximo de captadores por batería, así como procedimientos de montaje. La capacidad de adaptación al edificio y a las condiciones de generales de la instalación. Los requisitos exigibles al fluido de trabajo que se pueda utilizar. La disponibilidad de un manual de instrucciones de montaje y utilización que sea fácil de entender. Las condiciones de mantenimiento previstas en el manual. Las formas de embalaje, transporte y almacenaje previstos. Las condiciones y los plazos de la garantía del fabricante y del distribuidor. Las referencias de instalaciones en los que se ha utilizado y los años de experiencia constatable. El costo de adquisición del captador y de los accesorios necesarios para su montaje y acoplamiento, estructura, etc. Los costos de transporte y montaje incluso las diferencias de costos de la instalación asociada a cada caso específico. Realizar un análisis comparativo de las prestaciones energéticas de la instalación estudiando los resultados de los programas de cálculo con distintos captadores.

### 1.3.2 Resto de componentes de una instalación solar

En las instalaciones solares térmicas de producción de ACS se han utilizado los sistemas de acumulación en forma de calor sensible y fundamentalmente utilizando agua como fluido caloportador que son los tipos de acumulador solar que se analizarán.

Los acumuladores solares están formados por un depósito donde se almacena gran parte de la energía calorífica captada durante el día por el campo de captadores. Puede ser de agua caliente sanitaria o de inercia dependiendo lo que se requiera en cada instalación. La diferencia entre uno y otro se basa fundamentalmente en las

condiciones extremas que puede soportar el acumulador de inercia frente al de ACS. Cuando un acumulador lleva incorporado uno o más intercambiadores de calor se le denomina interacumuladores. Un componente fundamental es el intercambiador de calor que pueden ser externos o internos. Los intercambiadores de calor siempre separan circuitos que pueden contener fluidos diferentes y que se encuentran a distintas presiones y temperaturas.

La bomba de circulación podrá ser del tipo en línea, bien del tipo de rotor seco o húmedo. Los materiales de la bomba del circuito primario deberán ser compatibles con las mezclas anticongelantes y en general con el fluido de trabajo que se utilice.

Las tuberías también juegan un papel importante en una instalación solar. En el circuito primario de la instalación solar se suelen utilizar tuberías de cobre, acero negro o acero inoxidable, se utilizará un material u otro dependiendo de las condiciones de funcionamiento. No se recomienda el uso de tuberías de material plástico en el circuito primario por la falta experiencia. En el circuito secundario podrá utilizarse cobre, acero inoxidable y material plástico aptos para uso sanitarios. Habrá zonas donde se alcancen temperaturas superiores a las habituales de producción de ACS por lo que a pesar de poder utilizar materiales de plásticos no se recomiendan. Los vasos de expansión de las instalaciones solares deberán ser siempre cerrados. Los vasos utilizados en los circuitos primarios deberán de tener una temperatura máxima de funcionamiento superior a 100°C. Estos vasos también se instalan en circuitos de consumo para evitar el accionamiento de las válvulas de seguridad y absorban la dilatación del agua caliente.

En una instalación se pueden encontrar diferentes tipos de válvulas y accesorios hidráulicos entre ellos válvulas de corte que se utilizan para cerrar el paso de fluido a través de una tubería o un equipo, válvulas de seguridad que expulsa el fluido de trabajo al exterior del circuito y evita presiones elevadas, válvulas antirretornos que impiden el paso del fluido en un sentido y permite la circulación en el otro, válvulas de regulación de caudal o equilibrado, estas se utilizan para controlar y regular los caudales lo que permite equilibrar hidráulicamente los circuitos, las válvulas de presión diferencial cuya función es mantener constante la diferencia de presión entre dos puntos de un circuito, válvula mezcladora, estas son válvulas de tres vías que mezclan el agua caliente de la acumulación con agua fría de red para regular la temperatura del agua que alimenta a los puntos de consumo a través del circuito de distribución. Por último, la válvula de llenado automático de agua de red que tiene la función de reponer circuitos cerrados, como el primario y mantener la presión mínima cuando se han producido pérdidas de fluido por accionamiento de válvulas de seguridad.

## 1.4. CONDICIONES DE TRABAJO

En las instalaciones térmicas las condiciones de trabajo juegan un papel muy importante. El proyectista define las condiciones extremas de funcionamiento, tanto presiones como temperaturas. En ningún caso se deberá sobrepasar estas, para que no afecten al funcionamiento de la instalación. La utilización de materiales plásticos requiere un especial cuidado por su mayor sensibilidad a unas condiciones extremas de presión y temperatura. Es necesario considerar a esos efectos, la resistencia y durabilidad de la tubería, así como la estanqueidad de los accesorios de conexión y que en el circuito pueda producirse vapor.

En caso de utilizar anticongelante, existe el riesgo de que éste se pueda degradar y pierda sus propiedades anticongelantes para ello se debe elegir aquel que cuente con una temperatura máxima adecuada.

## 1.5. INCORPORACIÓN EN LOS EDIFICIOS

Se buscará una aportación positiva tanto estética como de diseño a la hora de incorporar una instalación solar a un edificio. Para una integración adecuada se recomienda buscar un lugar soleado para la superficie de captación lo más cercado posible al sistema de acumulación, al sistema de apoyo y a los puntos de consumo, buscar al sur como orientación geográfica, siendo consciente de que desviaciones de hasta 45° respecto a esta orientación no afecta demasiado las prestaciones de la instalación. Se tratará de evitar que se produzcan sombras a la hora de diseñar la disposición del campo de captación. El sistema de captación debe disponerse siempre que sea posible

en baterías de igual tamaño que deben estar distribuidas de forma homogénea en el espacio disponible. El equipo de apoyo se conectará en serie con el equipo solar para que de esta manera la temperatura de entrada al sistema de apoyo sea la misma que la de salida de la parte solar.

En los puntos de consumo cuyo tratamiento térmico es 50°C se debe colocar una válvula termostática para cuando se utilice el tratamiento de choque térmico a 70°C para prevenir casos de legionelosis. Además, se tratará de reducir el consumo energético producido por el circuito de recirculación, para ello se utilizará una válvula de tres vías de forma que cuando el acumulador solar esté más caliente que el retorno, éste sea conducido a través del solar.

En los edificios será necesario evacuar fluidos al exterior de la instalación, es en este momento donde se hace uso de válvulas de seguridad, drenajes, etc.). Comprobando la resistencia de las redes de saneamiento ya que se pueden producir a altas temperaturas. A veces puede ser necesario un sistema de recogida de agua de condensación en captadores. Se deberá proteger al usuario y limitar el acceso a determinados recintos para ayudar en las actividades de uso y vigilancia.

## 1.6. DISEÑO HIDRÁULICO Y TÉRMICO

### 1.6.1 Sistema de captación

Siempre que sea posible se tratará de utilizar baterías y trazados iguales. Además, se optimizará el número de captadores de las baterías y el tipo de conexiones entre ellas mismas. Otra medida para tener en cuenta será el reducir la cantidad de válvulas del primario al mínimo imprescindible, ya que casi siempre ésta se instala en el exterior. Para reducir costes y pérdidas se tratará de minimizar lo máximo posible los recorridos del circuito primario.

### 1.6.2 Sistema de acumulación

Se deberá tener un volumen de acumulación suficiente para almacenar toda la energía captada diariamente. Como recomendación se suele utilizar una relación entre el volumen de acumulación  $V$  en litros y superficie de captadores  $A$  en  $m^2$  de  $V/A=75$  litros/ $m^2$ .

Siempre se intentará que todo el volumen de acumulación se disponga en un único acumulador, vertical e instalado en el interior del edificio. Cuando esto no sea posible y se tenga que utilizar varios acumuladores, se deberá estudiar el funcionamiento de manera detallada. Se buscará una configuración vertical en cuanto a los sistemas de energía auxiliar incorporados en el acumulador solar para mejorar el rendimiento global de la instalación.

En los sistemas de acumulación distribuida, es necesario minimizar las pérdidas térmicas de los acumuladores que en su mayoría serán mayores en el caso de los sistemas de acumulación centralizada.

### 1.6.3 Sistema de intercambio

Es prioridad que la efectividad no sea inferior al 0,7. Para ello se deberá seleccionar correctamente los parámetros de diseño de un intercambiador externo, tales como la potencia, caudal, salto térmico...

En el caso de intercambiadores internos la potencia de intercambio es proporcional a la superficie del intercambiador incorporado en el acumulador solar. Se recomienda tener una superficie de intercambio superior a 0,2  $m^2$  por cada  $m^2$  de superficie de captación.

En edificios multiviviendas, es necesario garantizar que por cada intercambiador individual se tenga un caudal nominal correspondiente en el primario que asegure un salto térmico correcto en el intercambiador, a pesar de que el caudal total del circuito de distribución se calcule aplicando los coeficientes de simultaneidad correspondientes.

#### 1.6.4 Circuito hidráulico

En primer lugar, se definen los caudales correspondientes al esquema de principio de la instalación elegida. Posteriormente, se necesitará racionalizar el consumo eléctrico de las bombas dimensionando correctamente las bombas de circulación. Se utilizará solo las válvulas que realmente sean necesarias para un mantenimiento correcto. Además, los sistemas de llenado de agua de red deben tener una válvula de corte que debe permanecer normalmente cerrada y los de llenado con anticongelante, cuya función es introducir la mezcla ya sea de forma manual o automática, no deben de tener ningún sistema de llenado directo del circuito con agua de red.

### 1.7. CÁLCULO DE PRESTACIONES ENERGÉTICAS

Existen dos objetivos que definen las condiciones a satisfacer en cuanto a las prestaciones energéticas de las instalaciones solares térmicas para agua caliente sanitaria.

En primer lugar, se debe cumplir los requisitos mínimos establecidos por la normativa local, regional o nacional. El cálculo tendrá que comprobar que la instalación cumple con todos los niveles normativos que se exigen. Se tendrá como finalidad verificar que se realiza en las mismas condiciones para cualquier tecnología distinta, lo que puede requerir la comparación con otros sistemas de producción térmica como son calderas convencionales o de biomasa, etc.

En segundo lugar, el cálculo deberá seleccionar la solución óptima, comparando las configuraciones posibles. Tipos de captadores, sistema de acumulación, superficie de captación, volumen de acumulación, así como el resto de los componentes. Será necesario que los datos de partida sean iguales para poder comparar soluciones. Estos datos de partida serán los parámetros de uso con los que se determina la demanda de ACS.

En cualquiera de los casos, buscando que las soluciones sean lo más comparables posible, los datos de partidas para efectuar los cálculos deberán ser los mismos:

Los parámetros de uso con los que se determina la demanda energética de ACS, que son el caudal de consumo de agua caliente a una determinada temperatura y las temperaturas de agua fría. Los parámetros climáticos de radiación solar y temperatura ambiente que deberán ser referenciados a bases de datos de fuentes oficiales, y por último los criterios para calcular las pérdidas térmicas de las instalaciones, evaluar las demandas y consumo energéticos. A falta de verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos por la normativa, se debe definir criterios y procedimientos que permitan evaluar y comparar las tecnologías de producción de energía térmica, tanto fósiles como renovables. Lo que significa que el proyectista deberá considerar en su análisis el uso de métodos de dimensionado y cálculos validados por modelos de simulación y contrastados con medidas experimentales. Además de datos de funcionamiento reales de las instalaciones que permitan contrastar que se van a alcanzar los resultados previstos.

### 1.8. MONTAJE, PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA

Una de las fases más críticas en una instalación es el montaje, es por ello por lo que hay que prestar una mayor atención. Para asegurar un correcto funcionamiento es necesario, como se ha comentado previamente, prestar especial atención a la selección de soldaduras a realizar, anclaje y ubicación de equipos. Se deberá realizar una revisión previa al montaje de una instalación solar térmica comprobando que se cumpla especificaciones y normativa vigente. Una vez que se ha realizado la comprobación previa al montaje, se realiza el montaje. Posteriormente, antes de poner en marcha la instalación se realizarán pruebas y ajustes para comprobar que el montaje cumple la normativa, pliego de condiciones, etc. Una vez que se hayan realizado las pruebas es necesario comprobar las operaciones de limpieza, llenado, purga de aire y presurización de circuitos para empezar a funcionar. Por último, una vez puesta en marcha la instalación se deberán realizar pruebas de funcionamiento que indican el encendido y apagado diario, evolución diaria de temperaturas, entrega de agua caliente y sistemas de protección de la instalación.

## 1.9. OPERACIÓN, USO Y MANTENIMIENTO

Se tratará de realizar un adecuado uso y mantenimiento de las instalaciones solares para maximizar su aprovechamiento energético, y prolongar su vida útil. Las instalaciones solares térmicas tienen algunas características particulares que hacen necesario que los planes de vigilancia y mantenimiento incluyan esos aspectos que la diferencia de las instalaciones convencionales de manera más concreta. Hay constancia de instalaciones que han durado entre 20 y 35 años gracias a un adecuado mantenimiento, al igual, que hay instalaciones que por a causa del descuido y por falta de mantenimiento a los pocos años se vuelven inservibles. Un claro ejemplo es el caso de las instalaciones que se quedan sin anticongelante y cuyas captadores se rompen por culpa de las heladas. Para ello se necesita disponer de un adecuado Manual de Instrucciones (MI) con toda la información de la que deben disponer el usuario y el encargado de mantener el funcionamiento de la instalación para que se realice un uso adecuado, garantizando la seguridad y durabilidad. El plan de vigilancia estable una forma de realizar el seguimiento del funcionamiento para tener la seguridad de que los valores operacionales de la instalación sean los correctos. Los procedimientos se establecen en función de los sistemas de medida disponibles y se establece el criterio de decisión relativo a si la vigilancia la realiza un operador del servicio de mantenimiento o el propio usuario.

En cuanto a los niveles de seguimientos podemos distinguir la observación simple de los principales indicadores y parámetros de funcionamiento. Los sistemas electromecánicos de avisos y los sistemas de tele-monitorización. Para la vigilancia manual de la instalación, se pueden detallar indicadores a utilizar para controlar el correcto funcionamiento de la instalación solar. Los indicadores son la presión del circuito primario, el sistema de control, la circulación de fluidos, la transferencia de calor y temperaturas de funcionamiento y la medida de energía y del rendimiento.

Por último, destacar que el programa de mantenimiento deberá incluir las operaciones necesarias para que el sistema funcione correctamente y prolongar la instalación lo máximo posible. [1]

## 1.10 EL MERCADO DE LA ENERGÍA SOLAR EN ESPAÑA

En España en el año 2019 ha incrementado un 1% los megavatios térmicos, con respecto al año 2018. Según un estudio realizado por ASIT, se instalaron 145 megavatios térmicos lo que equivale a  $207.150 m^2$  de superficie de captación. Esta es una cifra que supera los 3,15 gigavatios térmicos en el acumulado de potencia instalada en dicho año, lo que viene significando que más de 4,5 millones de  $m^2$  instalados operativos. La representación gráfica que se mostrará en la Figura 13 es la distribución por cada tipo de captador y sistema del nuevo parque que se ha instalado en 2019.

Se observa que los captadores solares planos ocupan algo más de la mitad siendo esto significativo a unos  $108.750 m^2$ . Otra singularidad de este gráfico es que, si unimos los captadores híbridos PVT, Tubos de vacío, y Captadores de Plástico ocupan un porcentaje que no alcanza los 7%, si los analizamos individualmente al lado de las otras dos grandes partes podríamos llegar incluso a despreciarlos. Por último, fijándonos en la otra gran pieza del gráfico, se observa que los sistemas prefabricados suponen un 41% del total, es decir, alcanza casi la mitad del total de la potencia térmica instalada en dicho año. Que a su vez equivale a  $84.900 m^2$ .

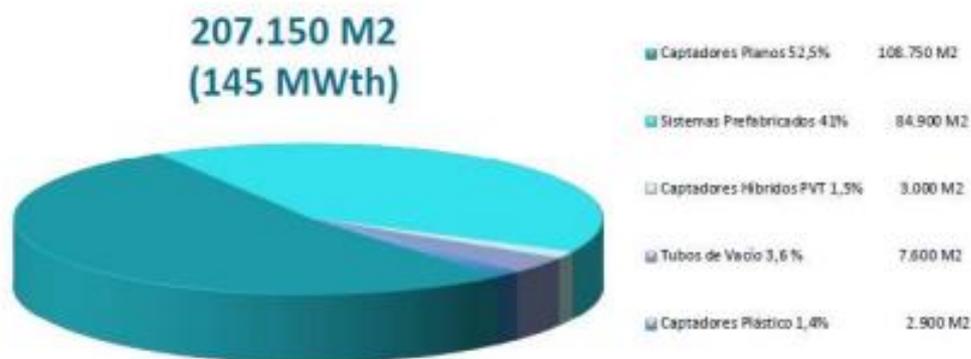


Figura 13. Distribución por tipo de captador y sistema en 2019 [2]

Este parque recién presentado, desarrolla la siguiente distribución comparándolo con los diferentes segmentos de mercado que ya existen (Figura 14).

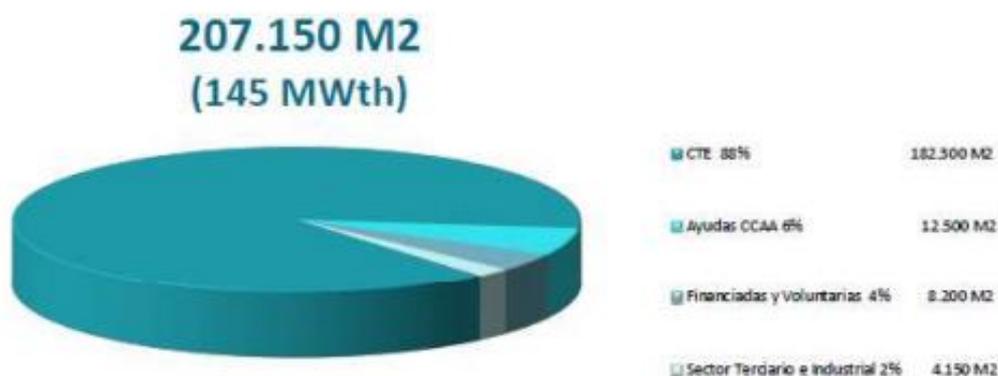


Figura 14. Distribución por segmentos de mercado [2]

La conclusión que se puede extraer de este gráfico es que el segmento correspondiente al Código Técnico de la Edificación ha crecido con respecto al año anterior un 2%. Ha pasado de 182.300 m<sup>2</sup> frente a 180.000 m<sup>2</sup> lo que tiene su sentido ya que se relaciona con el incremento de viviendas finalizadas en 2019 respecto a 2018. [6]

En esta tabla (Tabla 5) se muestran los datos de la superficie solar térmica acumulada en España hasta 2018 y distribuida por comunidades autónomas.

Se observa que en España la superficie solar térmica total instalada supera los 4 millones de m<sup>2</sup>. Si hay que destacar una entre todas las comunidades de la Tabla 5, destacamos Andalucía que ocupa la mitad de la superficie total instalada a nivel nacional.

En estas gráficas que se mostrarán a continuación se muestra la evolución de la vivienda desde antes de la recesión económica de 2008 y la superficie de captación instalada anual. De tal manera que nos ayudará a entender el desarrollo del mercado de la energía solar térmica en un rango amplio de tiempo.

