



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE
INGENIERÍA TÉCNICA UNIVERSITARIA
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**



Aplicación de paneles híbridos PV/T con concentración para trigeneración en viviendas unifamiliares

TRABAJO FIN DE MÁSTER. CURSO 2009/10

**MÁSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA
(PROGRAMA OFICIAL DE POSGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA)**



ENRIQUE NAVARRO FERRER

DIRECTOR: JOSÉ ANTONIO TURÉGANO ROMERO

Zaragoza, Septiembre de 2010

APLICACIÓN DE PANELES HÍBRIDOS PV/T CON CONCENTRACIÓN PARA TRIGENERACIÓN EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES

Resumen

La energía solar es una de las fuentes de energía renovable más prometedoras. Existe una diversidad de formas en que esta energía puede ser utilizada; las más importantes son mediante paneles solares fotovoltaicos y mediante colectores térmicos. Los paneles fotovoltaicos se usan para obtener electricidad mientras que los colectores se usan para obtener agua caliente. Ambos sistemas son tecnológicamente distintos y por tanto independientes el uno del otro.

Incrementar la radiación en una célula fotovoltaica incrementa su generación de electricidad. Esto puede ser realizado utilizando concentradores solares en los paneles. Sin embargo, este incremento de radiación produce un sobrecalentamiento de las células y por tanto, el deterioro de su eficiencia. Debido a esta reducción del rendimiento, es necesario refrigerar las células fotovoltaicas con el fin de mitigar este problema. Si se busca en libros especializados sobre paneles FV, para dar solución al problema de la temperatura, no se suele encontrar ninguna solución técnica, que por otra parte es inherente a la propia energía solar. Lo que si recomiendan las bibliografías es ubicar los paneles FV en lugares bien ventilados, con el fin de prevenir los efectos negativos de la temperatura, por otra parte se está desaprovechando esta energía térmica.

Construir y diseñar un sistema solar fotovoltaico-térmico en un solo panel es una solución viable que permitirá resolver problemas de eficiencia eléctrica del panel FV y poder aprovechar la energía térmica [1]. El agua obtenida de la refrigeración se puede usar para agua caliente sanitaria, para calefacción o para refrigeración, mediante una máquina de absorción o adsorción, obteniéndose junto con la generación de electricidad una trigeneración.

En este trabajo se van a presentar los sistemas híbridos y las principales investigaciones sobre los mismos que hay en la actualidad, tanto con concentración como sin ella. Se hablará de la trigeneración posible con estos sistemas y se presentará un esquema tipo de una instalación.

A continuación se modelará dicha instalación para una vivienda mediante el software TRNSYS, más concretamente, para el edificio que se quiere presentar para el concurso Solar Decathlon 2012. Para ello se han desarrollado los diferentes sistemas, con especial hincapié en la máquina de adsorción, ya que la carga de refrigeración será la que determinará el tamaño de colector a instalar, y en el colector CPC.

Tras simular varias veces el programa se consiguió optimizar los parámetros principales de la instalación y comparar con los obtenidos mediante el método bin y con las especificaciones del fabricante, utilizadas para el diseño del colector. Por último, se presentan unas conclusiones finales.

ÍNDICE

1. Introducción al trabajo fin de máster	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Contenido del trabajo	2
2. Introducción a los sistemas híbridos fotovoltaica- térmica	3
2.1 Tipos de colectores PV/T	3
2.1.1 Según la concentración	3
2.1.2 Según el fluido de trabajo	3
2.2 Sistemas híbridos PV/T con concentración	4
2.2.1 Antecedentes de sistemas híbridos PV/T de concentración ..	5
2.2.2 Utilización de sistemas de concentración en España	7
2.2.3 Perspectivas de la energía solar por concentración	7
2.2.4 Ventajas de la concentración solar	9
3. Trigeneración	10
3.1 Esquema básico	10
3.2 Cargas térmicas de enfriamiento y calefacción	11
3.2.1 Sistema de suelo radiante	12
3.2.2 Máquina de adsorción	13
3.3 Cargas eléctricas	16
4. Metodología del proyecto	17
4.1 Absolicon X10	17
4.1.1 Cómo funciona	18
4.1.2 Modelo y características técnicas	19

4.1.3 Aplicaciones	20
4.2 Metodología del trabajo	20
4.2.1 Cálculo demanda energética de la vivienda unifamiliar .	21
4.3 TRNSYS.....	25
4.3.1 Parámetros climáticos del emplazamiento	26
4.3.2 Módulos de la instalación	28
 5. Resultados	 32
5.1 Optimización del tamaño del colector CPC	32
5.2 Optimización de otros módulos de la instalación solar....	34
5.3 Comparación colector plano con CPC	36
 6. Conclusiones	 38

Bibliografía

ANEXOS

ANEXO A: Metodología simplificada de dimensionamiento de paneles

ANEXO B: CPC y Absolicon X10

ANEXO C: TRNSYS

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. (a) Sección cortada de un panel híbrido PV/T y (b) esquema de una placa absorbedora</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2. Tipos de colectores PV/T con agua como fluido de trabajo</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3. Instalación de concentradores parabólicos en un edificio con seguimiento a un eje</i>	<i>4</i>
<i>Figura 4. Planta fotovoltaica (concentrador constituido por lentes de Fresnel lineales arqueadas, Entech). Fuente NASA.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 5. Sistema CHAPS en Australia</i>	<i>6</i>
<i>Figura 6. Mapa de radiación solar directa en España</i>	<i>7</i>
<i>Figura 7. Corte de una célula multicapas y bandas de absorción de los diferentes materiales que componen una célula multicapas.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 8. (a) Dependencia de la curva I-V con la irradiancia ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) y (b) la temperatura ($AM\ 1,5$, 1 kW/m^2)</i>	<i>9</i>
<i>Figura 9. Esquema básico de la instalación</i>	<i>10</i>
<i>Figura 10. Esquema demandas estimadas para la vivienda unifamiliar.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 11. Dibujo representativo de un sistema de calefacción por suelo radiante tradicional.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 12. Comparativa de flujos de calor entre calefacción mediante suelo radiante y radiador</i>	<i>13</i>
<i>Figura 13. Máquina de adsorción</i>	<i>14</i>
<i>Figura 14. Funcionamiento de una máquina de adsorción (A: Adsorción; D: Desorción).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 15. Variación del COP y la potencia como función de la temperatura de activación.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 16. Compendio de tecnologías que comprende el panel híbrido Absolicon X10</i>	<i>17</i>
<i>Figura 17. Receptor con doble tecnología solar: fotovoltaica y térmica</i>	<i>18</i>
<i>Figura 18. Célula fotovoltaica receptora del panel híbrido</i>	<i>18</i>
<i>Figura 19. Croquis y dimensiones del modelo de 6 m del Absolicon X10</i>	<i>19</i>
<i>Figura 20. Tabla de especificaciones técnica de los modelos de 6 y 10 m del Absolicon X10</i>	<i>19</i>
<i>Figura 21. Curva de potencia eléctrica de los diferentes modelos del Absolicon X10</i>	<i>20</i>