Tabla 5. Superficie acumulada instalada en España en 2018 [3]

|                                   | <b>Instalación Mixta</b> | <b>Solar Térmica BT</b> | <b>TOTAL</b>     |
|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------|
| <i>ANDALUCÍA</i>                  | 888                      | 1.177.380               | 1.178.268        |
| <i>ARAGÓN</i>                     | 30                       | 90.792                  | 90.822           |
| <i>CANARIAS</i>                   | 98                       | 253.255                 | 253.353          |
| <i>CANTABRIA</i>                  | 117                      | 14.519                  | 14.636           |
| <i>CASTILLA Y LEÓN</i>            | 15                       | 182.482                 | 182.497          |
| <i>CASTILLA-LA MANCHA</i>         | 228                      | 229.096                 | 229.325          |
| <i>CATALUÑA</i>                   | 72                       | 591.025                 | 591.097          |
| <i>CIUDAD DE CEUTA</i>            |                          | 3.452                   | 3.452            |
| <i>CIUDAD DE MELILLA</i>          |                          | 4.490                   | 4.490            |
| <i>COMUNIDAD DE MADRID</i>        | 526                      | 427.196                 | 427.723          |
| <i>COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA</i> | 29                       | 48.168                  | 48.197           |
| <i>COMUNIDAD VALENCIANA</i>       | 906                      | 276.672                 | 277.578          |
| <i>EXTREMADURA</i>                | 362                      | 35.321                  | 35.682           |
| <i>GALICIA</i>                    | 478                      | 146.962                 | 147.440          |
| <i>ISLAS BALEARES</i>             | 100                      | 143.613                 | 143.712          |
| <i>LA RIOJA</i>                   | 2                        | 11.053                  | 11.055           |
| <i>PAIS VASCO</i>                 | 3                        | 91.110                  | 91.113           |
| <i>PRINCIPADO DE ASTURIAS</i>     | 17                       | 52.854                  | 52.871           |
| <i>REGIÓN DE MURCIA</i>           | 52                       | 61.612                  | 61.664           |
| <i>NO REGIONALIZABLE</i>          |                          | 61.612                  | 61.664           |
| <b>TOTALES</b>                    | <b>3.923</b>             | <b>4.198.847</b>        | <b>4.202.770</b> |



Figura 15. Viviendas iniciadas 2000-2008 [2]



Figura 16. Viviendas finalizadas 2000-2018 [2]

Tanto en la Figura 15 como en la Figura 16 se observan las tendencias alcistas que presentan las viviendas iniciadas y finalizadas. Se puede ver que alcanzó sus máximos entre 2006 y 2007, justo antes de la gran crisis económica ocasionada por la burbuja inmobiliaria que sufrió España como país. La cifra desde el máximo que fue en 2007 se ha visto disminuida en unos 92/93% respecto al 2016. Pasó de 600.000 a tan solo unas 40.000. Sin embargo, a partir del año 2016 se aprecia una leve mejoría pues ya en 2017 se consolida el cambio de tendencia en cuanto a viviendas iniciadas y previsiblemente también las finalizadas en 2018. En 2017 pasó a ser 80.000 viviendas iniciadas frente a las 64.000 del año anterior.

Los datos de los captadores solares fabricados en España e instalados en territorio español muestran una especie de contraste con la gran capacidad de producción de los fabricantes nacionales. España tiene una producción aproximadamente de 1.300.000  $m^2$  fabricandose 206.675  $m^2$  en el año 2019, se dice esto porque sólo es un 15% de su potencial, de los cuales 138.000  $m^2$  se exportaron y 68.675  $m^2$  se instalaron en España.

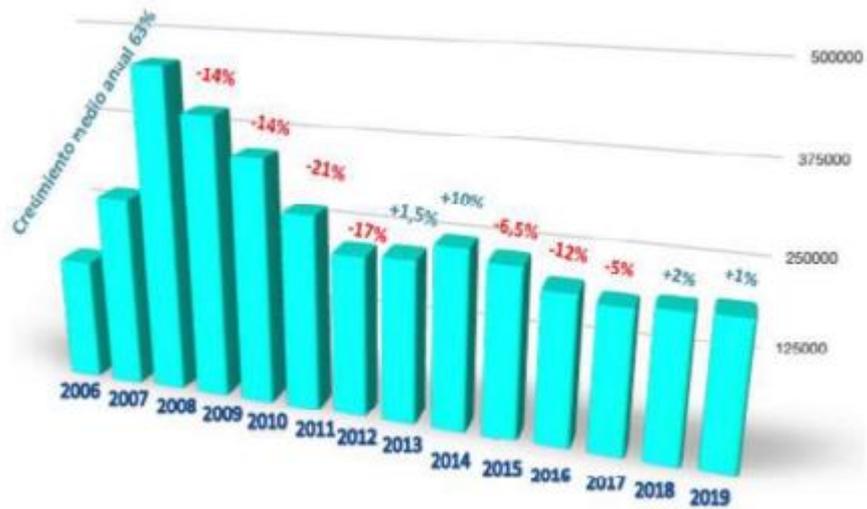


Figura 17. Desarrollo del mercado de 2006-2019 [2]



Figura 18. Distribución por origen de fabricación en 2019 [2]

En el Plan de Energías Renovables 2011-2020 se estableció como objetivo 10 millones de  $m^2$ . Sin embargo, tomando los resultados globales acumulados a cierre de 2019, se preveía que en 2020 se alcanzara una cifra máxima de 5 millones de  $m^2$  instalados y operativos. Para acabar podemos añadir que el sector de la energía solar térmica en España representa 4.150 empleos directos, y en términos económicos facturó una cantidad de 166 millones de euros en 2019. [2] y [3].

# 2 MÉTODOS DE CÁLCULO

## 2.1 INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DE CÁLCULO

En este capítulo se realizará un pequeño estudio de cada herramienta de simulación. Las herramientas de simulación seleccionadas son el método TRNSYS, el método f-CHART, ACSOL y el método CHEQ4. De cada herramienta se analizarán ciertos parámetros como la sencillez, alcance, y coste. Además, se definirá las principales características de cada método, así como las aplicaciones de los mismos en función del uso final previsto ya sea para verificar el cumplimiento de una reglamentación o para evaluar la viabilidad técnica y económica de diferentes soluciones, la aplicación a procesos de venta de energía, etc. A pesar de realizar un pequeño estudio de cada una de las herramientas, donde se centrará mayor parte de la atención será en el método CHEQ4 describiendo paso a paso su funcionamiento de manera bastante detallada y con imágenes del programa.

## 2.2 MÉTODO TRNSYS

La herramienta TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulator) es un programa de simulación dinámico para sistemas energéticos en régimen dinámico. Se diseñó con la intención de resolver sistemas complejos donde cada uno de los componentes se describe mediante subrutinas más simples, llamadas TYPEs. Cada Type se puede sumar como si fueran una especie de componentes separados que al unirlos permiten analizar un sistema completo.

La primera versión original se desarrolló con la intención de que los sistemas que la herramienta analizara fueran para la producción de agua caliente sanitaria y calefacción, además el número de TYPEs era muy reducido siendo estos los justos y necesarios para poder simular los sistemas anteriores. En concreto eran los 23 TYPEs siguientes:

Tabla 6. Diferentes TYPEs

|  |                                   |                        |   |                                     |                           |
|--|-----------------------------------|------------------------|---|-------------------------------------|---------------------------|
| 1.Captador solar plano                   | 2.Control diferencial             | 3.Bomba de circulación | 4.Depósito de almacenamiento de líquido | 5.Intercambiador de calor           | 6.Calentador auxiliar     |
| 7.Cálculo de la demanda de refrigeración | 8.Termostato de tres etapas       | 9.Lector de datos      | 10.Almacenamiento de lecho de rocas     | 11.Controladores del caudal de aire | 12.Cálculo de calefacción |
| 13.Válvula de seguridad                  | 14.Función dependiente del tiempo | 15.Operador algebraico | 16.Procesador de radiación solar.       | 17.Cerramiento vertical             | 18.Cubierta               |
| 19.Local y suelo                         | 20. Bomba de calor                | 21. Integrador         | 22. Impresora                           | 23. Plotter                         |                           |

Los TYPE independientemente unos de otros incorporan un modelo matemático o incluso a veces varios que simulan el comportamiento del elemento y utilizan Fortran como lenguaje de programación.

Cada TYPE se puede interpretar como una caja negra con una variable de entrada y una de salida. Además, se define perfectamente su estructura y los protocolos que siguen de conexión entre ellos. Existen varios tipos distintos de variables, por ejemplo, las variables que siendo de entrada son función del tiempo y las que siendo de entrada no dependen del tiempo. Las primeras se denominan entradas y las segundas variables, parámetros.

Las variables que en vez de ser de entradas son de salidas y si dependen del tiempo se denominan salidas.

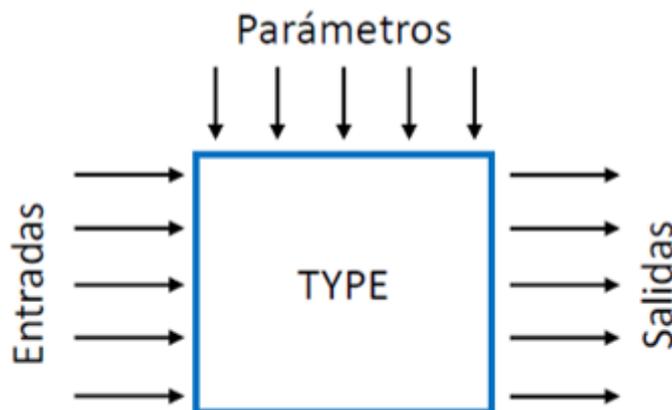


Figura 19. Equema de entradas, parámetros y salidas de TYPEs

Algo que da ventaja a TRNSYS es que está perfectamente descrito el protocolo de conexión entre TYPEs por lo que muchos investigadores incorporaron al software original nuevas TYPEs de manera que actualmente se puede simular cualquier tipo de instalación, aunque no sea una instalación de energía solar térmica. Por ejemplo, entre las nuevas TYPEs que incorpora la última versión de TRNSYS se pueden citar una planta enfriadora, calderas industriales, torre de refrigeración, aerorefrigerantes, bomba de calor de todas las tipologías, batería de frío, sección de humectación, panel fotovoltaico, sistema de baterías, inversores, electrolizador, pila de combustible, almacenamiento de Hidrógeno, Tecnología solar de concretración y elementos de ciclos de potencia.

No solo se incorporaron nuevos TYPEs sino que también se han ido incorporando TYPEs de elementos ya existentes pero con modelos más detallados o con nuevas tipologías del elemento que inicialmente no se contemplaba.

TRNSYS puede simular tanto el comportamiento de componentes como de sistemas por lo que es bastante flexible. Se puede simular el comportamiento de cualquier instalación con el único requisito de que todos los elementos de la instalación estén dentro de la relación disponible de TYPEs. Incluso es posible incorporar al programa un elemento que aún no está, generando las ecuaciones del elemento a través del TYPE “Nueva ecuación”.

TRNSYS se compone de una parte que es un motor para leer y procesar datos de entrada. El motor se llama Kernel e irá resolviendo iterativamente el sistema, verificando que se cumplan las convergencias establecidas y graficando las variables del sistema elegidas. La otra parte es un conjunto de subrutinas (TYPEs) que sirven para modelar los diferentes componentes del sistema (bombas, turbinas, etc.).

Para la simulación del sistema se deberá crear un fichero que consiste en la descripción de los TYPEs (bombas, acumulador, captadores, tuberías, válvulas, etc.) y la interconexión de los mismos. Para representar las iteraciones que aparecen en el sistema se crea un diagrama de flujo de información y habrá que definir todos los parámetros de todos los componentes, así como las variables de entrada y salida de cada uno de ellos.

Alguna desventaja que presenta TRNSYS es que el usuario requerirá de formación técnica. Además, presenta una dificultad para definir la instalación a partir de los TYPEs correspondientes, la cantidad de datos de entrada necesarios, el trabajo previo para eliminar los posibles errores de conexión entre los TYPEs y el esfuerzo en conseguir que converja todo el proceso de cálculo. Por último, resaltar que requiere un tiempo grande de ejecución del programa.

A modo de resumen del método TRNSYS: Será necesario obtener unos datos meteorológicos de partida como

es la radiación solar y temperatura ambiente, datos de consumo y sistemas de captación, el análisis que se realizará será bastante exacto y con una precisión alta, si se hace mención al tiempo de ejecución es importante saber que el periodo característico de cálculo será aproximadamente de una hora o algo menos. En cuanto al coste de la licencia ronda unos 4000 euros. Por último, se recuerda que se requiere una formación alta por parte del usuario y unos conocimientos previos de la materia de trabajo.

## 2.3 MÉTODO f-Chart

El método f-chart es un método simplificado, este método trabaja con un día representativo de cada mes y se basa en correlaciones entre números adimensionales que caracterizan el funcionamiento del sistema. Un número adimensional se relaciona con la energía solar útil que se ha captado y otro número se relaciona con la energía perdida por el sistema de captación.

La contribución solar del sistema, representada por  $f$  en este método, depende de los dos números adimensionales comentados previamente. Cabe destacar que la función que relaciona la  $f$  con los números adimensionales se obtendrá a partir de una base de datos generados simulando los sistemas con TRNSYS. Que este método sea capaz de identificar las variables adimensionales características le aporta un gran vapor y en este aspecto radica el reconocimiento mundial al trabajo desarrollado por su inventor que fue Klein. Algo positivo para el método es que todas las variables adimensionales tienen un significado físico lo que facilita la interpretación de los resultados y lo que es más importante, como consecuencia del análisis dimensional del sistema, la función obtenida es fácilmente generalizable siempre que el valor de los parámetros adimensionales se encuentre dentro de un rango de validez que se propone en el método de cálculo. El rango de validez de los parámetros corresponde a los valores extremos de los mismos casos simulados con el método TRNSYS que se generaron en la base de datos utilizada para generar la función.

Es muy importante el papel que juega la aplicación del análisis dimensional al sistema de energía solar, ya que provoca que se desvincule la generalización de la función obtenida del rango de variación de los parámetros de diseño de los sistemas simulados con TRNSYS en el proceso de obtención de la función. El método identifica dos variables adimensionales, son el factor de ganancias adimensional ( $Y$ ) y el factor de pérdidas adimensional ( $X$ ) que se definen como:

$$Y = \frac{F_R (\tau\alpha)_m \bar{H} N A}{D} \quad ; \quad X = \frac{F_R U_L (T_{ref} - T_{am}) \Delta t A}{D}$$

$F_R$ : El factor de evacuación del captador solar

$(\tau\alpha)_m$ : El producto  $(\tau\alpha)$  medio durante el mes

$\bar{H}$ : Es la radiación global media diaria sobre la superficie de captación

$N$ : Es el número de días del mes

$A$ : Es el área de la superficie de captación

$D$ : Es la demanda mensual de la instalación

$U_L$ : Es el coeficiente global de pérdidas del captador solar

$T_{ref}$ : Es una temperatura de referencia, que el método f-Chart fija en 100 °C

$T_{amb}$ : Es la temperatura ambiente exterior media mensual

$\Delta t$ : Es el paso de tiempo

Teniendo en cuenta las condiciones de incidencia normal:

$$K_{\theta m} = \frac{(\tau\alpha)_m}{(\tau\alpha)_n} \quad \rightarrow \quad (\tau\alpha)_m = K_{\theta m} (\tau\alpha)_n$$

Y aplicando estas ecuaciones a X e Y, se obtiene finalmente:

$$Y = \frac{K_{\theta m} F_R (\tau\alpha)_n \bar{H} N A}{D} \quad ; \quad X = \frac{F_R U_L (100 - T_{am}) \Delta t A}{D}$$

El factor óptico en condiciones de incidencia normal  $F_R(\tau\alpha)_n$  y el factor lineal de pérdidas  $F_R U_L$  se calculan teniendo en cuenta el factor óptico y el factor lineal de pérdidas ambos en condiciones de ensayo, además se corrige por caudal ( $C_M$ ) si el caudal específico en captadores no coincide con el caudal específico en condiciones de ensayo:

$$F_R(\tau\alpha)_n = C_M F_R(\tau\alpha)_{n,ensayo} \quad ; \quad F_R U_L = C_M (F_R U_L)_{ensayo}$$

El modificador del ángulo de incidencia para el ángulo medio de incidencia del mes se calcula a partir del modificador del ángulo de incidencia para  $50^\circ$  ( $K_{50}$ ) obtenido en el ensayo del captador. Si los captadores solares se encuentran en serie agrupados, los factores de pérdidas y óptico del captador se corrigen mediante el factor corrector de agrupación ( $C_A$ ). Si las pérdidas de calor del circuito primario no se desprecian se introducen los factores de corrección por pérdidas en el primario que son diferentes para cada factor, es decir, serían  $C_{pp1}$  y  $C_{pp2}$ .

En el caso en el que en el circuito primario existiera un intercambiador de calor, se tendría que introducir el factor corrector por intercambiador ( $C_I$ ) que es el mismo para los factores óptico y de pérdidas del captador. Si las pérdidas de calor en el circuito secundario no se desprecian se introducen los factores de corrección igual que en el circuito primario, pero ahora en este circuito, que a su vez son diferentes para cada factor, es decir, serían  $C_{ps1}$  y  $C_{ps2}$ .

El factor  $F_R(\tau\alpha)_n$  y  $F_R U_L$  en condiciones de incidencia normal se calculan:

$$F_R(\tau\alpha)_n = C_{ps1} C_I C_{pp1} C_A C_M F_R(\tau\alpha)_{n,ensayo} \quad ; \quad F_R U_L = C_{ps2} C_I C_{pp2} C_A C_M (F_R U_L)_{ensayo}$$

El método f-chart se desarrolló partiendo de cuatro hipótesis de partida. Se consideró despreciables las pérdidas de red de transporte, además de la energía acumulada en el sistema en base mensual y anual. Se consideró sistemas de calefacción y producción de agua caliente sanitario con captadores solares de agua y de aire con circulación forzada en el circuito primario.

La hipótesis 1 podría ser razonable en el caso de que las instalaciones se consideraran bien aisladas en cuanto a la red de transporte que compone esta. Pero la limitación que tiene esta hipótesis es que las pérdidas en el circuito primario y en el circuito equivalente se incorporan fácilmente sin más que corregir los parámetros de la curva de rendimiento. Las pérdidas en el circuito de distribución se pueden incorporar aumentando la demanda de agua caliente, siendo esta la demanda neta, con las pérdidas térmicas en el circuito de distribución. La forma adecuada de como se debe de incorporar estas pérdidas en el método dependerá de la configuración del circuito de distribución en la instalación.

La hipótesis 2 se puede considerar correcta cuando la base de tiempo sea mensual o mayor. En base horaria no sería despreciable la variación de energía interna en el depósito. El incremento de energía interna en el sistema tiene lugar fundamentalmente en el depósito de acumulación y es un valor acotado en función del volumen del depósito y de la temperatura máxima en el mismo. El resto de las energías se ven aumentadas a medida que

aumenta la duración del tiempo que se considera.

La hipótesis 3 es inherente al método de cálculo y expone la exigencia de disponer de valores medios diarios mensuales para variables meteorológicas y los datos de consumo.

La hipótesis 4 tiene como limitación que solo puede utilizar los sistemas de agua caliente y calefacción. El problema es que considera despreciables las pérdidas en la red de transporte y el método no puede distinguir entre las diferentes tipologías de sistemas y sólo considera una única tipología.

Hay que recordar que teníamos los parámetros X e Y y nos faltaba corregir por intercambiador. Esta corrección ( $C_I$ ) se introdujo en el método f-Chart original de 1976 y se ha introducido previamente al corregir los factores óptico y de pérdidas en condiciones de ensayo. Otra corrección que aparece es la corrección por volumen ( $C_V$ ) que se aplica multiplicando el factor X del caso base por el factor corrector que se calcula de esta manera:

$$C_V = \left(\frac{V}{75}\right)^{-0,25}$$

Otra corrección que aparece es la corrección por demanda ( $C_D$ ) se aplica multiplicando el factor X del caso base por el factor corrector, que se calcula mediante la ecuación:

$$C_D = \frac{11,6 + 1,18 T_p + 3,86 T_{af} - 2,32 T_{am}}{100 - T_{am}}$$

$T_p$ : Es la temperatura de preparación del agua caliente.

$T_{af}$ : Es la temperatura media diaria mensual del agua de red.

$T_{am}$ : Es la temperatura ambiente exterior media diaria mensual.

En el método f-Chart se calcula los factores adimensionales de pérdidas y ganancia para cada mes, pero siempre teniendo en cuenta los factores previamente mostrados. Las ecuaciones finales son:

$$Y = C_{ps1} C_I C_{pp1} C_A C_M \frac{K_{\theta m} F_R (\tau\alpha)_{n,ensayo} \bar{H} N A}{D}$$

$$X = C_{ps2} C_I C_{pp2} C_A C_M \frac{F_R U_L (100 - T_{am}) \Delta t A}{D} C_V C_D$$

Con los valores calculados para cada mes toca calcular la contribución solar mediante esta ecuación:

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

Una vez calculada la fracción solar para cada mes, se calcula la fracción solar en base anual a partir de los valores de la fracción solar y de la demanda para cada mes ( $f_i$  y  $D_i$ ),

$$f = \frac{\sum f_i D_i}{\sum D_i} \rightarrow \text{Donde el sumatorio se extiende desde el mes 1 hasta el mes 12.}$$

Cabe destacar que el método f-Chart es reconocido como uno de los mejores métodos simplificados para cuantificar la contribución solar en base anual de una instalación de energía solar para la producción de agua caliente sanitaria. El método se validó por tres vías diferentes. Comparando sus resultados con los resultados obtenidos mediante simulaciones con programas detallados, con medidas experimentales en laboratorios y con medidas en instalaciones reales. Al comparar los resultados de este método con el resultado de programas de simulación detallados en diferentes localidades, se ha comprobado que en la mayor parte de las localidades de resultados obtenidos para la contribución solar anual se encuentran dentro de solo un 3% de error. No se aconseja utilizar este método para calcular solo valores mensuales ya que la diferencia encontrada en la contribución solar mensual es mayor.

Es necesario destacar que este método no es aplicable a sistemas por termosifón, ya que el rango de caudales en el captador y la influencia del sistema de control no existe en los sistemas de termosifón.

Por último, hay que destacar que el método f-Chart original se desarrolló suponiendo que la dependencia con la temperatura del coeficiente global de pérdidas de calor del captador era despreciable por lo que no se tiene en cuenta el factor cuadrático de pérdidas del captador.

A modo de resumen del análisis del método se puede decir que en cuanto a datos de partida necesarios presenta muchísima similitud con respecto al método TRNSYS. En este caso las grandes diferencias que presenta con respecto al método anterior es que su coste es gratuito, se puede elaborar un software propio. La complejidad y los niveles de conocimientos por parte del usuario es medio, algo más bajo que para el método TRNSYS. Para acabar destacar que es un método con exactitud y precisión suficiente, validado experimentalmente en numerosas instalaciones reales. [7]

## 2.4 MÉTODO ACSOL

El método ACSOL es un programa de simulación que utiliza como motor de cálculo a TRNSYS. Es un programa que está patrocinado por la Agencia Andaluza de la Energía, de la antigua Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía. Se debe introducir en el programa toda la información adicional sobre el sistema como es el área de captación, tipo de captador, volúmenes, consumos, etc. Este programa ACSOL incorpora un modelo matemático detallado para cada esquema de principio y una base de datos de condiciones meteorológicas, equipos, perfiles de consumo, etc.

Se puede decir que el método ACSOL se encuentra en la mitad entre los programas generales de simulación y los métodos simplificados, por otro lado, los programas generales de simulación suelen utilizarse por usuarios con menor preparación, sin embargo, los segundos debido a la intervención de hipótesis siempre son aplicables dentro de un rango de validez del método y se deberá conocer las condiciones de aplicación del método.

Este método puede ser útil si se conoce la física del sistema y se sabe interpretar los resultados, pues evita tareas de programación y verificación de modelos. Una desventaja o inconveniente podrá ser que se necesita cierto nivel de formación técnica por parte del usuario ya que se maneja cantidad de datos de entrada.

El método ACSOL es un software que calcula los parámetros de los sistemas solares térmicos de baja temperatura. En la Figura 20 se muestra la pantalla de selección de la configuración. En la versión más reciente se muestran cinco tipos de instalaciones de energía solar para la producción de ACS en viviendas multifamiliares.

- Acumulación centralizada.
- Todo centralizado.
- Intercambiador individual con válvula.
- Acumulación distribuida.
- Acumulación mixta.

Además, añade dos instalaciones como es la instalación de agua caliente y calefacción y una instalación para el calentamiento del agua de piscinas cubiertas y preparación de ACS para duchas.

La flexibilidad con la que se ha realizado este diseño de software ayuda en la aplicación de este método, pero la desventaja es que un aumento del número de datos de entrada aumenta también la complejidad y uso de este. El problema este existirá siempre que el diseño del programa baraje diferentes opciones para determinadas variables y es realmente importante para el caso de las variables meteorológicas si se contempla la opción de que el usuario pueda introducir directamente los valores mensuales de estas variables, incluyendo la relacionada con el consumo de agua caliente.

Hay que recordar que en todas las pantallas se habilita un acceso al libro de ayudas, que en el caso de ACSOL es bastante extenso, donde se aclara y define las variables que nos aparece en la pantalla, haciendo referencias a la normativa vigente y aportando recomendaciones para que se pueda interpretar los resultados obtenidos.

La herramienta ACSOL utiliza TRNSYS para las configuraciones que este programa tiene definidas previamente. De esta manera el usuario solo tiene que seleccionar y no tiene que programar la configuración del sistema a partir de los TYPEs que componen la instalación. A pesar de haber eliminado la etapa de configuración sigue existiendo el problema de que existe un gran volumen de datos de entrada, algo positivo de ello es que esto permite al programa ser muy flexible. Desde el punto de vista final del usuario esta herramienta es menos compleja de utilizar que TRNSYS, pero más que la herramienta que a continuación se mostrará.

Por último, resaltar que en ACSOL no se encuentran las configuraciones de los sistemas por termosifón.

A modo de resumen del método de ACSOL:

Los datos de partidas son datos meteorológicos como es la radiación solar y la temperatura ambiente, los datos de consumo, características de los captadores, sistema de captación, acumulación, sistema auxiliar, redes de tubería, etc. Un dato importante para resaltar es que tiene una exactitud y precisión alta por la cantidad de datos de entrada y las opciones con las que trabaja el programa. Además, posee un periodo característico de cálculo de una media hora mas o menos. En cuanto a los resultados del programa, muestra la contribución solar, la demanda, aporte solar y energía auxiliar en base horaria y anual. Algo positivo de este método es la incorporación de ayudas y verificación de parámetros de diseño ampliando el rango de validez de algunos parámetros de diseño y ofertando referencias a la normativa. Es importante volver a resaltar la complejidad alta que tiene el interfaz con el usuario y el requerimiento importante de conocimientos por parte del usuario, se puede decir entonces que se necesita una formación alta por parte del usuario para manejar este método con mayor o menor soltura. Por último, y no menos importante, hay que destacar que este programa tiene un coste totalmente gratuito. [4]

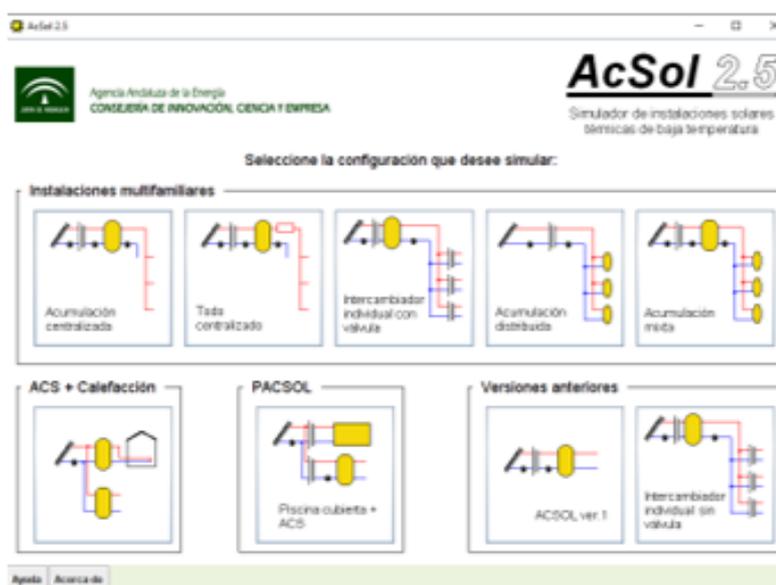


Figura 20. Pantalla de ACSOL. Selección de configuración [4]

## 2.5 MÉTODO CHEQ4

El método CHEQ4 es un método que utiliza como motor de cálculo la metodología MetaSol. Este método calcula la contribución solar de una instalación solar térmica para la producción de ACS y para el calentamiento del agua de piscinas. Nos centraremos en la producción de ACS y se comentará todo lo relacionado con este.

Es una herramienta que se empezó a promover por la Asociación Solar de la Industria Térmica (ASIT) en España, concretamente en 2012, y se financia por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) se adscribe al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través de la Secretaría de Estado de Energía, de quien depende orgánicamente.

Metasol es una metodología de cálculo que se basa en el estudio de curvas que a su vez han sido obtenidas por resultados de más de 69.000 simulaciones dinámicas que se han realizado con TRNSYS. Las configuraciones incluidas en CHEQ4 han sido modelizadas con TRNSYS y se han simulado con posterioridad en diferentes escenarios. Una vez que se han realizado las simulaciones, se genera una base de datos mediante un tratamiento estadístico, utilizando los resultados obtenidos de las simulaciones. De esa base de datos se identifican las variables más significativas y se obtienen siete funciones que nos ayudan a predecir las ganancias y pérdidas de cada uno de los sistemas.

METASOL define doce variables de entrada y tres factores de efectos aleatorios. Las doce variables de entrada caracterizan las condiciones de operación y propiedades del sistema, y los tres factores caracterizan la localización. Cuando decimos localización estamos incluyendo la radiación, temperatura de agua de red, temperatura ambiente, demanda, etc. Cada función está caracterizada por unas seis o diez variables y dos o tres factores climáticos por lo que se concluye que no todas las propiedades tienen sentido en todos los esquemas.

La obtención de las variables más representativas de las que depende la contribución solar es claramente diferente del procedimiento utilizado en el método f-Chart. Metasol identifica las variables representativas del sistema mediante métodos estadísticos mientras que el método f-Chart identifica las variables mediante un análisis previo de las magnitudes adimensionales representativas del sistema, lo que facilita la generalización de las correlaciones obtenidas.

A modo de resumen en cuanto al alcance del método CHEQ4 se puede resumir en estos puntos:

Para empezar, se aplica a instalaciones de energía solar térmica para agua caliente sanitaria y calentamiento de agua de piscina. Posteriormente se calcula la contribución solar en base mensual, por lo que necesita valores mensuales medios diarios para los datos de entrada (climáticos y de consumo). Se considerará 8 sistemas diferentes, cuatro para instalaciones de consumo único y cuatro para instalaciones de consumo múltiple (bloque de viviendas) además, se incluye los sistemas prefabricados. Cabe destacar que se considerarán las pérdidas térmicas en el circuito primario de captación y en el circuito de distribución, más aún, las funciones se obtendrán utilizando el coeficiente lineal de pérdidas de segundo orden del captador solar, además, la contribución solar se definirá en relación con la demanda bruta del sistema (demanda de ACS más las pérdidas en el circuito de distribución en algunos sistemas).

La metodología de uso de la herramienta es bastante simple. Primero se elige la configuración, luego la localización, posteriormente el consumo y las características de los componentes, por último, la contribución solar se obtendría conceptualmente en tres etapas:

- 1) Determinación de las variables de entradas tanto climáticas como propias del sistema.
- 2) Sustitución de las variables de entrada en las funciones de la configuración escogida.
- 3) Cálculo de la contribución solar mensual y anual de la instalación.

El método CHEQ4 utiliza un software que IDAE ofrece de forma gratuita al sector de la energía solar térmica. Es un software desarrollado en un entorno que resulta agradable para el usuario, fácil de utilizar, con una estructura clara, organizada y con ayudas al usuario de fácil acceso en cada una de las pantallas de CHEQ4. Para mostrar la facilidad a continuación, se mostrará la facilidad de este y el volumen de variables de entradas necesarias, describiendo las diferentes pantallas de CHEQ4.

Lo primero que aparece es la pantalla de inicio (Figura 21) donde se muestra la versión, en qué fecha se incorpora

la base de datos al programa, así como, un mensaje en el que asegura que no es una herramienta de diseño exactamente, sino una de comprobación voluntaria. Además, avisa de que la no validación del cumplimiento de la contribución solar mínima no invalida la posibilidad de demostrar su cumplimiento por otros medios. Se observa en la zona inferior de la Figura 21 que aparecen dos botones que permiten actualizar la base de datos o aceptar la que ya existe en el programa. Llegados a este punto se comprueba que la versión que aparece es la más reciente y se pulsará el botón “aceptar” para empezar a introducir datos.

Una vez pulsado el botón aceptar que aparece en la pantalla de inicio, se inicia la entrada de datos que se estructura en 6 pantallas distintas (Figura 22):

- Localización.
- Configuración.
- Demanda.
- Solar/Apoyo.
- Otros parámetros.
- Resultados.



Figura 21. Pantalla de inicio CHEQ4 [5]

Para pasar de una pantalla a la siguiente se deberá realizar en orden, de tal manera que sin haber introducidos los datos de entrada de la pantalla “Localización” (Figura 23) no se podrá pasar a la pantalla siguiente siendo esta la de “Configuración” (Figura 24).

Se destaca que en cada pantalla existe un botón de ayuda en la zona inferior donde se definen las variables solicitadas en la pantalla, se explica el significado de las más relevantes y se indican valores representativos de algunas variables.

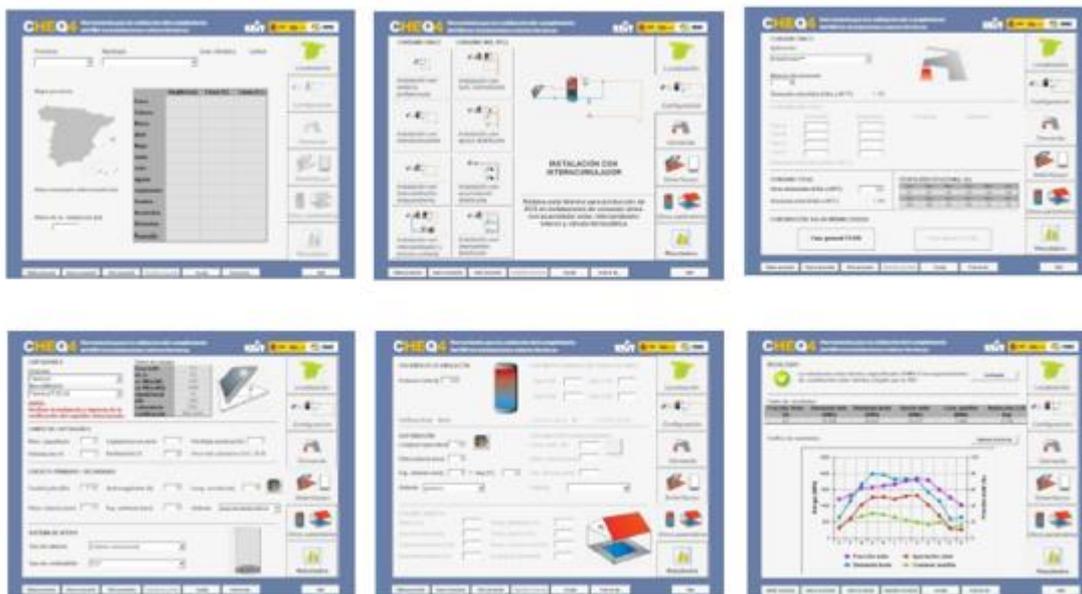


Figura 22. Distintas pantallas de CHEQ4 [5]

La primera pantalla que aparece es la pantalla de “Localización” (Figura 23), en esta se pide que se introduzca la localización de la provincia y el municipio. Una vez se han introducido estos datos el programa nos responde proporcionándonos la zona climática a la que pertenece el municipio según HE4 del Código Técnico de la Edificación, su latitud y su altura. El programa mostrará la temperatura diaria mensual del agua de red, la temperatura ambiente diaria mensual y la Irradiación global media mensual sobre la superficie horizontal (según Atlas de Radiación Solar en España de la AEMET), todo ello recogido sobre una tabla.

Una vez se completa esta pantalla, se puede acceder a la pantalla de “Configuración” (Figura 24) donde se muestran los esquemas de los ocho tipos de instalaciones de los que puede hacer uso el programa (Tabla 7) y (Tabla 8). A la izquierda de la pantalla se observan dos columnas, la posicionada más a la izquierda de las dos, muestra las instalaciones de consumo único, y la menos a la izquierda, o, mejor dicho, a la derecha de esta última se muestra las instalaciones de consumo múltiple. En esta pantalla se seleccionará el tipo de instalación que interesa y se procederá al siguiente punto que es la pantalla de “Demanda” (Figura 25) y (Figura 26).

En la pantalla de “Demanda” (Figura 25 y Figura 26) se especifica la demanda total de ACS de la instalación. Los parámetros son variables dependiendo del tipo de instalación que se haya escogido. Por ejemplo, en una instalación de consumo único (Figura 25) habrá que seleccionar el tipo de aplicación e indicar el número de personas y en una instalación de consumo múltiple (Figura 26) se tendrá que introducir el número de viviendas y dormitorios para obtener así el número de personas y el consumo en L/día, llegándose a diferenciar incluso cuatro tipos diferentes de viviendas.

El programa calcula el consumo en L/día a 60 °C en función de los datos anteriores y los consumos unitarios del HE4 del Código Técnico de la Edificación. Además, en la siguiente zona de la pantalla se indicarán otros consumos de agua caliente de la instalación a 60°C no contemplados en el consumo anterior, obteniéndose el consumo total de agua caliente de la instalación a 60°C. El programa de CHEQ4 considera que el consumo es el mismo en todos los meses del año. En esta pantalla se incluye una tabla donde aparece el porcentaje de consumo mensual de la instalación. A pesar de aparecer el 100% en todos los meses se pueden modificar los porcentajes mensuales si la instalación tiene un consumo de agua caliente variable dependiendo del mes.

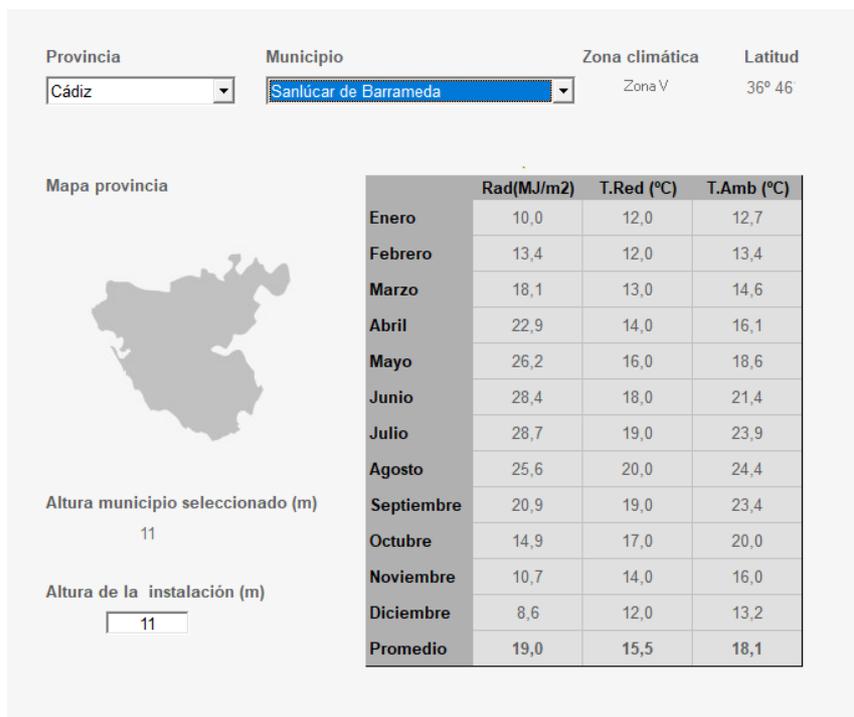


Figura 23. Localización. CHEQ4

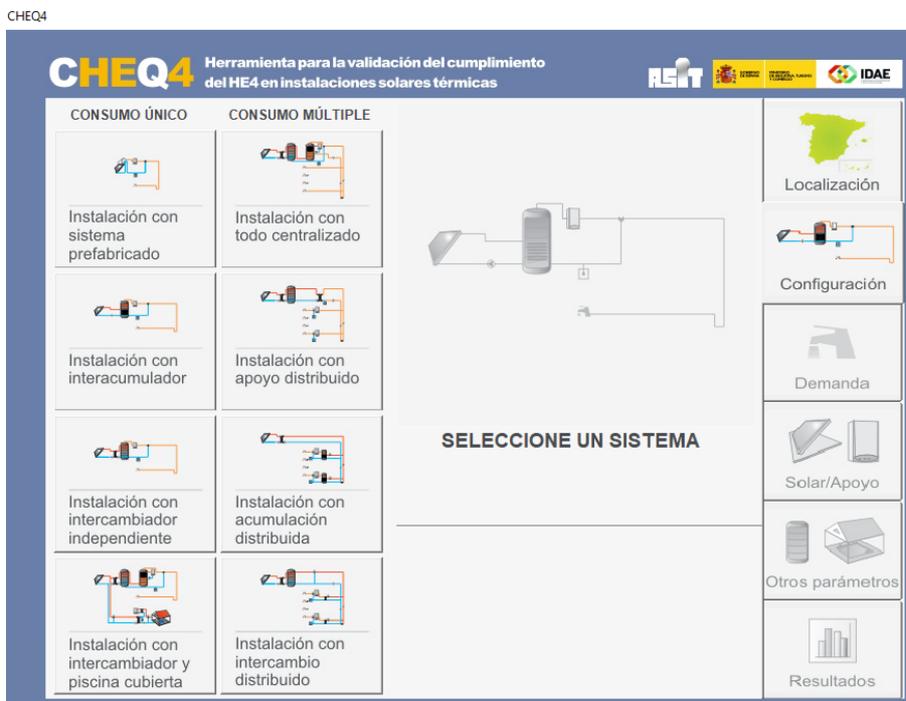


Figura 24: Configuración.