<i>Figura 22. Simulación en TRNSYS de la potencia de refrigeración y calefacción a cubrir por el equipo solar a lo largo del año y la temperatura ambiente anual</i>	<i>24</i>
<i>Figura 23. Perfil de temperaturas ambiente (AMT) de Madrid, simulado en TRNSYS.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 24. Irradiancia global sobre el plano horizontal</i>	<i>27</i>
<i>Figura 25. Irradiancia directa sobre el plano del concentrador</i>	<i>27</i>
<i>Figura 26. Mapa de radiación anual europeo</i>	<i>28</i>
<i>Figura 27. Simulación de TRNSYS que representa las temperaturas de entrada y salida de los 3 circuitos de la máquina de adsorción, siendo el rojo el del edificio, el morado el propio de la máquina de adsorción y el azul, el de la torre de refrigeración</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 1. Energías auxiliares y demandadas de refrigeración y calefacción, además de la fracción solar que cubre la instalación y la energía fotovoltaica producida por m² y total, en función del área del colector.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 28. Relación entre el área del colector y el porcentaje de energía demandada que cubre la instalación, tanto de refrigeración como de calefacción.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 29. Gráfica de TRNSYS de la estratificación del depósito, la temperatura requerida a la salida del depósito y las energías auxiliares necesarias y las energías demandadas de calefacción y refrigeración</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2. Energías auxiliares y demandadas de refrigeración y calefacción, además de la fracción solar que cubre la instalación, en los dos sistemas en función del ratio volumen/área</i>	<i>35</i>
<i>Figura 30. Relación entre el ratio volumen del depósito/área del colector y el porcentaje de energía demandada que cubre la instalación, tanto de refrigeración como de calefacción</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 3. Energías auxiliares y demandadas de refrigeración y calefacción, además de la fracción solar que cubre la instalación, en los dos sistemas en función del caudal másico circulante por el colector</i>	<i>36</i>
<i>Figura 31. Relación entre el flujo másico circulante por el colector y el porcentaje de energía demandada que cubre la instalación, tanto de refrigeración como de calefacción</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 4. Energías auxiliares y demandadas de refrigeración y calefacción, además de la fracción solar que cubre la instalación, en los dos sistemas en función del tipo de colector.....</i>	<i>37</i>

1. Introducción al trabajo fin de máster

1.1 Motivación

El estudio de la gestión térmica de los captadores solares fotovoltaicos de concentración se puede tratar desde dos puntos de vista muy diferentes, pero no por ello antagónicos:

- Una de las motivaciones más importantes para estudiar los colectores híbridos térmico-fotovoltaicos es el hecho de que, incluso con células fotovoltaicas de silicio de alta calidad con eficiencias cuánticas cercanas a la ideal, la mayor parte de la energía del sol se convertirá siempre en calor. La ganancia en el balance energético global del sistema solar híbrido respecto a un colector solar térmico o fotovoltaico clásico dependerá en gran parte de un aspecto: la capacidad del sistema de disipación para transmitir al fluido refrigerante la energía no transformada en electricidad. Así se mejora la eficiencia global del sistema al aprovechar una mayor cantidad de energía térmica.
- Para lograr una mayor competitividad en el mercado, los generadores fotovoltaicos necesitan mejorar su producción de energía eléctrica. Para ello, los sistemas con concentración utilizan células fotovoltaicas más caras, pero en menor cantidad y con eficiencias mayores. Una tecnología que permita controlar al máximo el aumento de la temperatura de las células es claramente un aspecto clave del diseño de los concentradores fotovoltaicos. Además, en un sistema de aprovechamiento térmico, sus características dependen del salto térmico que se produce entre la entrada y la salida del fluido térmico.

Aunar estas motivaciones con los nuevos programas de simulación dinámica, como TRNSYS, es la principal labor de este proyecto, en busca de poder instalar este tipo de instalación solar en una vivienda y que su funcionamiento sea el más correcto y óptimo energéticamente.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del trabajo es diseñar y caracterizar un sistema solar híbrido de concentración cuya finalidad sea su integración arquitectónica en edificios, pudiendo distinguirse los siguientes objetivos parciales, desarrollado a lo largo de este trabajo fin de máster:

- Introducción a los sistemas híbridos de energía térmica con fotovoltaica más importantes que hay en la actualidad, tanto con concentración como sin ella.
- Describir la trigeneración posible (calefacción, refrigeración y electricidad) con estos sistemas, centrado en aplicaciones para viviendas unifamiliares.
- Proposición de una metodología de dimensionamiento de captadores híbridos PV/T, así como de otras partes de la instalación, circuito hidráulico, máquina de adsorción, torre de refrigeración, caldera auxiliar de biomasa,...
- Realización de unos primeros cálculos para dimensionar el captador híbrido y otras partes de la instalación, anteriormente comentada, para una vivienda unifamiliar.

- Simulación con el software TRNSYS de los diversos sistemas, con el fin de comprobar y afinar el tamaño de la instalación, respecto a los primeros cálculos y a especificaciones del fabricante de paneles de este tipo.

1.3 Contenido del trabajo

A continuación se resumen las principales actividades que se han llevado a cabo dentro del proyecto.

En primer lugar, se realiza un estudio inicial acerca de los sistemas solares híbridos, con especial atención a los que utilizan concentración de la radiación, una vez revisado bibliográficamente el tema, se expone las perspectivas de futuro de esta tecnología y sus ventajas principales.

En el tercer capítulo, se describe la trigeneración que se puede alcanzar con este sistema, calefacción y ACS, refrigeración y/o electricidad, y se presta principal atención al sistema de refrigeración por adsorción y en menor parte al de calefacción por suelo radiante. Además, se presenta un esquema básico de la instalación híbrida solar a instalar.

La metodología utilizada tanto por el método bin (cálculos previos de predimensionamiento) como la del software TRNSYS se muestran en el capítulo 4, además de presentar el modelo comercial con el que han sido comparados los resultados. También se explica las variables de decisión utilizadas en los resultados y los diferentes módulos que componen la instalación.

En el capítulo 5 se exponen los resultados obtenidos de TRNSYS y los comentarios propios del mismo, para finalmente en el sexto, presentar las conclusiones finales.

2. Introducción a los sistemas híbridos fotovoltaica-térmica

Los colectores híbridos PV/T (siglas en inglés de fotovoltaica/térmica) son dispositivos que convierten energía solar en electricidad y calor. En los últimos 25 años se han llevado a cabo numerosas investigaciones sobre el tema, tanto en modelos numéricos como analíticos [2].