Tabla 7. Configuraciones de CHEQ4. Enumeración y consumos.

| CONSUMO ÚNICO                                   | CONSUMO MÚLTIPLE                           |
|---|--|
| 1.-Instalación con sistema prefabricado         | 4.-Instalación con todo centralizado       |
| 2.-Instalación con interacumulador              | 5.-Instalación con apoyo distribuido       |
| 3.-Instalación con intercambiador independiente | 6.-Instalación con acumulación distribuida |
| -   | 7.-Instalación con intercambio distribuido |

Tabla 8. Descripción de cada configuración

|   |   |
|---|---|
| 1 | Sistema solar térmico prefabricado para producción de ACS en instalaciones de consumo único con válvula termostática.   |
| 2 | Sistema solar térmico para producción de ACS en instalaciones de consumo único con acumulador solar, intercambiador interno y válvula termostática.   |
| 3 | Sistema solar térmico para producción de ACS en instalaciones de consumo único con acumulador solar, intercambiador externo y válvula termostática.   |
| 4 | Sistema solar térmico para producción de ACS en instalaciones de consumo múltiple con acumulación solar centralizada, intercambiador de calor externo, acumulación de apoyo centralizada y conexión directa del circuito de distribución. |
| 5 | Sistema solar térmico para producción de ACS en instalaciones de consumo múltiple con acumulación solar centralizada, intercambiador de calor externo, e intercambiador de calor centralizado para preparar el ACS.                       |
| 6 | Sistema solar térmico para producción de ACS en instalaciones de consumo múltiple con acumuladores individuales, intercambiador de calor interno y válvulas termostáticas.  |
| 7 | Sistema solar térmico para producción de ACS en instalaciones de consumo múltiple con acumulación solar centralizada, intercambiador de calor externo, con intercambiadores de consumo distribuido y válvula termostática.                |

La siguiente pantalla que se encuentra el “Solar/Apoyo” (Figura 27) que se estructura en cuatro bloques que son captadores, campo de captadores, circuito primario/secundario y el sistema de apoyo.

El primer bloque, el de “captadores”. En este bloque lo primero que se realiza es la selección de la empresa, la marca y el modelo del captador solar. Estos datos se extraen de la base de datos del programa, es por ello por lo

que se recomienda tener siempre la última versión de este. Una vez seleccionado el captador, se muestra, a la derecha de la pantalla en un cuadro, los parámetros de ensayo del captador.

Posteriormente, se introducirán los siguientes datos en el siguiente bloque, el bloque de “campo de captadores”: El número de captadores o número de elementos. Se especifica que puede ser uno u otro, ya que para los sistemas prefabricados tendremos número de elementos. Los demás elementos para introducir serán el número de captadores en serie, el porcentaje de pérdidas por sombra, la orientación y la inclinación. Una vez introducidos, el programa muestra en la pantalla el área total de captadores en función del área de un solo captador y del número de captadores. Claro que depende en su medida de los datos de ensayo de cada captador.

A continuación, se pasará al apartado de “Circuito primario/secundario”. En este bloque se introduce el caudal del circuito primario, el porcentaje de anticongelante, la longitud equivalente, el diámetro de la tubería, espesor y tipo de aislante. El programa muestra el caudal del circuito primario calculado en función del caudal de ensayo, del número de captadores y del número de captadores en serie, además muestra el diámetro de tubería en función del caudal calculado. El programa ofrece la opción de que el usuario modifique el valor del caudal del circuito primario dentro de un rango establecido del valor calculado. Para seleccionar el aislante se elige una relación de ocho tipos diferentes que nos muestra el programa (Tabla 9).

Tabla 9. Tabla de aislantes

| <b>Tipos de aislantes que nos ofrece el programa CHEQ4</b> |
|--|
| 1. Genérico  |
| 2. Lana de vidrio  |
| 3. Poliestireno  |
| 4. Lana mineral  |
| 5. Espuma de poliuretano                                   |
| 6. Espuma elastomérica                                     |
| 7. Silicato de calcio                                      |
| 8. Espuma de polietileno                                   |

Por último, se encuentra el apartado de “sistema de apoyo”. Se deberá elegir el tipo de sistema auxiliar y el tipo de combustible de entre los que nos ofrece la base de datos. En cuanto a sistema auxiliar se presentan los de la Tabla 10. En cuanto al tipo de combustible existe una relación de hasta tres combustibles (Tabla 11) en función del sistema de apoyo.

La pantalla siguiente es la de “otros parámetros” (Figura 28 y Figura 29). Al igual que se ha hecho anteriormente con la pantalla de demanda, en este caso se rellenarán unos parámetros u otros dependiendo del tipo de instalación con la que se esté tratando, es decir, cuando tenemos instalaciones de consumo único se rellenarán los parámetros señalados en la Figura 28. En cambio, cuando se esté haciendo uso de una instalación de consumo múltiple, se rellenará lo correspondiente a ella, véase en la Figura 29.

Tabla 10. Tipos de sistemas

| Tipos de sistemas           |
|-----------------------------|
| Caldera convencional        |
| Caldera de condensación     |
| Caldera de baja temperatura |
| Caldera de biomasa          |
| Caldera eléctrica           |
| Termo eléctrico             |

Tabla 11. Tipos de combustible CHEQ4

| Tipos de combustible |
|----------------------|
| Gas natural          |
| Gasóleo              |
| GLP                  |

**CONSUMO ÚNICO**

Aplicación:

Número de personas:

Demanda calculada (l/día a 60 °C): 2.750

**CONSUMO MÚLTIPLE**

|        | Viviendas                       | Dormitorios                    | Personas | Litros/día |
|--------|---------------------------------|--------------------------------|----------|------------|
| Tipo A | <input type="text" value="40"/> | <input type="text" value="2"/> |          |            |
| Tipo B | <input type="text" value="0"/>  | <input type="text" value="0"/> |          |            |
| Tipo C | <input type="text" value="0"/>  | <input type="text" value="0"/> |          |            |
| Tipo D | <input type="text" value="0"/>  | <input type="text" value="0"/> |          |            |

Demanda calculada (l/día a 60 °C):

**CONSUMO TOTAL**

Otras demandas (l/día a 60°C):

Demanda total (l/día a 60°C): 2.750

**OCUPACIÓN ESTACIONAL (%)**

|     | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

**CONTRIBUCIÓN SOLAR MÍNIMA EXIGIDA**

Figura 25. Pantalla de “Demanda” para sistemas de consumo único

Esta pantalla de CHEQ4 se divide en tres apartados que son el volumen de acumulación, distribución y piscina cubierta.

En el apartado de “Volumen de acumulación” se introduce el volumen del depósito de acumulación solar. En las instalaciones con acumulación distribuida se indica el volumen de los acumuladores en las diferentes tipologías de viviendas. En ambos casos, el programa comprueba que el ratio volumen de acumulación/superficie de captación se encuentra dentro del rango establecido por el HE4 del Código Técnico.

**CONSUMO ÚNICO**

Aplicación:

Número de personas:

Demanda calculada (l/día a 60 °C)

---

**CONSUMO MÚLTIPLE**

|                                   | Viviendas                       | Dormitorios                    | Personas | Litros/día |
|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------|------------|
| Tipo A                            | <input type="text" value="40"/> | <input type="text" value="2"/> | 120,0    | 2.856      |
| Tipo B                            | <input type="text" value="0"/>  | <input type="text" value="0"/> | 0,0      | 0          |
| Tipo C                            | <input type="text" value="0"/>  | <input type="text" value="0"/> | 0,0      | 0          |
| Tipo D                            | <input type="text" value="0"/>  | <input type="text" value="0"/> | 0,0      | 0          |
| Demanda calculada (l/día a 60 °C) |                                 |                                | 2.856    |            |

---

**CONSUMO TOTAL**

Otras demandas (l/día a 60°C):

Demanda total (l/día a 60°C): 2.856

**OCUPACIÓN ESTACIONAL (%)**

| Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

---

**CONTRIBUCIÓN SOLAR MÍNIMA EXIGIDA**

Figura 26. Pantalla de “Demanda” para sistemas de consumo múltiple

En el apartado de “distribución” se encuentran dos subapartados que son “el circuito de distribución” y “circuitos de distribución en subestaciones”. En la ayuda de esta pantalla se dice “el circuito de distribución agrupa todas las tuberías situadas a partir de la sala de máquinas (normalmente después del acumulador, en el caso de que exista) y distribuyen el agua caliente sanitaria hasta el punto de consumo, y en su caso, recirculan. En el caso de consumo múltiple se consideraría que el circuito de distribución corresponderá a la general distribución sin incluir las derivaciones individuales a viviendas”.

En el circuito de distribución se introducen los datos como:

- Longitud del circuito.
- Diámetro de la tubería.
- Espesor y tipo de aislante.
- Temperatura de impulsión o potencia de los intercambiadores de consumo distribuido en función del tipo de sistema.

En el circuito de distribución de las subestaciones se introduce:

- Longitud del circuito.
- Diámetro de la tubería.
- Espesor y tipo de aislante.

|  |          |  |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
|--|----------|--|------------------------|---|--------|-------|-------------------------|------|---------------------------------------|-------|---------------------------|----|-----|------|-------------|------|---------------|----------|--|--|
| <b>CAPTADORES</b><br>Empresa: <input type="text" value="TERMICOL ENERGÍA SOLAR"/><br>Marca/Modelo: <input type="text" value="Termicol T20US - T20USH"/><br><b>AVISO:</b><br>Verificar la existencia y vigencia de la certificación del captador seleccionado.  |          | <b>Datos de ensayo</b><br><table border="1"> <tr><td>Área (m<sup>2</sup>)</td><td>1,9</td></tr> <tr><td>n0 (-)</td><td>0,801</td></tr> <tr><td>a1 (W/m<sup>2</sup>K)</td><td>3,93</td></tr> <tr><td>a2 (W/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>)</td><td>0,026</td></tr> <tr><td>Qtest(l/hm<sup>2</sup>)</td><td>72</td></tr> <tr><td>k50</td><td>0,81</td></tr> <tr><td>Laboratorio</td><td>INTA</td></tr> <tr><td>Certificación</td><td>NPS-6818</td></tr> </table> | Área (m <sup>2</sup> ) | 1,9   | n0 (-) | 0,801 | a1 (W/m <sup>2</sup> K) | 3,93 | a2 (W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ) | 0,026 | Qtest(l/hm <sup>2</sup> ) | 72 | k50 | 0,81 | Laboratorio | INTA | Certificación | NPS-6818 |  |  Localización |
| Área (m <sup>2</sup> )   | 1,9      |  |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
| n0 (-)   | 0,801    |  |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
| a1 (W/m <sup>2</sup> K)  | 3,93     |  |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
| a2 (W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )  | 0,026    |  |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
| Qtest(l/hm <sup>2</sup> )  | 72       |  |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
| k50  | 0,81     |  |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
| Laboratorio  | INTA     |  |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
| Certificación  | NPS-6818 |  |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
| <b>CAMPO DE CAPTADORES</b><br>Núm. captadores: <input type="text" value="30"/> Captadores en serie: <input type="text" value="1"/> Pérdidas sombras (%): <input type="text" value="0"/><br>Orientación (°): <input type="text" value="0"/> Inclinación (°): <input type="text" value="40"/> Área total captadores (m <sup>2</sup> ): 57,00                       |          |  |                        |  Configuración |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
| <b>CIRCUITO PRIMARIO / SECUNDARIO</b><br>Caudal prim.(l/h): <input type="text" value="4.104"/> Anticongelante (%): <input type="text" value="0"/> Long. circuito (m): <input type="text" value="50"/><br>Diám. tubería (mm): <input type="text" value="33"/> Esp. aislante (mm): <input type="text" value="35"/> Aislante: <input type="text" value="genérico"/> |          |  Demanda  |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
| <b>SISTEMA DE APOYO</b><br>Tipo de sistema: <input type="text" value="Caldera convencional"/><br>Tipo de combustible: <input type="text" value="Gas natural"/>   |          |  Solar/Apoyo  |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
|  |          |  Otros parámetros   |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |
|  |          |  Resultados   |                        |   |        |       |                         |      |                                       |       |                           |    |     |      |             |      |               |          |  |  |

Figura 27. Solar/ Apoyo

En el bloque de “Piscina cubierta” se introduce la profundidad de la piscina, el tiempo de apertura diaria, la superficie de la lámina de agua, humedad relativa y temperatura ambiente, temperatura de consigna del agua de la piscina, porcentaje de renovación diaria del agua de la piscina, ratio de ocupación máximo de la piscina, que se expresa como el ratio entre el número de usuarios máximo en relación a la lámina de agua de la piscina.

Una vez completada esta pantalla se pulsa el icono de “resultados” (Figura 30). En la parte superior izquierda de este apartado se indicará si cumple o no con la contribución solar mínima exigida por el HE4.

|  |  |  |  |   |
|--|--|--|--|---|
| <b>VOLUMEN DE ACUMULACIÓN</b><br>Volumen total (l) <input type="text" value="4000"/><br>  |  | <b>VOLUMEN ACUMULACIÓN SUBESTACIONES</b><br>Tipo A (l) <input type="text"/> Tipo C (l) <input type="text"/><br>Tipo B (l) <input type="text"/> Tipo D (l) <input type="text"/><br>Volumen total (l) 0    Vol/Área (l/m <sup>2</sup> )            |  |  Localización  |
| Vol/Área (l/m <sup>2</sup> ) 70,18   |  |  |  |  Configuración |
| <b>DISTRIBUCIÓN</b><br>Long. circuito (m) <input type="text" value="100"/><br>Diám.tubería (mm) <input type="text" value="40"/> Pot HX (kW) <input type="text" value="40"/><br>Esp. aislante (mm) <input type="text" value="35"/> Aislante: <input type="text" value="genérico"/>  |  | <b>DISTRIBUCIÓN SUBESTACIONES</b><br>Long. total (m) <input type="text" value="10"/><br>Diám. tubería (mm) <input type="text" value="30"/><br>Esp. aislante (mm) <input type="text" value="35"/> Aislante: <input type="text" value="genérico"/> |  |  Demanda       |
| <b>PISCINA CUBIERTA</b><br>Altura (m) <input type="text"/> Temp. ambiente (°C) <input type="text"/><br>Apertura diaria (h) <input type="text"/> Temp. piscina (°C) <input type="text"/><br>Superficie lámina (m <sup>2</sup> ) <input type="text"/> Renov. volumen día (%) <input type="text"/><br>Humedad relativa (%) <input type="text"/> Ocupación (pers/m <sup>2</sup> ) <input type="text"/> |  |  Solar/Apoyo  |  |   |
|  |  |  Otros parámetros   |  |   |
|  |  |  Resultados   |  |   |

Figura 28. Pantalla “otros parámetros” para instalaciones de consumo único

**VOLUMEN DE ACUMULACIÓN**  
 Volumen total (l)   
 Vol/Área (l/m2) 70,18

**VOLUMEN ACUMULACIÓN SUBESTACIONES**  
 Tipo A (l)  Tipo C (l)   
 Tipo B (l)  Tipo D (l)   
 Volumen total (l) 0 Vol/Área (l/m2)

**DISTRIBUCIÓN**  
 Long. circuito (m)   
 Diám. tubería (mm)   
 Esp. aislante (mm)  T. imp.(°C)   
 Aislante

**DISTRIBUCIÓN SUBESTACIONES**  
 Long. total (m)   
 Diám. tubería (mm)   
 Esp. aislante (mm)   
 Aislante

**PISCINA CUBIERTA**  
 Altura (m)  Temp. ambiente (°C)   
 Apertura diaria (h)  Temp. piscina (°C)   
 Superficie lámina (m2)  Renov. volumen día (%)   
 Humedad relativa (%)  Ocupación (pers/m2)

Localización  
 Configuración  
 Demanda  
 Solar/Apoyo  
 Otros parámetros  
 Resultados

Figura 29. Pantalla “otros parámetros” para instalaciones de consumo múltiple

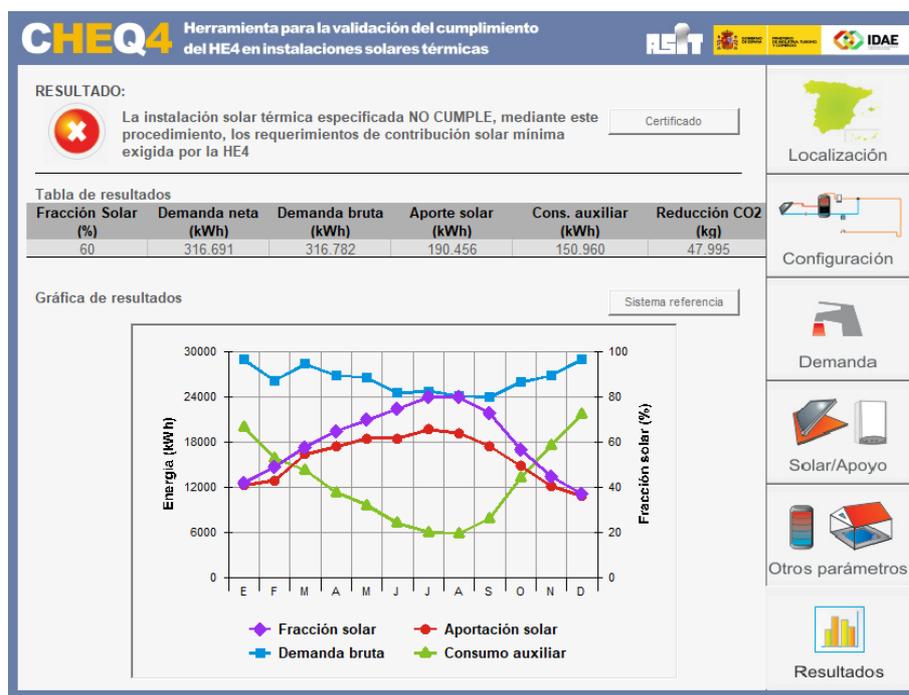


Figura 30: Resultados.

Una vez se haya finalizado con la pantalla de otros parámetros, se pasa a la siguiente “Resultados” (Figura 30). Lo primero que se debe mirar al entrar en esa pantalla es si cumplimos o no los requirements de contribución solar mínima exigida por el HE4. Será un indicador en la parte superior a la izquierda el que nos lo indique.

En el apartado “Tabla de resultados” se muestran los valores anuales de indicadores y resultados (Tabla 12). Se muestra gráficamente los valores mensuales de la fracción solar, demanda bruta, consumo de energía primaria

auxiliar y el consumo auxiliar.

Al acceder a la pestaña de resultados, CHEQ4 verifica el cumplimiento de algunas de las condiciones de cálculo de la contribución solar, de diseño y de dimensionado que figuran en el HE4. El programa revisa el cumplimiento de los siguientes apartados:

- Para la aplicación de ACS el área total de los captadores tendrá un valor tal que se cumpla  $50 < V/A < 180$ ; siendo A ( $m^2$ ) la suma de áreas de los captadores y V (litros) el del depósito de acumulación solar.
- Las pérdidas máximas por desorientación e inclinación y por sombra deberán estar por debajo de los límites establecidos en el HE4.
- Si en algún mes la contribución solar real sobrepase el 110% de la demanda energética o en más de tres meses seguidos el 100%, se adoptarán algunas de las medidas de protección que se indican (Figura 31).