Un colector PV/T (figura 1) consta básicamente de un módulo fotovoltaico, encargado de la producción eléctrica con una placa absorbedora en la parte posterior. El objetivo de esta placa es doble. En primer lugar, el enfriamiento de la placa fotovoltaica con el fin de mejorar su funcionamiento eléctrico. Y en segundo lugar, producir energía térmica, la cuál sería pérdida, sin esta hibridación. Este calor extraído puede ser utilizado como se ha explicado en el resumen en aplicaciones como agua caliente sanitaria, calefacción y/o refrigeración.

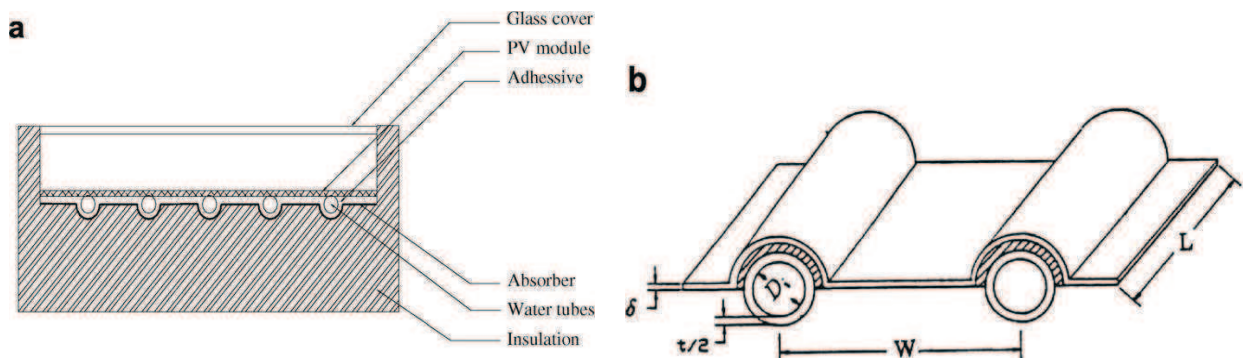


Figura 1. (a) Sección cortada de un panel híbrido PV/T y (b) esquema de una placa absorbedora.

El rendimiento de los colectores híbridos de los dos sistemas suele ser más bajo que los módulos fotovoltaicos y los colectores térmicos por separado. Sin embargo, hay que enfatizar, que analizando la energía producida por unidad de superficie, el panel híbrido supera a los dos sistemas por separado. En aplicaciones donde la disponibilidad de área es vital, como ocurre en el caso que se va a analizar en este trabajo, estos paneles ganan mucha importancia.

2.1 Tipos de colectores PV/T

Los paneles híbridos se pueden clasificar principalmente según dos criterios importantes: la concentración o no del colector y, por otro lado, el tipo de fluido de trabajo.

2.1.1 Según la concentración

- **Colectores PV/T planos** (sin concentración): son muy similares a los colectores térmicos planos, con la única salvedad de que incluyen un módulo fotovoltaico sobre la placa absorbedora.
- **Colectores PV/T con concentración**: como los módulos fotovoltaicos son habitualmente caros, se puede utilizar la concentración con el fin de incrementar el nivel de radiación que incide sobre los mismos. A partir de ahora el trabajo se centrará en este tipo de colector, que es el que ha sido simulado en este proyecto.

2.1.2 Según el fluido de trabajo

- **Agua**: se distingue diferentes paneles PV/T según el modelo de flujo del agua. En la figura 2, se muestran varios tipos, según se usen láminas o tubo, tipos de absorbedores o distintos canales. Será el tipo que se analizará específicamente.

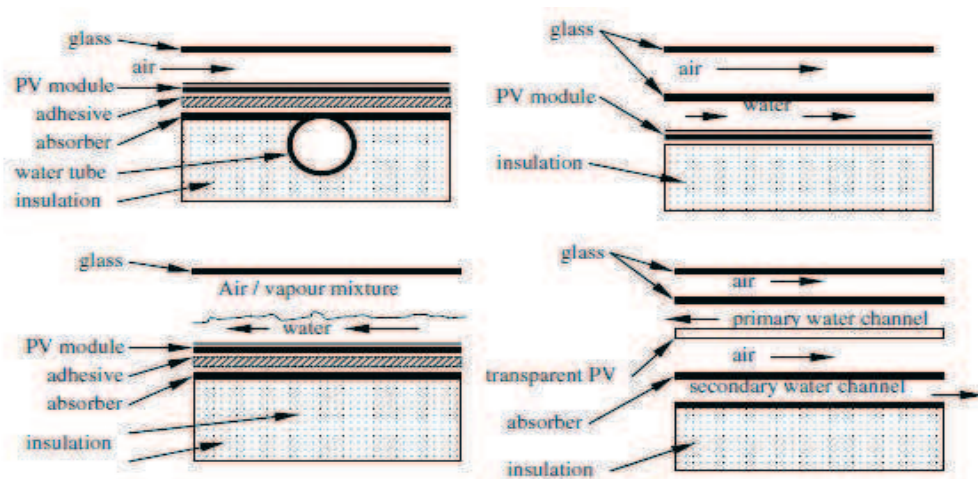


Figura 2. Tipos de colectores PV/T con agua como fluido de trabajo.

- **Aire:** basado en modelos de flujo del aire. Se diferencian según el flujo de aire sea por encima o por debajo del absorbedor o en ambos.

2.2 Sistemas híbridos PV/T con concentración

En primer lugar, hay que hablar de la concentración, como elemento óptico utilizado para disminuir el coste de la instalación. Por ejemplo, es mucho más barato utilizar reflectores que células de silicio. El problema es la dificultad para concentrar esa radiación sobre pequeñas áreas de superficie, para ello es necesario un seguimiento del Sol en su movimiento aparente respecto a la Tierra. Existen diferentes técnicas de seguimiento según el nivel de concentración que se quiere alcanzar:

- **Seguimiento estacional**, que consiste en el cambio manual de la posición del concentrador unas pocas veces al año para conseguir su apuntamiento.
- **Seguimiento en un eje**, en el que el concentrador gira respecto a un eje manteniendo al sol dentro de un campo angular de visión del concentrador durante todo el año (figura 3). El eje de giro suele situarse en las direcciones norte-sur, este-oeste, vertical o polar. Estos son sistemas que suelen trabajar en el rango de concentraciones intermedias (10x a 100x). Es el tipo de seguimiento que utiliza el modelo simulado en este proyecto.



Figura 3. Instalación de concentradores parabólicos en un edificio con seguimiento a un eje.

- **Seguimiento ideal o en dos ejes**, mediante el cual se mantiene el concentrador apuntado al sol en todo momento. En la práctica, son los sistemas que alcanzan los niveles más altos de concentración (figura 4).



Figura 4. Planta fotovoltaica (concentrador constituido por lentes de Fresnel lineales arqueadas, Entech).
Fuente NASA.

2.2.1 Antecedentes de sistemas híbridos PV/T de concentración

Dentro de los colectores híbridos PV/T con concentración, los estudios más relevantes que se han realizado son los siguientes: Garg analiza la utilización de reflectores planos sin seguimiento con ratios de concentración de 2x para PV/T refrigerados por aire [3] y un sistema de termosifón [4]. Sharan y Kandpal (1992) caracterizan un colector PV/T con seguimiento solar en un eje, con un reflector Fresnel de una concentración de 5x [5].

Más recientemente se ha estudiado el uso de concentradores parabólicos compuestos (CPCs) para sistemas PV/T [6, 7, 8, Brogren; 3, Garg]. Garg analiza un concentrador CPC de 3x con aire como fluido de trabajo, concluyendo que el concentrador puede mejorar su diseño si se requieren temperaturas más elevadas. En Suecia, Brogren está explorando la utilización de CPCs para aplicaciones en sistemas PV/T que requieren agua como fluido de trabajo. En particular, Brogren está estudiando las propiedades ópticas de los CPCs y el impacto en el diseño de las células fotovoltaicas de los efectos de iluminación no uniforme, alta temperatura y alta intensidad lumínica.

Con ratios más elevados de concentración (media concentración) ENTECH probó dos sistemas que utilizaban lentes Fresnel lineales. El primer ensayo, con un concentrador de 25x fue en el hotel Hyatt en Dallas / Fort Worth Internacional Airport. Este sistema producía 24 kW eléctricos y 120 kW térmicos (este sistema estuvo en funcionamiento de 1982-1992). El segundo sistema que utilizó fue en Sandia Albuquerque, con una concentración de 40x, y con unas producciones de 22 kW eléctricos y 70 kW térmicos.

Actualmente en la Universidad Nacional de Australia (ANU) están trabajando con sistemas PV/T, a los que denominan CHAPS (Combined Heat And Powered Solar, figura 5). Estos sistemas utilizan un concentrador parabólico, con un ratio de concentración que oscila entre los 20-40x [9,10].

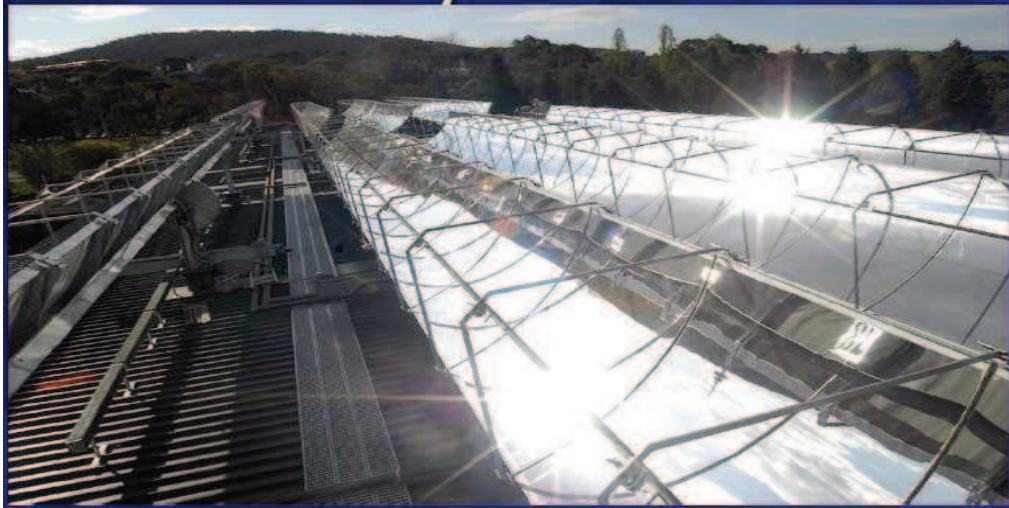


Figura 5. Sistema CHAPS en Australia.

En la Universidad de Lleida se han construido y estudian colectores PV/T con concentradores Fresnel de espejos, que consiguen concentraciones de entre 5 y 20X [11,12].

Aumentar la concentración a unos niveles mayores tiene el problema de que las células están sometidas a un flujo de calor muy elevado. Para evitar en cierta medida este efecto, se utilizan unos filtros que sólo permiten el paso de la radiación directa con el rango del espectro que utilizan las células fotovoltaicas. El resto de la radiación es desviada directamente a un absorbedor térmico. Este método se conoce como *spectral beam splitting*, y está descrito perfectamente por Imenes y Mills [13].

Hamdy *et al.* [14], realizaron una simulación en TRNSYS comparando un colector PV/T con una concentración de 50x con otro colector sólo fotovoltaico con tecnología *beam splitting* a 50 y 22x. Un consorcio japonés (Yang *et al.*, [15]) propuso un sistema similar usando un espejo parabólico selectivo. El *spectral beam splitting* se propuso también para dos concentradores en Australia, *the Multi Tower Solar Array* [16] y el *SS20* [17].

En la actualidad, tanto los colectores de baja, como de media y alta concentración tienen unas características que por su tamaño, peso, etc., prácticamente limitan su uso a sistemas industriales que dispongan de grandes azoteas o superficies; o en el caso de los sistemas domésticos (baja concentración), a casas y edificios que al igual que en el caso anterior dispongan de superficies importantes.

En el caso de las viviendas, y teniendo en cuenta el precio actual del suelo, ocupar un espacio grande con el sistema PV/T supone no poder destinar ese espacio a otro uso. Además a la concentración a la que se trabaja en estos sistemas domésticos (2-5x) se requiere de un número elevado de m² de colector, para obtener unos mínimos de energía del colector.

Teniendo en cuenta estas consideraciones y la necesidad actual de la utilización de energías renovables para evitar el agotamiento de los recursos, la degradación de la capa de ozono, el calentamiento global, etc., es necesario crear colectores domésticos que trabajen a una concentración mayor (10-30x) y ocupen un espacio menor. De esta forma se rentabiliza mucho más el m² ocupado por el sistema PV/T, además de añadir una manejabilidad, posibilidad de acoplado de varios módulos según las necesidades, capacidad, etc.