Tabla 12. Indicadores de "Tabla de resultados" [5]

|  |  |
|--|--|
| <b>Fracción solar (%)</b>                | Es la fracción entre los valores anuales de la energía solar aportada exigida y la demanda energética anual. |
| <b>Demanda neta (kWh)</b>                | La demanda energética anual sin tener en cuenta las pérdidas en acumulación y en distribución.               |
| <b>Demanda bruta (kWh)</b>               | La demanda energética anual teniendo en cuenta las pérdidas en acumulación y en distribución.                |
| <b>Consumo de energía primaria (kWh)</b> | Energía aportada por la instalación auxiliar de apoyo para satisfacer la demanda total.                      |
| <b>Reducción de emisiones de CO2</b>     | Es la reducción de emisiones de CO2 asociada a la utilización del sistema solar térmico (kg).                |
| <b>Aporte solar al sistema (kWh)</b>     | Energía solar aportada por la instalación  |

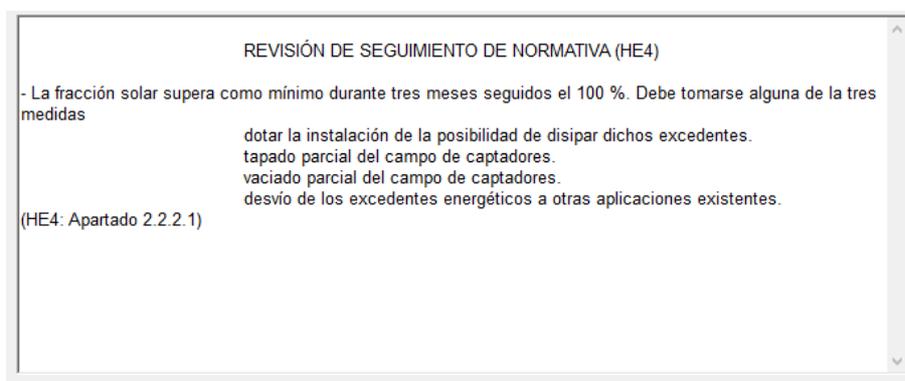


Figura 31: Revisión de seguimiento de normativa. [4]

Si la instalación solar térmica cumple con los requerimientos de contribución solar mínima exigida en el HE4, El programa de CHEQ4 genera un informe con los resultados en el cual muestran y especifican los datos del proyecto y los resultados (Figura 32). [5]

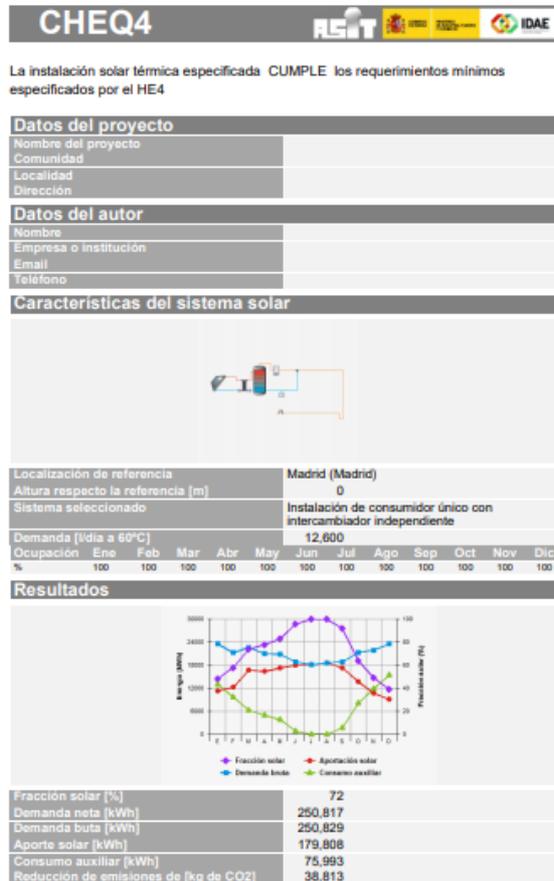


Figura 32: Informe final.

## 2.6 COMPARACIÓN DEL MÉTODO CHEQ4 CON RESPECTO A LOS OTROS MÉTODOS DE CÁLCULO

La herramienta CHEQ4 no es la más precisa y exacta de los cuatro métodos presentados, pero tampoco es la menos precisa. Se coloca por detrás del método TRNSYS y de ACSOL. En cuanto a su flexibilidad se puede decir que no es completamente flexible, ya que la única completamente flexible que existe es TRNSYS. Se dirá entonces que es un método cerrado como los otros 2 métodos ya que el usuario no podrá modificar nada. La complejidad de la interfaz con el usuario es minúscula, es por esto, por lo que se dirá que es la más sencilla de todas de utilizar. CHEQ4 presenta una base de datos meteorológicas, consumo y características de captadores existentes en el mercado. La herramienta CHEQ4 y f-Chart son las que requieren menos variables de entradas, son métodos más simplificados. El tiempo de ejecución vuelve a ser favorable para los dos programas que requieren menos variables a la entrada, necesitando menor tiempo que TRNSYS y que ACSOL. El tiempo de aprendizaje que se requiere para utilizar el método simplificado CHEQ4 es similar al de f-Chart, se precisa de un tiempo bastante menor que en el caso de TRNSYS y ACSOL. El tipo de usuario que utiliza el método CHEQ4 y f-Chart suelen ser usuarios que poseen unos conocimientos básicos sobre tecnología solar térmica. Sin embargo, para TRNSYS y ACSOL se exige un nivel técnico alto en el usuario, con amplios conocimientos en la materia. Solo TRNSYS y ACSOL permiten obtener la evolución horaria de las variables de interés incluyendo caudales y temperaturas, aunque en ACSOL las variables están predefinidas en el programa. En cuanto a las

tipologías de instalaciones TRNSYS no presenta ninguna restricción en el número de instalaciones diferentes que puede simular, ACSOL incorpora siete instalaciones y dos adicionales de versiones anteriores, CHEQ4 incorpora ocho tipologías de instalaciones diferentes (cuatro para bloques de viviendas y cuatro para el resto de los edificios). El TRNSYS necesita un tiempo de aprendizaje muy alto, seguido del método ACSOL, aunque en este caso el proceso no incluye la deficiencia de las configuraciones que ya están definidas y únicamente es necesario seleccionar la que más se adecue. Los otros dos métodos simplificados CHEQ4 y f-Chart precisan un tiempo de aprendizaje sensiblemente inferior. El método f-Chart es el único que no utiliza el coeficiente lineal cuadrático de pérdidas, aunque se puede corregir el coeficiente lineal de pérdidas para tenerlo en cuenta.

Los sistemas por termosifón solo son incorporados por TRNSYS y CHEQ4, aunque ninguno de los dos utiliza los resultados de las normas de ensayo de estos equipos. TRNSYS no utiliza sin embargo los resultados de las normas de ensayo de estos equipos y en el caso de CHEQ4 no se dispone de evidencias de la forma en que se utilizan dichos datos. En la práctica del sector se ha estado utilizando el método f-Chart para cuantificar la contribución solar de los sistemas por termosifón por falta de alternativas, sin cuantificar el posible error cometido. El coste de TRNSYS tiene un coste de 4500 € para un solo puesto de trabajo, sin embargo, el resto de los métodos son gratuitos. En el caso del método f-Chart existen programas comerciales y programas gratuitos y existe la posibilidad de que usuario desarrolle su propio software. [5]

# 3 ANÁLISIS DE CASOS

## 3.1 INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de este apartado será realizar un análisis paramétrico de los sistemas incluidos en el programa CHEQ4. En un primer apartado se describirán los sistemas analizados resumiendo su esquema de funcionamiento. A partir de la definición de estos sistemas se establecerá un caso base, en realidad uno para cada sistema, que constituye el caso de referencia sobre el que se definirá la variación de parámetros. Se analizarán fundamentalmente las variaciones de parámetros asociados a la localidad geográfica, longitudes de las distribuciones de tuberías que influyen en las pérdidas térmicas de la instalación y a la temperatura de impulsión del agua caliente desde el sistema convencional.

Cada uno de los casos se ha simulado con CHEQ4 y a partir de los resultados obtenidos se han calculado un conjunto de números índices que permitirán caracterizar el comportamiento de los sistemas. Así por ejemplo se ha calculado el ratio aporte solar/demanda o la superficie específica de captación por unidad de consumo de agua caliente o por número de personas. Como variable de comparación se ha utilizado la contribución solar de la instalación en base anual, definida como el cociente entre el aporte solar y la demanda de ACS.

## 3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE ACS

De los sistemas incluidos en CHEQ4 se estudiarán todos excepto la instalación con intercambiador y piscina cubierta dentro de los sistemas de consumo único. A continuación, se resumen las características fundamentales de los sistemas estudiados.

### a) Instalación con sistema prefabricado (Figura 33)

Este tipo de sistemas se corresponde con los sistemas por termosifón. Son equipos compactos que incluyen en una misma estructura los captadores solares y el depósito de acumulación. El equipo se conecta directamente a la red de alimentación de agua de red y a la alimentación del sistema auxiliar.

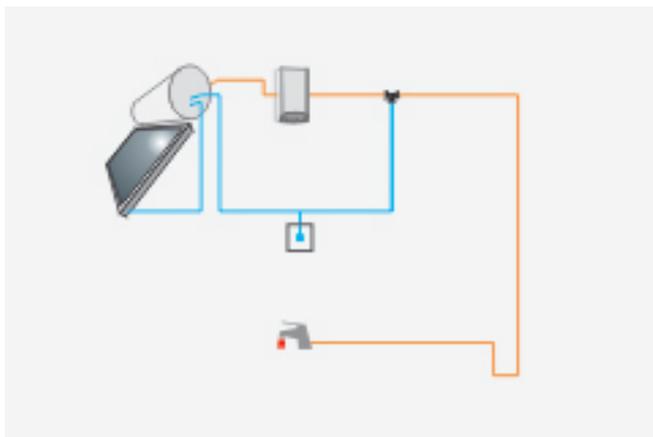


Figura 33. Instalación con sistema prefabricado

### b) Instalación con interacumulador (Figura 34)

Es un sistema de consumo único que incorpora un interacumulador con el intercambiador en la zona inferior del depósito. En CHEQ4 se encuentra dentro de los sistemas denominados de consumo único y por lo tanto no es aplicación a bloques de viviendas (sistemas de consumo múltiple en CHEQ4). En este tipo de sistemas CHEQ4 no considera las pérdidas en el circuito de las subestaciones, que conceptualmente no existen.

### c) Instalación con intercambiador independiente (Figura 35)

Es un sistema de consumo único con el intercambiador de calor del circuito de captación independiente. En este caso la instalación incorpora un acumulador en lugar de un interacumulador. En CHEQ4 se encuentra dentro de los sistemas denominados de consumo único y por lo tanto no es aplicación a bloques de vivienda (sistemas de consumo múltiple en CHEQ4). En este tipo de sistemas CHEQ4 no considera las pérdidas en el circuito de las subestaciones, que conceptualmente no existen.

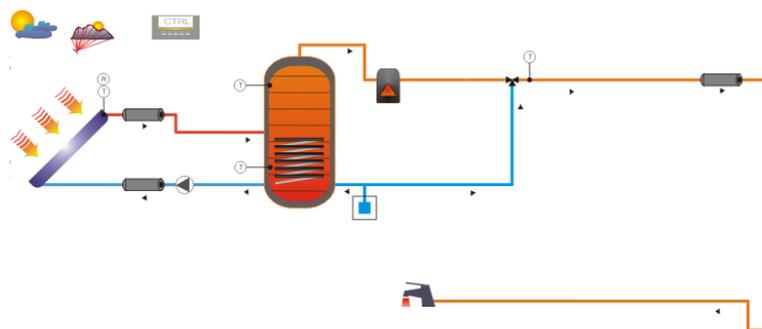


Figura 34. Instalación con interacumulador

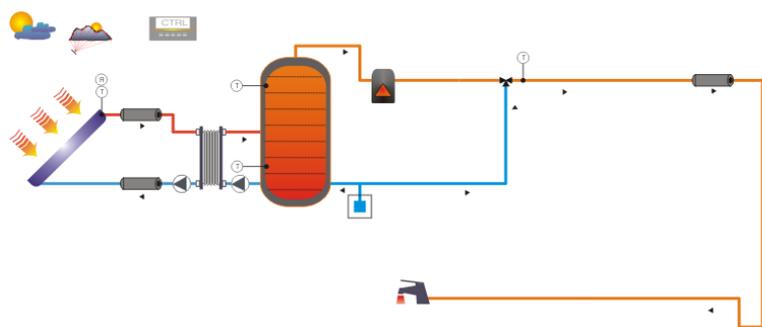


Figura 35. Instalación con interacumulador independiente

### d) Instalación todo centralizado (Figura 36)

Es un sistema de consumo múltiple aplicable a bloques de viviendas. En este tipo de instalación tanto el sistema de captación, como el sistema de acumulación como el sistema auxiliar están centralizados. El intercambiador de calor del circuito de captación es externo al depósito. El sistema auxiliar está constituido por un interacumulador con una caldera auxiliar conectada al depósito. En este tipo de sistemas CHEQ4 considera las pérdidas en el circuito de las subestaciones.

### e) Instalación con apoyo distribuido (Figura 37)

Es un sistema de consumo múltiple aplicable a bloques de viviendas. En este tipo de instalación el sistema de captación y el sistema de acumulación están centralizados. El intercambiador de calor del circuito de captación es externo al depósito y existe un segundo intercambiador centralizado en el circuito de distribución, apareciendo un circuito terciario entre el acumulador y el nuevo intercambiador con una nueva bomba de circulación. El funcionamiento de esta bomba se suele controlar mediante un temporizador de forma que funcione durante un periodo de tiempo previamente establecido, en principio durante las horas en las que se ha previsto el consumo. El sistema auxiliar está constituido por una caldera auxiliar en paso en cada vivienda. En este tipo de sistemas CHEQ4 considera las pérdidas en el circuito de las subestaciones.

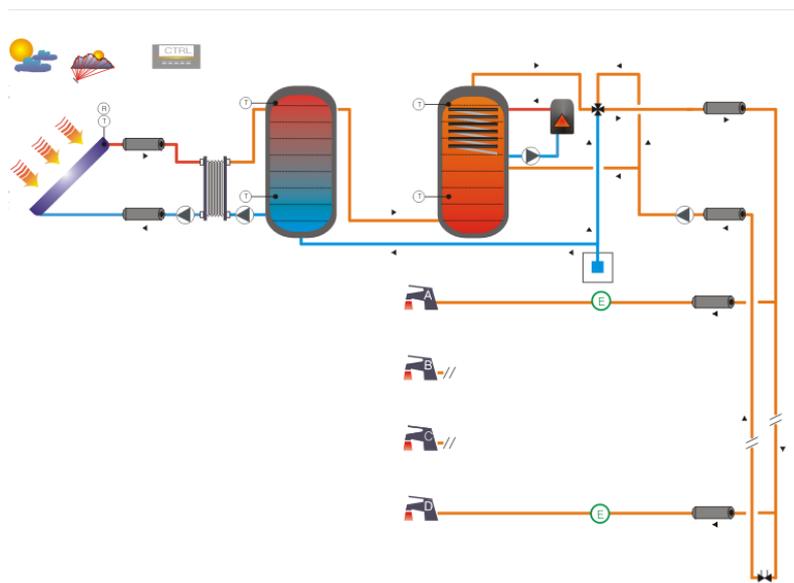


Figura 36. Instalación con todo centralizado

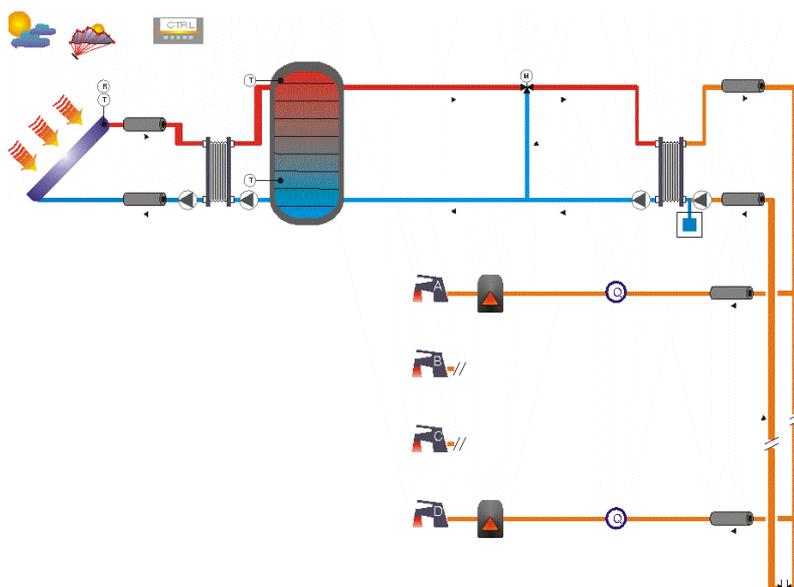


Figura 37. Instalación con apoyo distribuido

**f) Instalación con acumulación distribuida (Figura 38)**

Es un sistema de consumo múltiple aplicable a bloques de viviendas. En este tipo de instalación solo el sistema de captación y el intercambiador del circuito de captación están centralizados. En cada vivienda existe un depósito de acumulación y un sistema auxiliar constituido por una caldera auxiliar en paso en cada. En este tipo de sistemas CHEQ4 considera las pérdidas en el circuito de las subestaciones.

**g) Instalación con intercambio distribuido (Figura 39)**

Es un sistema de consumo múltiple aplicable a bloques de viviendas. En este tipo de instalación el sistema de captación y el sistema de acumulación están centralizados. El intercambiador de calor del circuito de captación es externo al depósito y existe un segundo intercambiador en cada vivienda con una nueva bomba de circulación

centralizada en el circuito de consumo. El funcionamiento de esta bomba se suele controlar mediante un temporizador de forma que funcione durante un periodo de tiempo previamente establecido, en principio durante las horas en las que se ha previsto el consumo. El sistema auxiliar está constituido por una caldera auxiliar en paso en cada vivienda. En este tipo de sistemas CHEQ4 considera las pérdidas en el circuito de las subestaciones.