2.2.2 Utilización de sistemas de concentración en España

Los sistemas fotovoltaicos con concentración utilizan sólo la parte directa de la radiación solar. La figura 6 presenta el mapa de radiación directa de España obtenido mediante satélite y editado por el CIEMAT a partir de un estudio realizado mediante Satélite. Se observan dos zonas en rojo:

- La zona de Almería, cuyo potencial era conocido y que favoreció la creación al inicio de la década de los 80 de la Plataforma Solar de Almería por parte del Ministerio de Educación y Ciencia para demostrar la viabilidad técnica de la energía solar concentrada como fuente de energía eléctrica.
- La zona de Lleida y la parte oriental de la provincia de Huesca. Este dato abre la posibilidad de impulsar la Universidad de Lleida como el segundo centro de investigación de las diferentes tecnologías de concentración solar a nivel estatal.
- La zona de Madrid a la que pertenece este estudio no llega a las condiciones de las dos zonas anteriores pero también tiene una alta radiación directa.

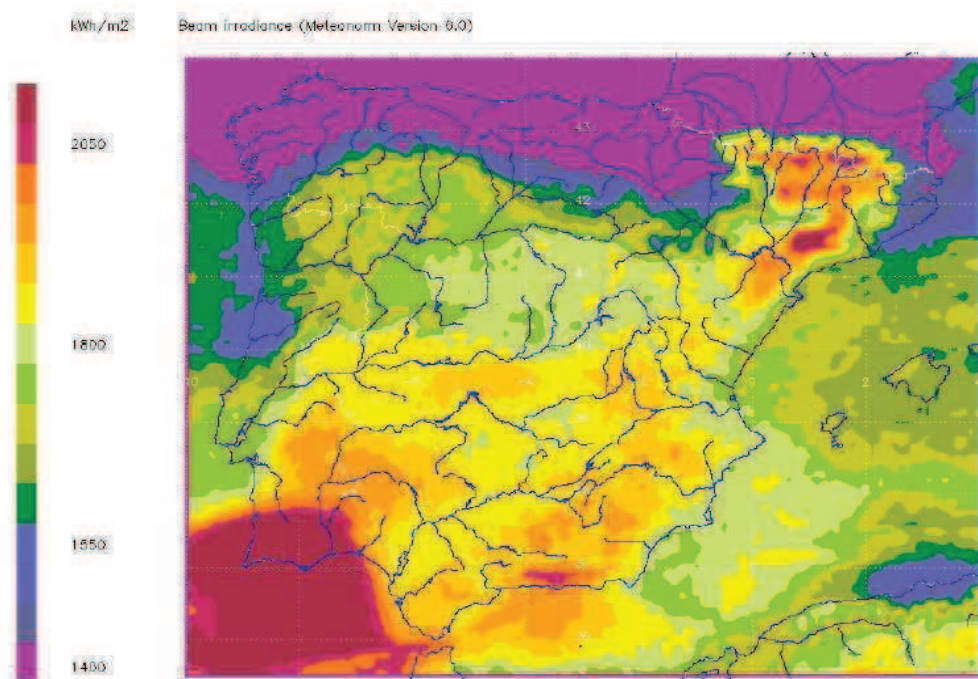


Figura 6. Mapa de radiación solar directa en España [18].

2.2.3 Perspectivas de la energía solar por concentración

La eficiencia cuántica de la conversión fotovoltaica aumenta con la concentración, lo que hace aumentar la eficiencia instantánea del sistema. Pudiéndose reducir el número de células del sistema (del orden del factor de concentración), se pueden emplear células más caras sin repercutir apreciablemente en el coste global. Se están desarrollando tecnologías de células multicapas con eficiencias en laboratorio superiores al 40%. Uno de los últimos records es del 42,8 % se basa en la utilización de silicio cristalino junto con otros semiconductores (*University of Delaware consortium, 2007*) [19].

La previsión es que esta eficiencia siga incrementándose progresivamente. Es un dato altamente significativo y positivo que el último record de eficiencia obtenido por el consorcio de la Universidad de Delaware, dentro del programa DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), se haya conseguido con una concentración de 20X.

La tecnología más prometedora de estas células de nueva generación es la de las multicapas. Para poder aprovechar un intervalo más grande del espectro solar, se apilan varias células unas encima de otras. Cada una de ellas absorbe un intervalo del espectro solar según el material semiconductor que la compone (figura 7). Eligiendo convenientemente los materiales de cada una de ellas para aprovechar al máximo el intervalo de longitud de ondas, se obtienen células de eficiencias muy altas.

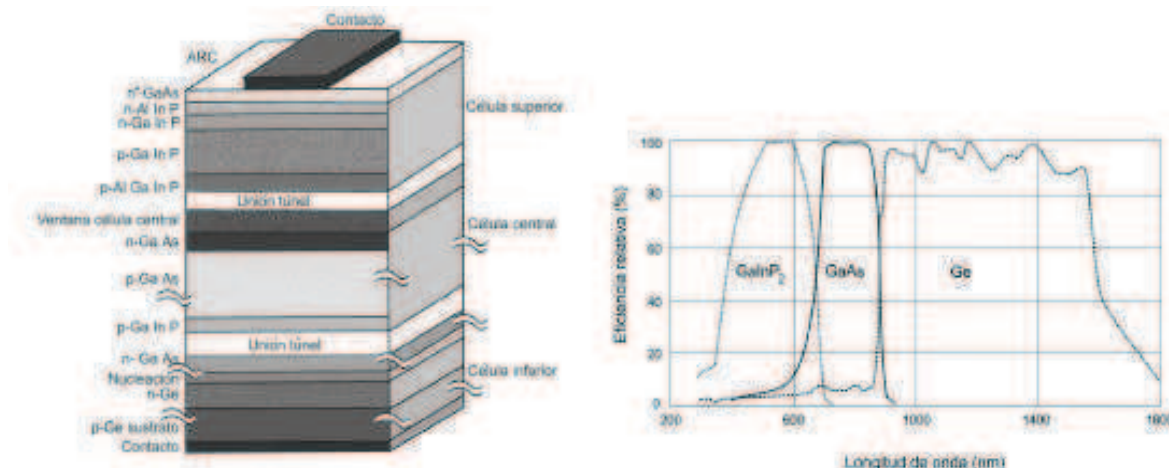


Figura 7. Corte de una célula multicapas y bandas de absorción de los diferentes materiales que componen una célula multicapas.

Los concentradores se pueden fabricar con materiales constructivos convencionales, disponibles en gran cantidad en el mercado y con costes razonables (acero, espejos). Esto favorece su desarrollo en el sentido que puede aumentar rápidamente su capacidad de producción a varios centenares de MWh/año usando las infraestructuras industriales ya existentes.

La superficie total de células fotovoltaicas (material más caro) queda dividido por la concentración geométrica que puede ir de 2X a 400X para las células de silicio y de 500X a 1500X para células fabricadas con otros materiales semiconductores. Se reemplaza así un gran número de células (coste aproximado de 500 Euros/m²) por unas pocas asociadas a un sistema de concentración compuesto generalmente por espejos (~15 Euros/m²) o lentes de Fresnel (~83 Euros/m²) [19].

El almacenamiento de la energía producida (térmica y eléctrica) puede realizarse también a través de un sistema de producción de hidrógeno. La capacidad de almacenar la energía solar producida es un aspecto fundamental para el desarrollo de ésta tecnología, ya que las energías renovables está siendo atacadas por su alto coste, pero también por la problemática de su limitada disponibilidad.

Además, se esta produciendo un desplazamiento rápido de los días de mayor consumo energético del invierno hacia los días más calurosos del verano en todos los países desarrollados debido al gran consumo de los aparatos de climatización. En California, este fenómeno ya esta claramente establecido y ha provocado unos cortes en el suministro eléctrico de una gran magnitud. Esta realidad favorece de manera muy importante el desarrollo de la energía solar de concentración. En efecto, esta tecnología se diferencia de la de los colectores planos por el hecho de que utiliza solo la radiación solar directa, la cual es más importante en periodos estivales.

Este aspecto de la refrigeración solar será factor clave de diseño del proyecto y será ampliamente tratado a lo largo del mismo.

2.2.4 Ventajas de la concentración solar

Los sistemas de concentración solar tienen una serie de ventajas con respecto a los sistemas de placa plana. Las más importantes son:

- **Eficiencia superior:** los concentradores son la única opción para conseguir eficiencias de sistemas superiores al 20%. Esto reduce la ocupación del suelo y sus costes asociados.
- **Menor problemática de disponibilidad de materiales:** los concentradores utilizan materiales de construcción estándares para la mayoría de sus requisitos (espejos y otros reflectores).
- **Menor uso de productos tóxicos:** muchos conceptos de células de capa delgada utilizan bastantes productos tóxicos como cadmio, etc. A menor superficie de células, menor utilización de productos nocivos.
- **Facilidad de reciclaje:** la tendencia en la fabricación moderna de productos en masa es hacer un producto tan reciclable como sea posible. Los concentradores están compuestos principalmente de materiales fácilmente reciclables como acero, aluminio y plástico. Reciclar paneles planos resulta mucho más difícil.
- **Alto porcentaje de producción local:** Aparte de las células, el resto del sistema de concentración puede ser fabricado en cualquier parte del mundo, cerca del punto final de uso.

Por otro lado, está la limitación de temperatura a la eficiencia eléctrica del panel. Este efecto se ve aumentado a su vez por la concentración. Las células fotovoltaicas de los sistemas con concentración sólo transforman una parte (que depende de su eficiencia instantánea) de las altas densidades de flujo que inciden en las células. La mayor parte de la energía incidente no transformada en electricidad es absorbida por las células en forma de calor, produciendo un elevado aumento de temperatura. La eficiencia de cualquier célula fotovoltaica decrece (en mayor o menor proporción según el tipo de célula) con el aumento de su temperatura (figura 8).

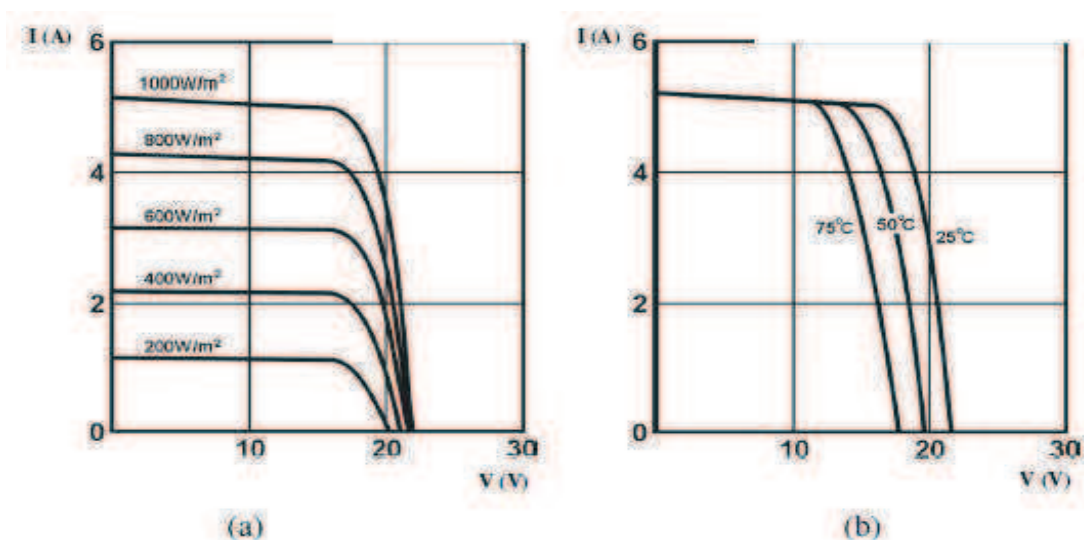


Figura 8. (a) Dependencia de la curva I-V con la irradiancia ($T=25^\circ\text{C}$) y (b) la temperatura (AM 1,5, 1kW/m^2).

Esta limitación se soluciona mediante la hibridación de fotovoltaica con térmica.

3. Trigeneración

En este capítulo, se hablará del objetivo principal de este trabajo. La utilización de los concentradores híbridos para generar energía. Gracias a sus características de aprovechamiento de la radiación directa concentrada y a la hibridación de fotovoltaica y térmica, se consiguen 3 sistemas de aprovechamiento. A saber, ACS y calefacción, refrigeración mediante una máquina de adsorción y generación de electricidad. El cálculo de ACS no se ha realizado como se explica en el capítulo 4.

3.1 Esquema básico

El esquema básico de la instalación (figura 9) lo componen:

1. **Panel híbrido PV/T con concentración.**
2. **Sistema de ACS y calefacción.**
3. **Máquina de adsorción y torre de refrigeración.**
4. **Caldera auxiliar de biomasa:** para cuando la radiación solar no permita cubrir todas las demandas.
5. **Circuito hidráulico:** consta de reguladores, válvulas, tubos aislantes,...