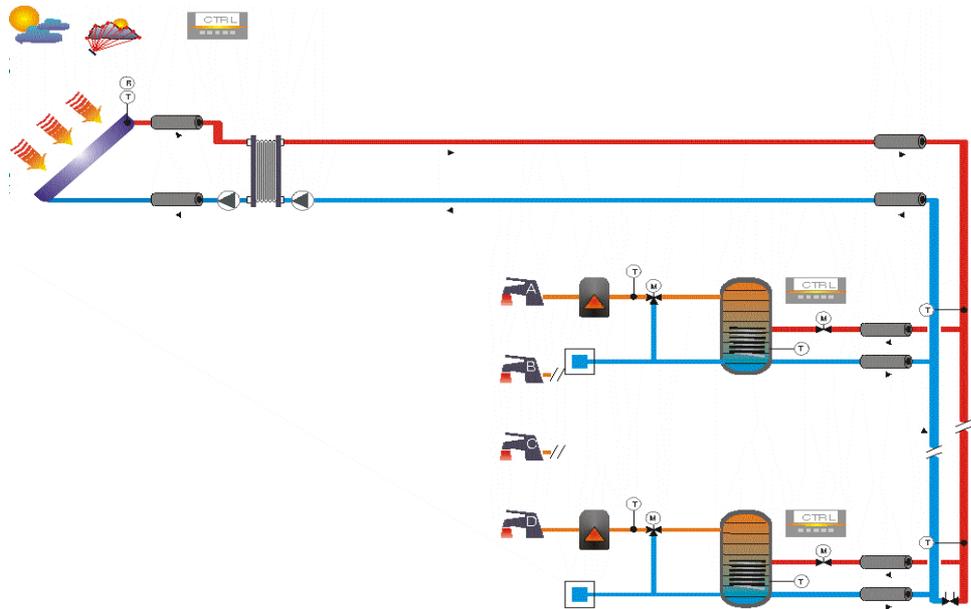


Figura 38. Instalación con acumulación distribuida

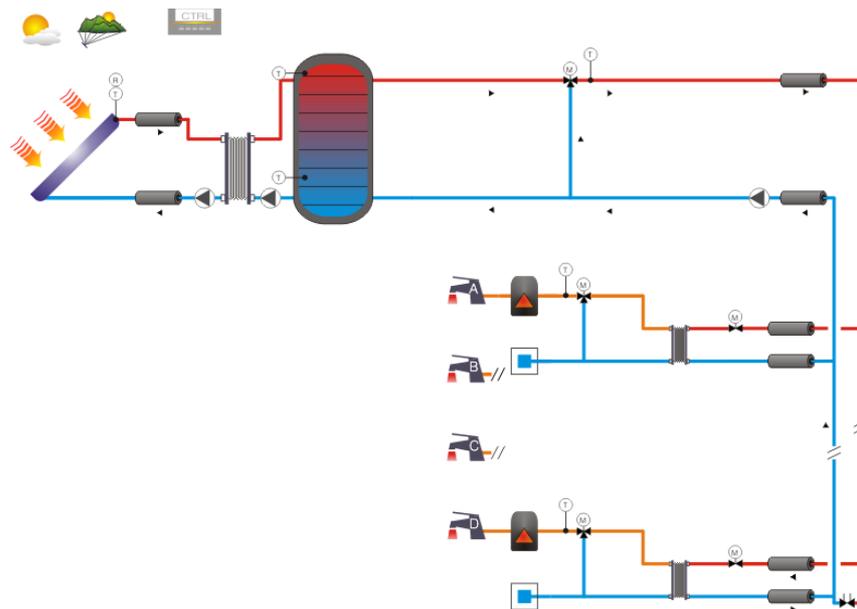


Figura 39. Instalación con intercambio distribuido

### 3.3 DEFINICIÓN DEL CASO BASE

Antes de abordar el análisis paramétrico de los sistemas de energía solar para producción de ACS, se define un caso base como caso de referencia. Realmente se define un caso base para cada uno de los 7 sistemas considerados en el apartado anterior. Los sistemas se han identificado con el siguiente criterio:

- Sist 1: Instalación con sistema prefabricado
- Sist 2: Instalación con interacumulador
- Sist 3: Instalación con intercambiador independiente
- Sist 4: Instalación todo centralizado
- Sist 5: Instalación con apoyo distribuido
- Sist 6: Instalación con acumulación distribuida
- Sist 7: Instalación con intercambio distribuido

Los parámetros de entrada relativos a la demanda se han definido de manera que en todos los casos la demanda de agua caliente a 60 C sea la misma en todos los sistemas (2.856 l/día). Asimismo, el volumen de acumulación en cada vivienda en el sistema 5 se ha definido para que el volumen de acumulación total sea el mismo que en el resto de sistema.

El área total de captadores es 57 m<sup>2</sup> (57,6 m<sup>2</sup> en el sistema 1). El área de captación específica en relación al volumen del depósito es 0,02 m<sup>2</sup>/litro de acumulación. En función del número de personas, oscila entre 0,56 (sistema 1) y 1,14 m<sup>2</sup>/persona (sistemas 2 y 3). En los sistemas de consumo múltiple (sistemas 4 a 7) el área específica es 0,48 m<sup>2</sup>/persona.

El caso base para cada sistema se ha simulado con CHEQ4, obteniéndose los valores de energía anuales resumidos en la Tabla 13. En la tabla se incluye la demanda neta (DNeta), la demanda bruta (DBruta), el aporte solar (A Solar), el consumo del auxiliar (C Aux) y las pérdidas (Otras P).

Tabla 13. Valores de energía anuales en caso base

| Sistema | Energía anual (kWh/año) |        |         |        |         |
|---------|-------------------------|--------|---------|--------|---------|
|         | DNeta                   | DBruta | A Solar | C Aux  | Otras P |
| 1       | 53.831                  | 54.470 | 48.614  | 6.998  | 1.142   |
| 2       | 53.831                  | 54.470 | 39.574  | 17.802 | 2.906   |
| 3       | 53.831                  | 54.470 | 44.741  | 11.626 | 1.897   |
| 4       | 53.831                  | 63.746 | 50.681  | 15.612 | 2.547   |
| 5       | 53.831                  | 53.831 | 39.142  | 17.553 | 2.864   |
| 6       | 53.831                  | 53.831 | 34.621  | 22.956 | 3.746   |
| 7       | 53.831                  | 53.831 | 42.927  | 13.030 | 2.126   |

La contribución solar anual (F) para cada sistema se ha calculado en función de la demanda neta (Fnet) y en función de la demanda bruta (Fbruta). Esta última se calcula en CHEQ4 en la pantalla de resultados y es la que cumple con la definición del HE4 del Código Técnico de la Edificación. Como la demanda bruta tiene en cuenta las pérdidas térmicas de la instalación, y estas son diferentes en un mismo edificio en función del sistema, se complica la comparación entre sistemas ya que el denominador de la contribución solar es diferente en cada sistema y por tanto un mayor valor de la contribución solar no significa obligatoriamente que el aporte solar sea también mayor. En la Tabla 14 se resumen los valores de la contribución solar obtenida (Fbruta) y calculada (Fnet) para cada sistema del caso base.

Se observa que el sistema 6 (Instalación con acumulación distribuida) es el que presenta un peor comportamiento con una contribución solar de 0,64 frente al máximo del sistema 3 (Instalación con interacumulador

independiente) con un valor de 0,82 para la contribución solar en base a la demanda bruta. Considerando la Fbruta los sistemas ordenados de mayor a menor son sistema 1, sistema 3, sistema 4 y 7, sistema 2 y 5 y por último el sistema 6. Dentro de los sistemas de consumo único el mejor es la instalación con sistema prefabricado a pesar de que la circulación en captadores es por convección natural y el peor corresponde al sistema 2 (Instalación con interacumulador). Dentro de los sistemas de consumo múltiple, los sistemas 4 y 7 son los que presentan mejor comportamiento frente al resto, siendo el sistema 6 (Instalación con acumulación distribuida) el que tiene peor comportamiento.

Tabla 14. Contribución solar en los sistemas del caso base

| Sistema | Fneta | Fbruta |
|---------|-------|--------|
| 1       | 0,90  | 0,89   |
| 2       | 0,74  | 0,73   |
| 3       | 0,83  | 0,82   |
| 4       | 0,94  | 0,80   |
| 5       | 0,73  | 0,73   |
| 6       | 0,64  | 0,64   |
| 7       | 0,80  | 0,80   |

Algunos de los resultados obtenidos pueden ser cuestionables, como el valor obtenido en el sistema 1 frente al resto, pero al no conocer en este caso el modelo utilizado en CHEQ4 es difícil de justificar. En otros casos los resultados obtenidos se corresponden a la física del problema. Por ejemplo que el sistema 3 sea mejor que el sistema 2 o que el sistema 6 sea el peor de los sistemas de consumo múltiple, debido entre otras causas al mayor peso de las pérdidas térmicas en los depósitos de acumulación (uno por vivienda).

Por último y con objeto de caracterizar los sistemas en función del ratio radiación solar (G)/demanda, se resumen los valores de este ratio (G/D) para cada sistema, considerando tanto la demanda neta como la demanda bruta (Tabla 15). El ratio G/Dbruta oscila entre 1,71 y 2,03.

Tabla 15. Relación G/D en los sistemas del caso base

| Sistema | G/DNeta | G/DBruta |
|---------|---------|----------|
| 1       | 2,05    | 2,02     |
| 2       | 2,03    | 2,00     |
| 3       | 2,03    | 2,00     |
| 4       | 2,03    | 1,71     |
| 5       | 2,03    | 2,03     |
| 6       | 2,03    | 2,03     |
| 7       | 2,03    | 2,03     |

Finalmente, en la Tabla 16 se resumen todos los parámetros de entrada del caso base para cada sistema, siguiendo la secuencia de las variables de entrada de cada pantalla de CHEQ4. Las “X” que aparecen en la indican que no se solicita en CHEQ4 como variable de entrada.

Tabla 16. Parámetros de entrada del caso base

| Parámetro                                   | Unid  | Consumo único                |          |          | Consumo múltiple |          |          |          |
|---|-------|------------------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|----------|
|   |       | Sist 1                       | Sist 2   | Sist 3   | Sist 4           | Sist 5   | Sist 6   | Sist 7   |
| <b>Localización</b>                         |       |                              |          |          |                  |          |          |          |
| Provincia                                   | --    | Sevilla                      | Sevilla  | Sevilla  | Sevilla          | Sevilla  | Sevilla  | Sevilla  |
| Municipio                                   | --    | Sevilla                      | Sevilla  | Sevilla  | Sevilla          | Sevilla  | Sevilla  | Sevilla  |
| Altura de la instalación                    | (m)   | 12                           | 12       | 12       | 12               | 12       | 12       | 12       |
| <b>Configuración</b>                        |       |                              |          |          |                  |          |          |          |
| Sistema                                     | --    | --                           | --       | --       | --               | --       | --       | --       |
| <b>Demanda</b>                              |       |                              |          |          |                  |          |          |          |
| Consumo único: Aplicación                   | --    | Vivienda                     | Hotel 4* | Hotel 4* | X                | X        | X        | X        |
| Consumo único: Numero de personas           | --    | 102                          | 50       | 50       | X                | X        | X        | X        |
| Consumo múltiple: Número viviendas Tipo A   | --    | X                            | X        | X        | 40               | 40       | 40       | 10       |
| Consumo múltiple: Número dormitorios Tipo A | --    | X                            | X        | X        | 2                | 2        | 2        | 2        |
| Consumo múltiple: Número viviendas Tipo B   | --    | X                            | X        | X        | 0                | 0        | 0        | 0        |
| Consumo múltiple: Número dormitorios Tipo B | --    | X                            | X        | X        | 0                | 0        | 0        | 0        |
| Consumo múltiple: Número viviendas Tipo C   | --    | X                            | X        | X        | 0                | 0        | 0        | 0        |
| Consumo múltiple: Número dormitorios Tipo C | --    | X                            | X        | X        | 0                | 0        | 0        | 0        |
| Consumo múltiple: Número viviendas Tipo D   | --    | X                            | X        | X        | 0                | 0        | 0        | 0        |
| Consumo múltiple: Número dormitorios Tipo D | --    | X                            | X        | X        | 0                | 0        | 0        | 0        |
| Consumo total: Otra demanda a 60 C          | l/día | 0                            | 106      | 106      | 0                | 0        | 0        | 0        |
| Ocupación estacional: 01                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Ocupación estacional: 02                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Ocupación estacional: 03                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Ocupación estacional: 04                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Ocupación estacional: 05                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Ocupación estacional: 06                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Ocupación estacional: 07                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Ocupación estacional: 08                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Ocupación estacional: 09                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Ocupación estacional: 10                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Ocupación estacional: 11                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Ocupación estacional: 12                    | %     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| <b>Captadores</b>                           |       |                              |          |          |                  |          |          |          |
| Empresa                                     | --    | Termicol                     | Termicol | Termicol | Termicol         | Termicol | Termicol | Termicol |
| Marca/Modelo                                | --    | TA150UF                      | T20US    | T20US    | T20US            | T20US    | T20US    | T20US    |
| <b>Campo de Captadores</b>                  |       |                              |          |          |                  |          |          |          |
| Número de elementos                         | --    | 30                           | X        | X        | X                | X        | X        | X        |
| Número de captadores                        | --    | X                            | 30       | 30       | 30               | 30       | 30       | 30       |
| Captadores en serie                         | --    | X                            | 1        | 1        | 1                | 1        | 1        | 1        |
| Pérdidas sombra                             | %     | 0                            | 0        | 0        | 0                | 0        | 0        | 0        |
| Orientación                                 | º     | 0                            | 0        | 0        | 0                | 0        | 0        | 0        |
| Inclinación                                 | º     | 40                           | 40       | 40       | 40               | 40       | 40       | 40       |
| Área total captadores                       | m2    | Lo calcula por defecto CHEQ4 |          |          |                  |          |          |          |
| <b>Circuito primario/secundario</b>         |       |                              |          |          |                  |          |          |          |
| Caudal primario                             | l/h   | Lo calcula por defecto CHEQ4 |          |          |                  |          |          |          |
| Anticongelante                              | %     | X                            | 0        | 0        | 0                | 0        | 0        | 0        |
| Longitud circuito                           | m     | X                            | 50       | 50       | 50               | 50       | 50       | 50       |
| Diámetro de tubería                         | mm    | Lo calcula por defecto CHEQ4 |          |          |                  |          |          |          |
| Espesor de aislante                         | mm    | X                            | 35       | 35       | 35               | 35       | 35       | 35       |
| Aislante                                    | --    | X                            | Genérico | Genérico | Genérico         | Genérico | Genérico | Genérico |
| <b>Sistema de apoyo</b>                     |       |                              |          |          |                  |          |          |          |
| Tipo de sistema                             | --    | Caldera                      | Caldera  | Caldera  | Caldera          | Caldera  | Caldera  | Caldera  |
| Tipo de combustible                         | --    | Gas Nat                      | Gas Nat  | Gas Nat  | Gas Nat          | Gas Nat  | Gas Nat  | Gas Nat  |
| <b>Volumen de acumulación</b>               |       |                              |          |          |                  |          |          |          |
| Volumen total                               | l     | X                            | 4.000    | 4.000    | 4.000            | 4.000    | X        | 4.000    |
| Volumen Subestación Tipo A                  | --    | X                            | X        | X        | X                | X        | 100      | X        |
| Volumen Subestación Tipo B                  | --    | X                            | X        | X        | X                | X        | X        | X        |
| Volumen Subestación Tipo C                  | --    | X                            | X        | X        | X                | X        | X        | X        |
| Volumen Subestación Tipo D                  | --    | X                            | X        | X        | X                | X        | X        | X        |
| <b>Distribución</b>                         |       |                              |          |          |                  |          |          |          |
| Longitud del circuito                       | m     | 100                          | 100      | 100      | 100              | 100      | 100      | 100      |
| Diámetro de tubería                         | mm    | 40                           | 40       | 40       | 40               | 40       | 40       | 40       |
| Espesor aislante                            | mm    | 35                           | 35       | 35       | 35               | 35       | 35       | 35       |
| Aislante                                    | -     | Genérico                     | Genérico | Genérico | Genérico         | Genérico | Genérico | Genérico |
| Temperatura de impulsión                    | ºC    | 50                           | 50       | 50       | 50               | 50       | 50       | 50       |
| Potencia Intercambiador                     | kW    | X                            | X        | X        | X                | X        | X        | 30       |
| <b>Distribución subestaciones</b>           |       |                              |          |          |                  |          |          |          |
| Longitud total                              | m     | X                            | X        | X        | 10               | 10       | 10       | 10       |
| Diámetro de tubería                         | mm    | X                            | X        | X        | 30               | 30       | 30       | 30       |
| Espesor aislante                            | mm    | X                            | X        | X        | 35               | 35       | 35       | 35       |
| Aislante                                    | --    | X                            | X        | X        | Genérico         | Genérico | Genérico | Genérico |

### 3.4 CASOS ANALIZADOS

A partir del caso base se han definido 360 casos diferentes, considerando en cada uno de los siete sistemas la variación de las siguientes variables de entrada:

- Localidad: Barcelona, Bilbao, Sevilla
- Número de captadores: 20, 30, 40
- Longitud del circuito primario: 10, 50, 100 m
- Longitud del circuito de distribución: 10, 100, 200 m
- Longitud del circuito de subestaciones: 1, 10, 50 m
- Temperatura de impulsión: 50, 60 C

En el sistema 1 no se considera la variación de la longitud del circuito primario por corresponde a un sistema prefabricado. De la misma forma, en los sistemas 1 a 3 no se considera la longitud del circuito de subestaciones porque en estos sistemas CHEQ4 no la considera como un parámetro de entrada.

Los 360 casos analizados se han simulado con CHEQ4 elaborando una base de datos con los resultados obtenidos y con los ratios nuevos calculados como  $F_{neta}$ ,  $G/D$  bruta,  $G/D$  neta y las áreas específicas del sistema de captación. En cada caso se han mantenido las variables de entrada del caso base correspondiente salvo las variables que se han modificado.

En primer lugar, se ha representado la contribución solar  $F_{bruta}$  en función de la relación  $G/D_{bruta}$  (Figura 40). Como era previsible se observa que la contribución solar aumenta al hacerlo la relación  $G/D_{bruta}$ . La relación no es lineal debido al número de variables diferentes que se han considerado.

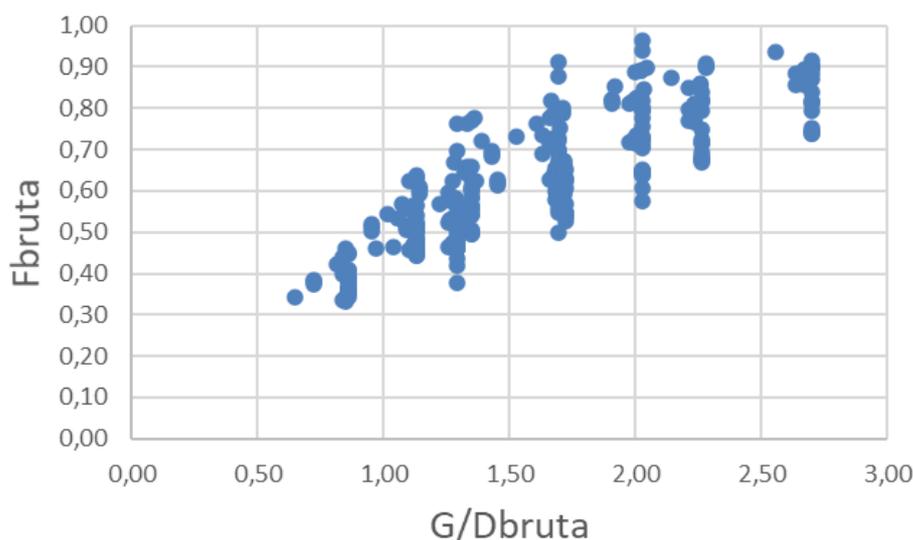


Figura 40.  $F_{bruta}$  vs  $G/D_{bruta}$

En la Figura 41 se representa la contribución solar “bruta” frente a la contribución solar “neta”. Se verifica siempre que  $F_{neta}$  es mayor o igual que  $F_{bruta}$  al ser la demanda neta siempre menor o igual que la demanda bruta. En los sistemas de consumo múltiple, salvo en las instalaciones con todo centralizado (Sistema 4), CHEQ4 no considera las pérdidas térmicas en el circuito de las subestaciones al calcular la demanda bruta por lo que en estos sistemas coinciden la demanda neta con la demanda bruta y por tanto las contribuciones solares correspondientes. Estos casos se encuentran situados en la diagonal de la Figura 41.

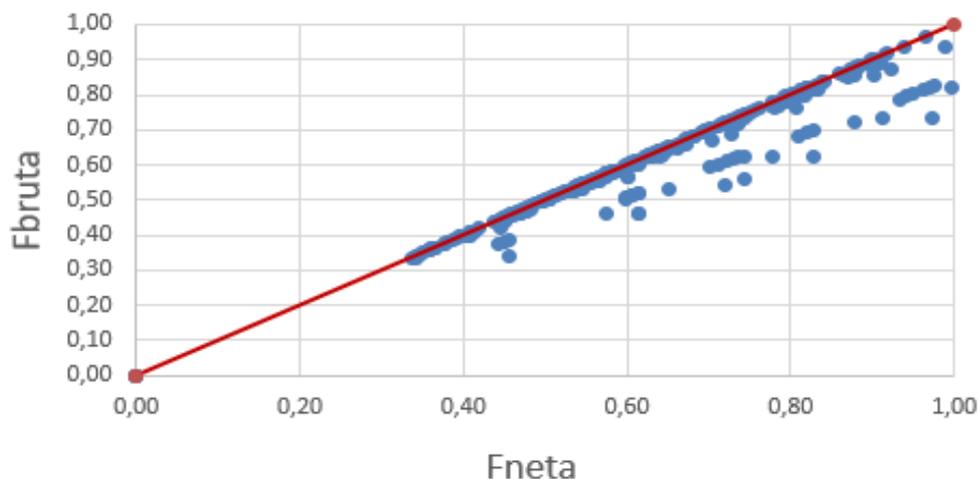


Figura 41. Fbruta vs Fneta

A partir de la base de datos generada se analizan a continuación las siguientes variables: tipo de sistema, longitudes de los diferentes circuitos y temperatura de impulsión.

#### - **Influencia del sistema**

Para comparar un sistema frente a otro se ha analizado la contribución solar bruta (Fbruta). En particular se han considerado los siguientes casos:

- Sistema 1 frente a sistema 2 (Figura 42)
- Sistema 2 frente a sistema 3 (Figura 43)
- Sistema 3 frente a sistema 4 (Figura 44)
- Sistema 4 frente a sistema 5 (Figura 45)
- Sistema 4 frente a sistema 6 (Figura 46)
- Sistema 4 frente a sistema 7 (Figura 47)
- Sistema 6 frente a sistema 7 (Figura 48)

En la Figura 42 se comparan los sistemas prefabricados con el sistema con interacumulador, ambos dentro del grupo de sistemas de consumo único. La instalación con interacumulador es la más semejante a los sistemas prefabricados que nunca tienen un intercambiador de calor fuera del depósito de acumulación. Todos utilizan un interacumulador o en algunos casos no incorporan un intercambiador en el circuito primario. Se observa que en todos los casos, la contribución solar de los sistemas prefabricados es mayor que la correspondiente del sistema con interacumulador, con diferencias que en algunos casos llegan a 0,3.

No se encuentra en principio una explicación a estos resultados porque era de esperar un mejor comportamiento del sistema con interacumulador en el que los captadores solares trabajan en convección forzada. Al no existir documentación técnica complementaria en CHEQ4 relativa al modelo de los sistemas prefabricados implementados, es casi imposible analizar las causas de este comportamiento tan favorable del sistema 1. Con las variables de entrada que utiliza CHEQ4 es imposible analizar la influencia de otras variables como es la estratificación en el depósito que favorece en principio el funcionamiento de los sistemas prefabricados que funcionan por termosifón.

En la Figura 43 se comparan los dos sistemas de circulación forzada dentro de los sistemas de consumo único. En principio las instalaciones con el intercambiador independiente deberían funcionar mejor que las instalaciones con interacumulador debido a que la efectividad de un intercambiador exterior es superior al del intercambiador del interacumulador. Como consecuencia los captadores solares, a igualdad del resto de condiciones, pueden trabajar a menor temperatura en las instalaciones con intercambiador independiente y por tanto con un rendimiento de captación mayor.

Este comportamiento esperado se observa en la Figura 43 donde todos los puntos se encuentran por debajo de la diagonal. La diferencia máxima observada en la contribución solar de ambos sistemas es del orden de 0.10 en función del valor del resto de variables de los sistemas.

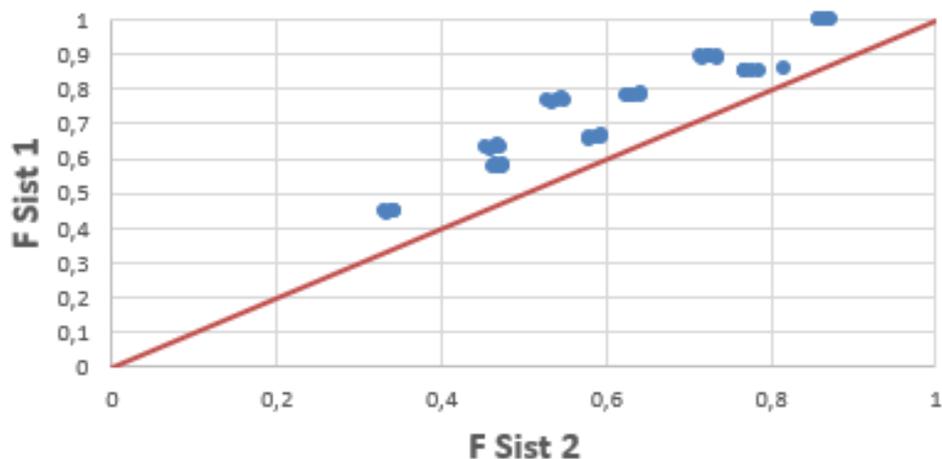


Figura 42. Influencia del sistema (Sistema 1 frente a Sistema 2)

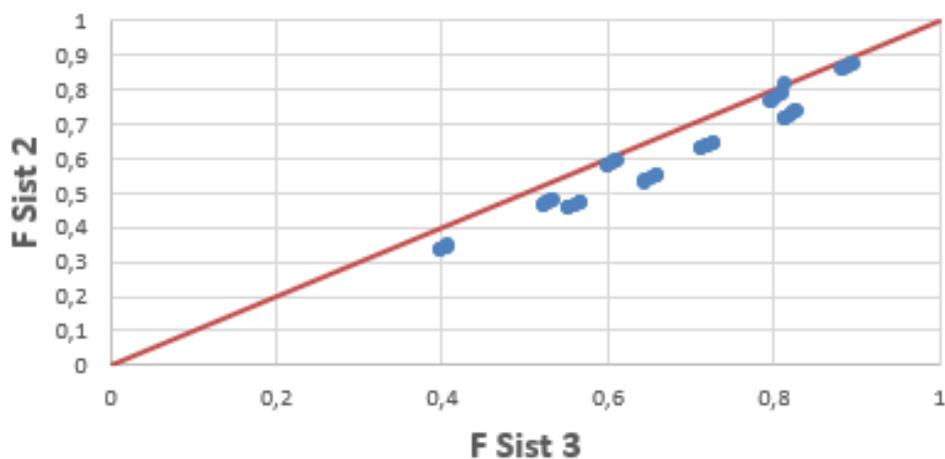


Figura 43. Influencia del sistema (Sistema 2 frente a Sistema 3)

En la Figura 44 se analiza el comportamiento de un sistema de consumo único (Sistema 3) frente a un sistema de consumo múltiple (Sistema 4). En ambos sistemas tanto el sistema de captación como la acumulación y el sistema auxiliar están centralizados y en ambos el intercambiador del circuito primario es independiente del depósito de acumulación. El sistema 4 es el único sistema de consumo múltiple que tiene centralizados los subsistemas citados anteriormente y dentro de los sistemas de consumo único el sistema con intercambiador independiente es el único que tiene esta característica.

Se observa que en general el sistema con intercambiador independiente (Sistema 3) presenta un mejor comportamiento que el sistema todo centralizado (Sistema 4), debido fundamentalmente a las pérdidas térmicas del circuito de las subestaciones que no se consideran en los sistemas de consumo único.

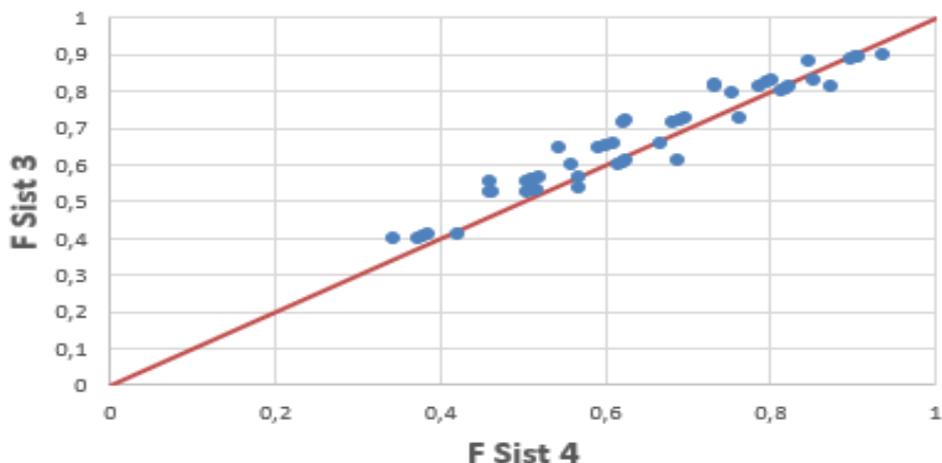


Figura 44. Influencia del sistema (Sistema 3 frente a Sistema 4)

En los sistemas de consumo múltiple se ha organizado el análisis en dos bloques. En el primero (Figura 45, Figura 46, Figura 47) se comparan todos los sistemas con la instalación todo centralizado (Sistema 4) para tener de esta manera una única referencia. En un segundo bloque (Figura 48) no se introduce el sistema 4 para poder analizar la influencia del número de depósitos de acumulación en la contribución solar.

En las Figura 45, Figura 46 y Figura 47 se observa que en general la contribución solar del sistema 4 es mayor que en el de resto de sistemas. En la instalación con apoyo distribuido (Sistema 5) existen tres casos donde la contribución solar de este sistema es claramente mayor, con diferencias entorno a 0,15. Corresponden a casos donde se ha minimizado la influencia de las pérdidas térmicas en el circuito de distribución, fijando una longitud de 1 m para este circuito, por lo que se puede considerar que no son casos representativos.

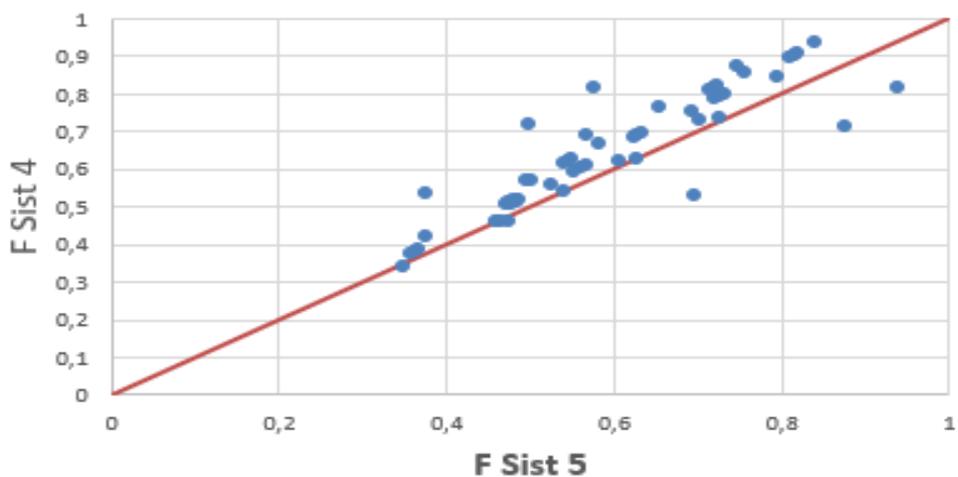


Figura 45. Influencia del sistema (Sistema 4 frente a Sistema 5)

La misma situación se produce en la instalación con intercambio distribuido (Sistema 7), con tres casos donde la contribución solar de este sistema es claramente mayor, con diferencias entre 0,15 y 0,23. Corresponden a los mismos casos con una longitud de 1 m en el circuito de subestaciones, por lo que se puede considerar igualmente que no son casos representativos. De la misma manera, existen tres casos donde el sistema 4 es claramente mejor que el sistema 7, con diferencias comprendidas entre 0,11 y 0,16. Se corresponden a casos con la mayor longitud

del circuito de subestaciones (50 m). Se puede concluir, por tanto, que al aumentar la longitud del circuito de las subestaciones mejora el comportamiento del sistema 4 (Instalación todo centralizado) frente al sistema 7 (Instalación con intercambio distribuido).

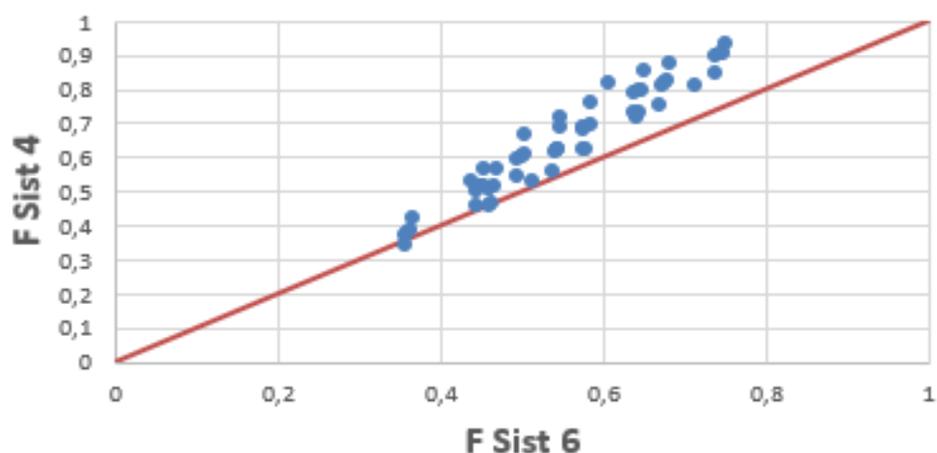


Figura 46. Influencia del sistema (Sistema 4 frente a Sistema 6)

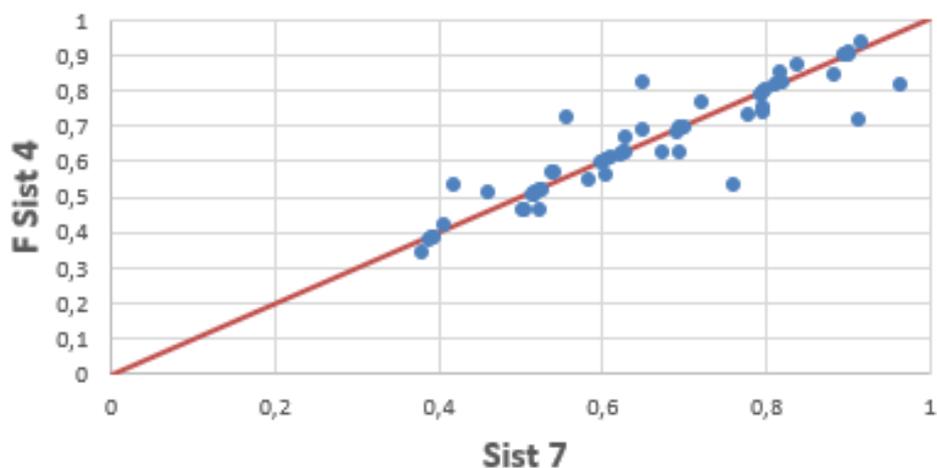


Figura 47. Influencia del sistema (Sistema 4 frente a Sistema 7)

En la Figura 48 se compara la contribución solar del sistema 6 frente a la del sistema 7. La diferencia fundamental entre ambos es la configuración del depósito de acumulación. Aunque el volumen total se mantiene, el número de depósitos en la instalación con acumulación distribuida es mayor (uno por vivienda) y por tanto las pérdidas térmicas asociadas son mayores al aumentar la superficie de transferencia. En todos los casos el sistema 6 (acumulación distribuida) presenta un peor comportamiento. Las mayores diferencias, con valores del orden de 0,25, corresponden de nuevo a los casos con longitudes mínimas del circuito de las subestaciones.

#### - Influencia de la longitud del circuito primario de captación

Para analizar la influencia de la longitud del circuito primario se han considerado longitudes de 10, 50 y 100 m salvo en el sistema 1 (Instalación con sistema prefabricado) donde está longitud está fijada y por tanto no se incluye en el análisis.

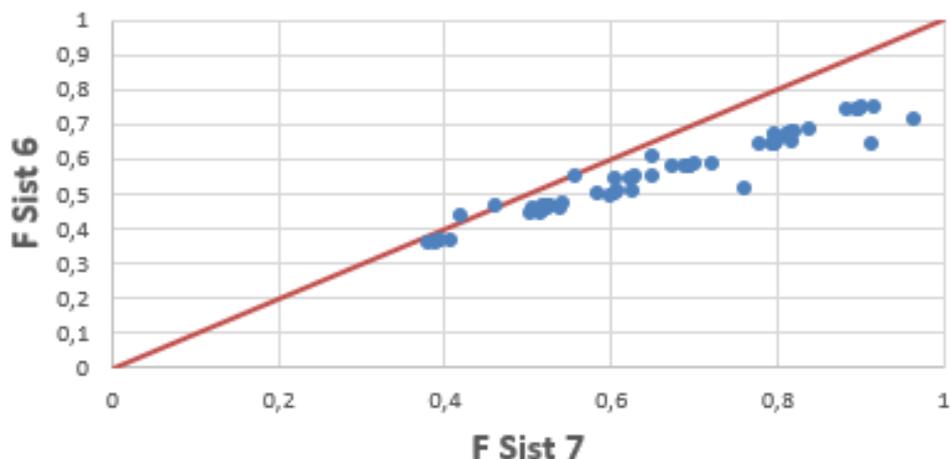


Figura 48. Influencia del sistema (Sistema 6 frente a Sistema 7)

En concreto se han analizado los siguientes casos, utilizando de nuevo la contribución solar referida a la demanda bruta como variable de comparación:

- Longitud de 10 m frente a 50 m (Figura 49)
- Longitud de 10 m frente a 100 m (Figura 50)
- Longitud de 50 m frente a 100 m (Figura 51)

Como se puede observar en las figuras anteriores, la influencia de la longitud del circuito primario es muy pequeña, debido fundamentalmente a las longitudes consideradas (máxima de 100 m) y fundamentalmente al nivel de aislamiento de la red de tuberías. Si se hubiera analizado el comportamiento de los sistemas con un nivel de aislamiento deficiente, la influencia de la longitud del circuito primario hubiera sido importante.

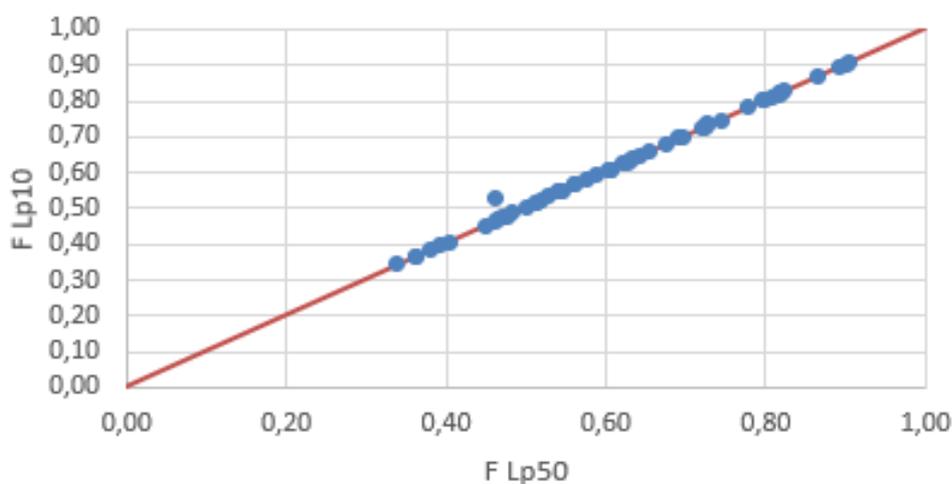


Figura 49. Influencia de la longitud del circuito primario (10 m frente a 50 m)

**- Influencia de la longitud del circuito de distribución**

Para analizar la influencia de la longitud del circuito de distribución se han considerado longitudes de 10, 100 y

200 m. En concreto se han analizado los siguientes casos, utilizando de nuevo la contribución solar referida a la demanda bruta como variable de comparación:

- Longitud de 10 m frente a 100 m (Figura 52)
- Longitud de 10 m frente a 200 m (Figura 53)
- Longitud de 100 m frente a 200 m (Figura 54)

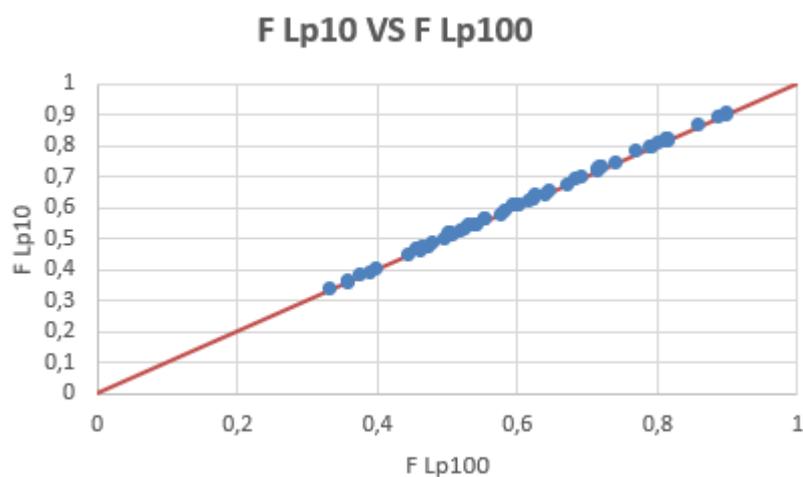


Figura 50. Influencia de la longitud del circuito primario (10 m frente a 100 m)

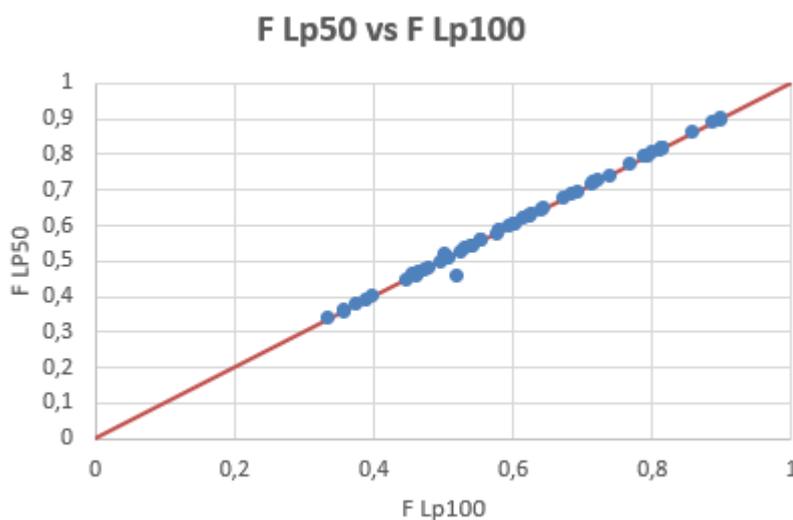


Figura 51. Influencia de la longitud del circuito primario (50 m frente a 100 m)

En todos los casos se observa que la contribución solar disminuye al aumentar la longitud del circuito. Es un comportamiento lógico porque aumentan las pérdidas térmicas en el circuito de distribución. Las mayores diferencias se obtienen evidentemente al comparar la contribución solar para una longitud de 10 m frente a la contribución solar para una longitud de 200 m (Figura 53).