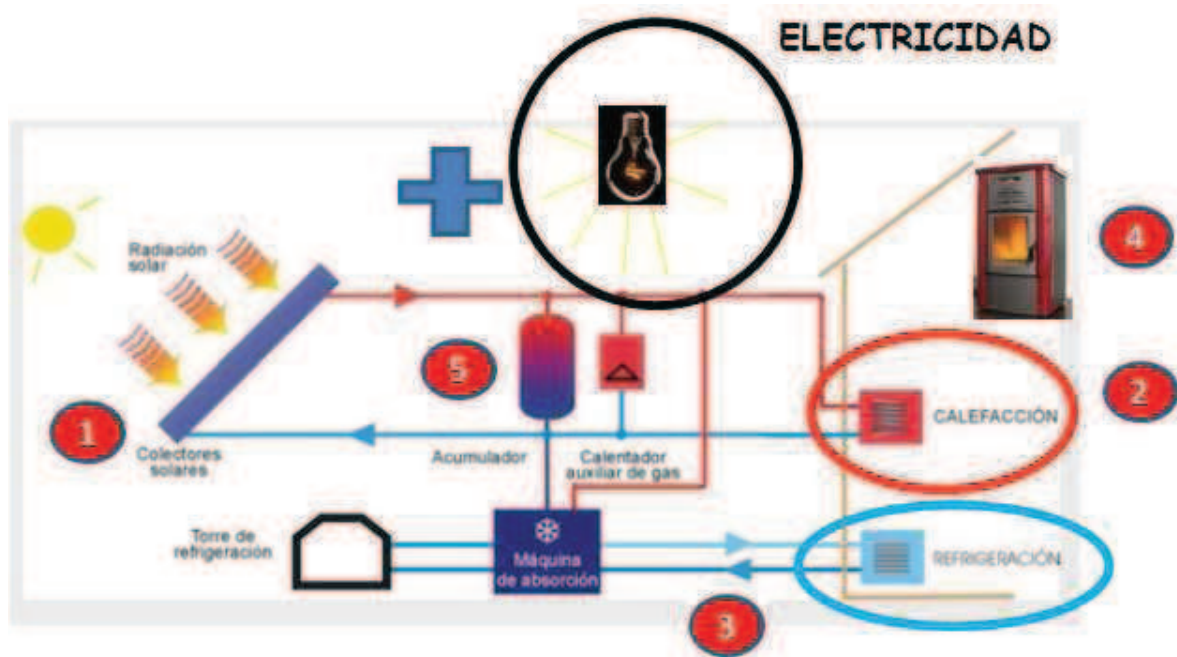


Figura 9. Esquema básico de la instalación.

En los próximos apartados, me centraré en tratar los 3 posibles tipos de generación (figura 9), dividiéndolos en 2, las cargas térmicas y las eléctricas, con especial tratamiento a las primeras, que son las que van a influir en la dimensión del panel híbrido. La producción eléctrica, como se verá posteriormente, vendrá dada por el tamaño de panel que las cargas térmicas determinen.

Además, apuntar que la caldera de biomasa se dimensionará para cubrir la máxima demanda de potencia de la vivienda, que serán en caso de calefacción, unos 4 kW (capítulo 4).

3.2 Cargas térmicas de enfriamiento y calefacción

La carga térmica es la energía térmica que debe transferirse en un edificio o espacio con el objeto de mantener unas condiciones de confort deseadas. Cuando la energía térmica se remueve del edificio, se habla de carga térmica de enfriamiento o **refrigeración**; y cuando la energía térmica se suministra al edificio se habla de carga térmica de calentamiento o **calefacción**. Una vez estimadas estas cargas se puede determinar el tipo y tamaño del equipo de calefacción y de enfriamiento requerido para satisfacer estas demandas.

Una estimación de cargas térmicas consiste en la determinación cuidadosa de todas las contribuciones en forma de energía térmica que intervienen en un edificio. Aunque el principio básico es simple (balance de energía utilizando la Primera Ley de la Termodinámica), pueden surgir serias complicaciones debido a los efectos transitorios como la acumulación de calor (también denominado efecto de almacenamiento térmico o inercia térmica) en la estructura del edificio.

Para estimar las cargas térmicas de un espacio, se requiere información detallada del diseño del edificio y de las condiciones climáticas. Por el lado del edificio, se deben conocer con el mayor detalle posible la ubicación del edificio, orientación, sombreado externo, materiales de construcción, tamaño y forma de los componentes, colores de las superficies externas, etc. que generalmente se obtienen de los planos y especificaciones. Se requiere también conocer los períodos de operación de la iluminación, nivel de ocupación, equipo interno instalado, electrodomésticos, etc., que contribuyen a la ganancia térmica interna. En cuanto a las condiciones climáticas, se requiere conocer condiciones exteriores e interiores de diseño, datos climatológicos como la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa y la velocidad del viento, al menos. En este proyecto se ha simplificado razonablemente el cálculo de estas cargas.

Antes de la realización de este proyecto se realizó una primera estimación, simplificando los cálculos de dimensionamiento, mediante la aplicación de las siguientes cargas, que serán también las que se apliquen en este proyecto, ya que serán los valores aproximados que tendrá la futura casa que se presente al concurso Solar Decathlon:

- **Calefacción: 40 W/ m².** Multiplicando por la superficie del edificio (75 m²) da un total de 3 kW.
- **Refrigeración: 20 W/ m².** En total, 1,5 kW de potencia.

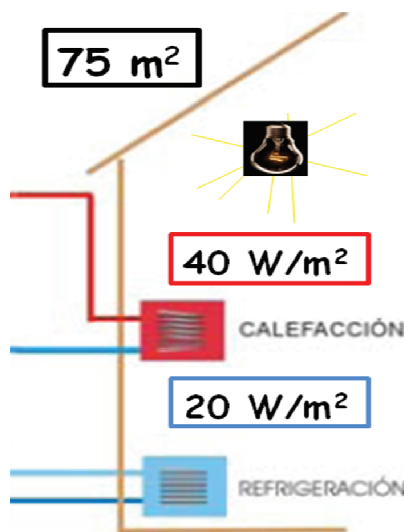


Figura 10. Esquema demandas estimadas para la vivienda unifamiliar.

La metodología y los resultados se presentan en el anexo A y sirven como comprobación de que las simulaciones realizadas con TRNSYS son correctas en magnitud.

Por otro lado, para el sistema de calefacción de la casa se ha pensado en utilizar un suelo radiante, y para la refrigeración, una máquina de adsorción con su torre de refrigeración.

3.2.1 Sistema de suelo radiante

La instalación de calefacción de una vivienda está formada por los elementos de producción de calor, los elementos de distribución de esa energía calorífica, el sistema de regulación de la instalación y los elementos que emiten el calor al ambiente.

La generación de calor se lleva a cabo mediante los captadores solares híbridos y la caldera auxiliar de biomasa, en caso de que no hubiera radiación suficiente, pero se han dimensionado teniendo en cuenta las necesidades energéticas de refrigeración, por lo que no se cubrirán totalmente las demandas de calefacción (capítulo 4).

El sistema elegido para calefactar las viviendas es la calefacción por suelo radiante, cuyo principio básico consiste en la impulsión de agua a media temperatura a través de tuberías situadas bajo el pavimento de las estancias a calefactar. Según el sistema tradicional de calefacción por suelo radiante las tuberías se embeben en una capa de mortero de cemento. Éste, situado sobre las tuberías y bajo el pavimento, absorbe la energía térmica disipada por las tuberías y la cede al pavimento que, a su vez, emite esta energía al local mediante radiación y en menor grado convección natural (figura 11) [20].