La diferencia máxima observada es de 0,14. Analizando los casos con diferencias superiores a 0,10 se comprueba que todos los casos corresponden al sistema todo centralizado (Sistema 4). En este sistema el circuito

de distribución trabaja a la temperatura de salida del auxiliar, superior al resto de sistemas donde el auxiliar se encuentra en el interior de cada vivienda. Por este motivo las pérdidas del circuito de distribución son mayores en el sistema 4, a igualdad del resto de variables, y por tanto la longitud del circuito de distribución tiene una mayor influencia en la contribución solar del sistema todo centralizado.

Algo semejante se podría argumentar en los sistemas con consumo único (Sistemas 1 a 3), pero a diferencia del sistema 4, en estos sistemas no existe circuito de retorno en el circuito de distribución.

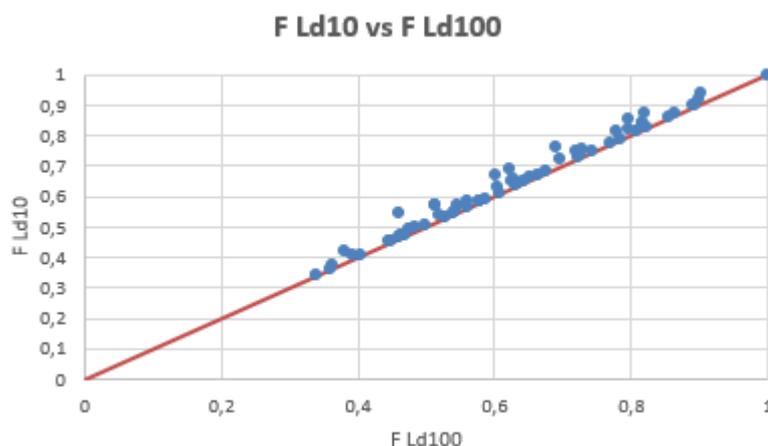


Figura 52. Influencia de la longitud del circuito de distribución (10 m frente a 100 m)

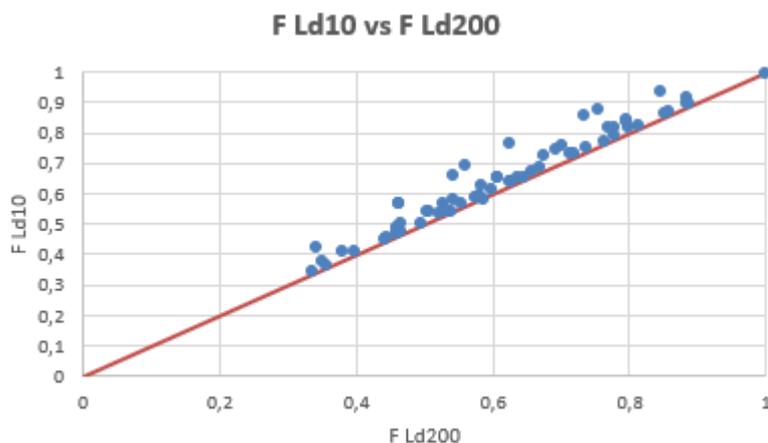


Figura 53. Influencia de la longitud del circuito de distribución (10 m frente a 200 m)

#### - Influencia de la longitud del circuito de subestaciones

Para analizar la influencia de la longitud del circuito de subestaciones se han considerado longitudes de 1, 10 y 50 m. La longitud de 1 m correspondería en la realidad a una longitud despreciable de este circuito. En concreto se han analizado los siguientes casos, utilizando de nuevo la contribución solar referida a la demanda bruta como variable de comparación:

- Longitud de 1 m frente a 10 m (Figura 55)
- Longitud de 1 m frente a 50 m (Figura 56)
- Longitud de 10 m frente a 50 m (Figura 57)

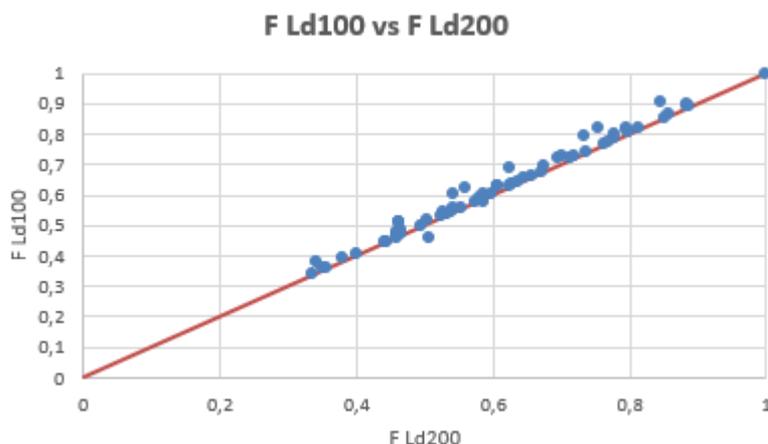


Figura 54. Influencia de la longitud del circuito de distribución (100 m frente a 200 m)

Como se ha comentado anteriormente, CHEQ4 no considera la longitud del circuito de subestaciones en los sistemas de consumo único, por lo que el análisis se restringe a los sistemas de consumo múltiple.

A diferencia de los circuitos anteriores se observa que la longitud del circuito de subestaciones tiene una gran influencia en la contribución solar del sistema. La tendencia general se mantiene porque al aumentar su longitud aumentan las pérdidas térmicas y por tanto disminuye la contribución solar. Las mayores diferencias en la contribución solar tienen lugar en las instalaciones con apoyo distribuido (Sistema 5) y en las instalaciones con intercambio distribuido (Sistema 7). En el caso más desfavorable (Figura 56) se observan diferencias entre 0,30 y 0,40 en estos sistemas.

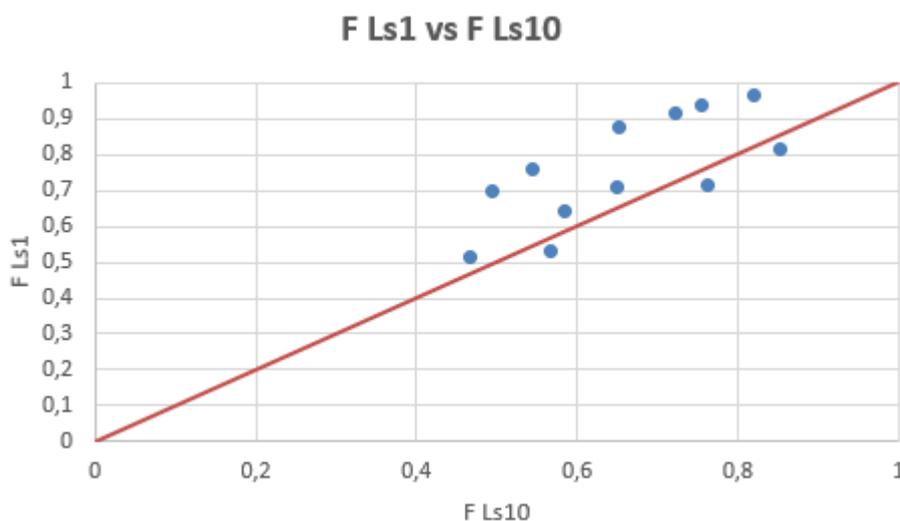


Figura 55. Influencia de la longitud del circuito de subestaciones (1 m frente a 10 m)

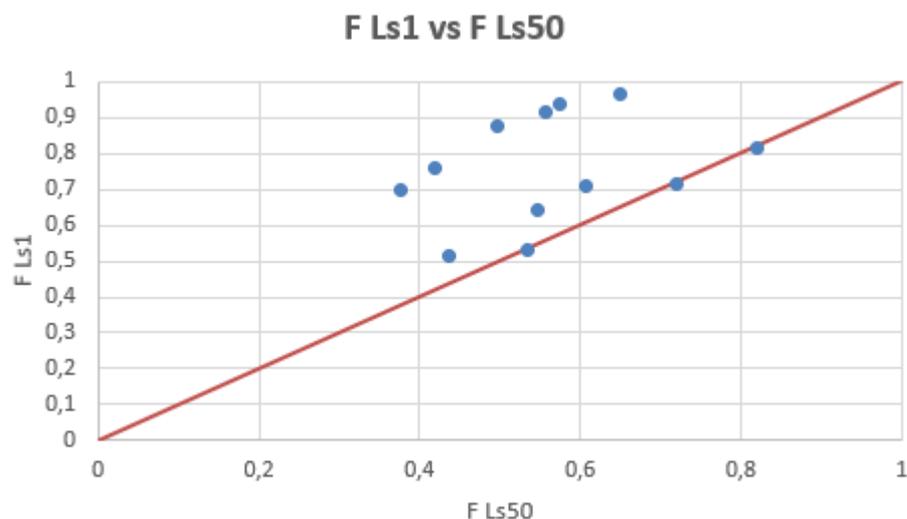


Figura 56. Influencia de la longitud del circuito de subestaciones (1 m frente a 50 m)

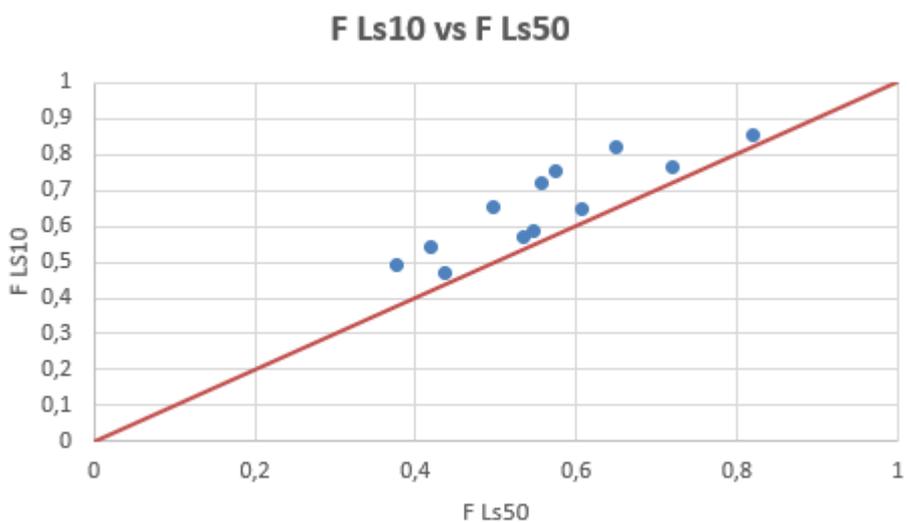


Figura 57. Influencia de la longitud del circuito de subestaciones (10 m frente a 50 m)

- **Influencia de la temperatura de impulsión**

Para analizar la influencia de la temperatura de impulsión se han considerado temperaturas de 50 y 60 C. En la Figura 58 se comprueba que, en el rango considerado, tiene poca influencia en la contribución solar.

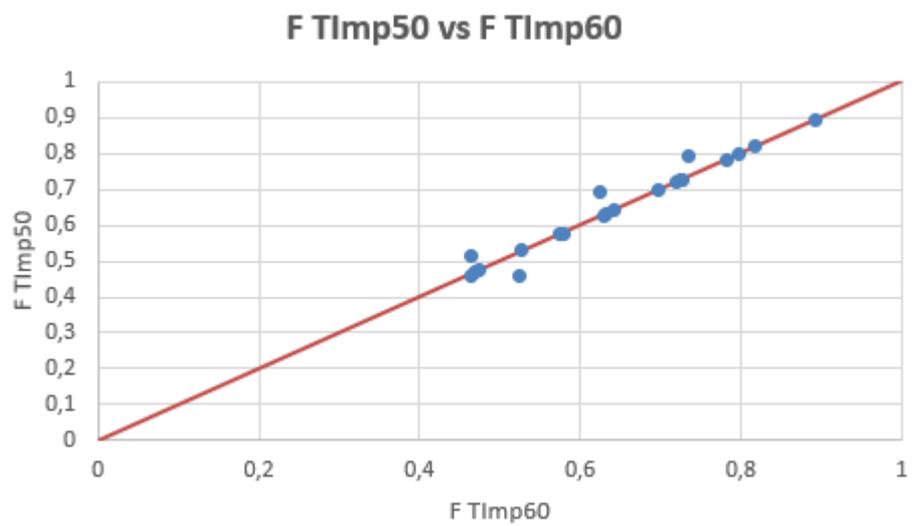


Figura 58. Influencia de la temperatura de impulsión del agua caliente

# 4 RESUMEN Y CONCLUSIONES

---

Se han analizado las diferentes configuraciones de energía solar para producción de agua caliente sanitaria en función del tipo de aplicación. Desde el punto de vista de los componentes se ha resumido el modelo de comportamiento del captador solar plano, así como del resto de componentes de la instalación. Se han analizado asimismo las condiciones de trabajo, los criterios de diseño y los requisitos de incorporación a un edificio. Desde el punto de vista de la importancia del mercado de la energía solar térmica en España, se han resumido los datos disponibles en ASIT. Se han resumido las características fundamentales de los diferentes métodos de simulación de estas instalaciones, con especial atención al método CHEQ4 que ha sido el método utilizado en el desarrollo del trabajo.

Para el análisis paramétrico de estas instalaciones se han resumido las características principales de las instalaciones de energía solar para producción de agua caliente sanitaria contempladas en CHEQ4. Se ha excluido del análisis la instalación con intercambiador y piscina cubierta. A partir de estas instalaciones se ha definido un caso base para cada una de las instalaciones consideradas que se ha utilizado como caso de referencia. A partir del caso base se ha desarrollado un análisis de la influencia de diferentes parámetros en la contribución solar del sistema. Se ha estudiado la influencia de la localidad geográfica, el tipo de sistema, el tamaño de la instalación, las longitudes de los diferentes circuitos de distribución o la temperatura de impulsión del agua caliente. Como principales conclusiones del estudio se pueden resumir las siguientes:

- El utilizar la demanda bruta para el cálculo de la contribución solar dificulta la comparación de los diferentes sistemas para un mismo edificio debido a la incidencia de las pérdidas térmicas en la demanda, modificándose la clasificación de los sistemas en función de la contribución solar.
- La contribución solar basada en la demanda neta es mayor o igual que la contribución solar basada en la demanda bruta al ser la demanda neta siempre menor o igual que la demanda bruta. En los sistemas de consumo múltiple, salvo en las instalaciones con todo centralizado, CHEQ4 no considera las pérdidas térmicas en el circuito de las subestaciones al calcular la demanda bruta por lo que en estos sistemas coinciden la demanda neta con la demanda bruta y por tanto las contribuciones solares correspondientes.
- La contribución solar aumenta con la relación radiación solar incidente/demanda independientemente de la localidad geográfica y del tamaño de la instalación.
- Los sistemas prefabricados son los que presentan una mayor contribución solar a pesar de funcionar por termosifón. Al no conocer con detalle el modelo utilizado en CHEQ4 para estos sistemas es difícil analizar las causas de este comportamiento.
- Dentro de los sistemas de consumo único con circulación forzada, los sistemas con intercambiador independiente se comportan mejor que los sistemas con interacumulador.
- En los sistemas de consumo múltiple, el sistema que presenta mayores valores de la contribución solar es el sistema todo centralizado.
- Al comparar las instalaciones con intercambiador independiente (sistemas de consumo único) con las instalaciones con todo centralizado (sistemas de consumo múltiple), se comprueba que la contribución solar es mayor en el sistema de consumo único, debido fundamentalmente a que CHEQ4 no considera en estos sistemas las pérdidas del circuito de subestaciones.
- Al aumentar el número de depósitos de acumulación, manteniendo el volumen total, disminuye la contribución solar debido al aumento de las pérdidas térmicas en la acumulación.
- La longitud del circuito primario de captación tiene poca influencia en la contribución solar, debido al nivel de aislamiento considerado.
- La contribución solar disminuye al aumentar la longitud del circuito de distribución, al aumentar las pérdidas térmicas en el circuito de distribución. La mayor influencia se produce en el sistema todo centralizado donde el circuito de distribución trabaja a la temperatura de salida del auxiliar, superior al resto de sistemas donde

el auxiliar se encuentra en el interior de cada vivienda. Algo semejante se podría argumentar en los sistemas con consumo único, pero a diferencia del sistema todo centralizado, en estos sistemas no existe circuito de retorno en el circuito de distribución.

- La longitud del circuito de subestaciones tiene una gran influencia en la contribución solar del sistema. La tendencia general se mantiene porque al aumentar su longitud aumentan las pérdidas térmicas y por tanto disminuye la contribución solar. Las mayores diferencias en la contribución solar tienen lugar en las instalaciones con apoyo distribuido y en las instalaciones con intercambio distribuido.
- En los sistemas de consumo único no existe como tal el circuito de subestaciones por lo que en estos sistemas no se puede analizar su influencia en la contribución solar.
- En el rango considerado de temperaturas de impusión del agua caliente, esta temperatura tiene una escasa influencia en la contribución solar, que en general disminuye al aumentar esta temperatura.

# REFERENCIAS

---

- [1] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía & IDAE, 2019.
- [2] Asociación Solar de la Industria Térmica (ASIT), Guía ASIT Energía Solar, 2010.
- [3] Asit Solar. (n.d.). Retrieved September 9, 2021, from <http://www2.asit-solar.com/association/show/id/1>
- [4] Agencia Andaluza de la Energía, “ACSOL 2.5” – Simulador de instalaciones solares térmicas de baja temperatura”, 2010.
- [5] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, & IDEA. (2019) CHEQ4: Manual de usuario. <http://cheq4.idae.es/userfiles/file/Manual de usuario CHEQ4.pdf>.
- [6] Código Técnico de la edificación, “Documento Básico HE de ahorro de Energía”, 2013.
- [7] Guerra Macho, JJ. Apuntes de la asignatura “Energía Solar”, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2021.

# GLOSARIO

---

|  |    |
|--|----|
| A: Área  | 2  |
| ACS: Agua caliente sanitaria                                   | 1  |
| ASIT: Asociación Solar de la Industria Térmica                 | 19 |
| BT: Baja Temperatura   | 21 |
| CPC: Captador Cilindro Parabólico                              | 15 |
| IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía | 31 |
| IST: Instalación Solar Térmica                                 | 2  |
| kW: Kilovatios   | 2  |
| MI: Manual de Instrucciones                                    | 19 |
| Ps: Potencia Solar   | 2  |
| PVT: Captadores de Tubos de Vacío                              | 19 |
| SST: Sistema Solar Térmico                                     | 1  |
| TIM: Transparent Insulation Material                           | 15 |
| TRNSYS: Transient System Simulator                             | 24 |
| V: Volumen   | 2  |