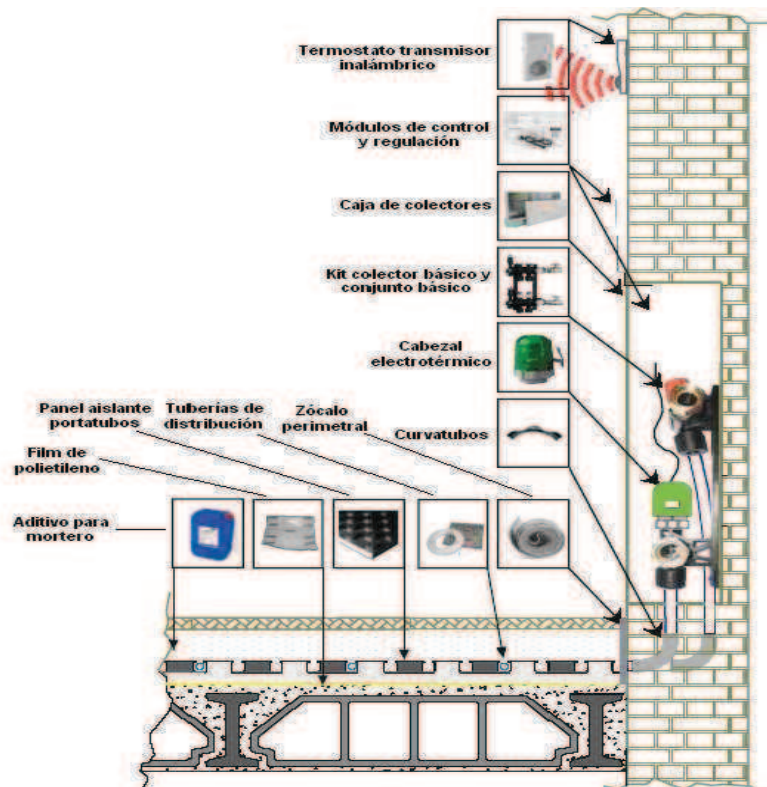


Figura 11. Dibujo representativo de un sistema de calefacción por suelo radiante tradicional.

Comparación con uso de radiadores

De entrada, parece una contradicción que pueda utilizarse la energía solar para calentar una casa en invierno, una época en que se supone que no hace sol, pero la verdad

es que en este país, con la excepción de alguna zona como las regiones del Cantábrico, es sólo durante 2 ó 3 semanas en todo el invierno en las que no hay suficiente sol aprovechable para este fin. La calefacción por suelo radiante (figura 12 izquierda) es el sistema que da mayor rendimiento en instalaciones de calefacción solar, ya que la temperatura del agua que circula por los tubos especiales de plástico empotrados en el suelo no tiene que pasar de los 35 °C. Esto significa que los captadores solares sólo tienen que elevar la temperatura entre unos 10 o 15 grados como máximo, lo cual aumenta considerablemente el rendimiento global del sistema, ya que cuanto menor sea la diferencia entre la temperatura de entrada a los paneles y la de salida, mayor será la captación de radiación solar, que puede llegar a un 80% (750 W/m²), según la calidad del captador y la temperatura de trabajo.

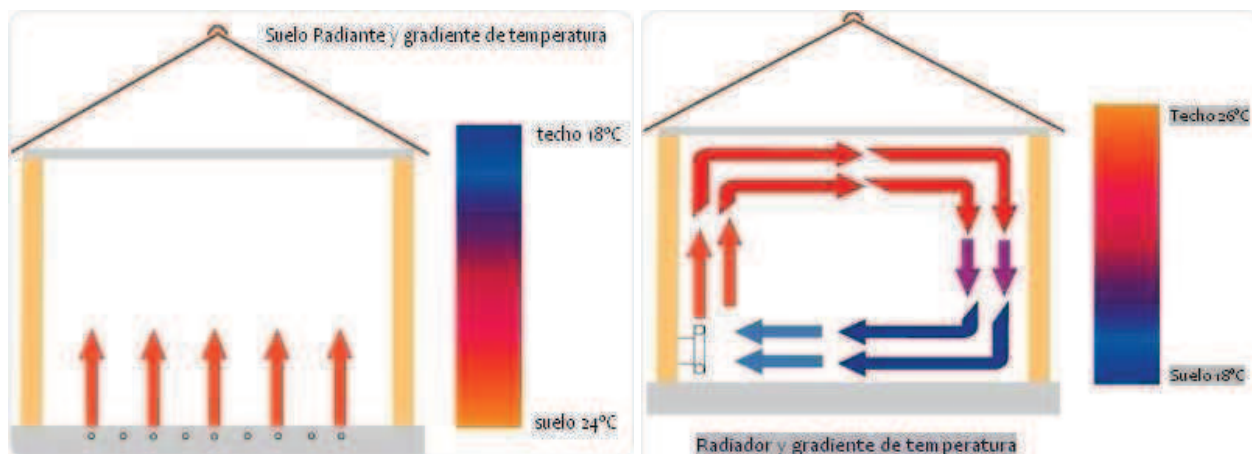


Figura 12. Comparativa de flujos de calor entre calefacción mediante suelo radiante y radiador.

Los radiadores tradicionales tienen un rendimiento bastante bajo en instalaciones solares por su elevada temperatura de trabajo: de 55 a 80 grados. Esta desventaja puede paliarse hasta cierto punto con radiadores sobredimensionados, pero aún así la eficacia del sistema puede ser pobre, siendo difícil sacar rendimientos por encima del 35% de ahorro de combustible.

También estos sistemas son de mucha utilidad en casas de segunda residencia que se utilizan poco en invierno, ya que, al no tener la calefacción encendida, padecen los efectos de humedades y falta de ventilación. Incluso una instalación sencilla de calefacción solar puede evitar problemas de este tipo y funciona de manera totalmente autónoma, además de proporcionar agua caliente durante todo el verano.

3.2.2 Máquina de adsorción

En los últimos años se ha producido un crecimiento evidente de las necesidades de refrigeración en los edificios, tanto por una mayor exigencia de las condiciones de confort como por un aumento de las cargas térmicas. Habitualmente la demanda de refrigeración es cubierta por electricidad, hecho que provoca puntas de consumo considerables en las redes de distribución eléctricas durante los meses de verano.

No obstante, existen tecnologías para refrigerar accionadas por fuentes térmicas, como la energía solar. Cuando se utiliza un sistema de refrigeración solar, además de las ventajas propias del uso de una fuente de energía renovable, cabe destacar la coincidencia entre la máxima demanda y la máxima producción (máxima radiación solar). Este tipo de sistema es adecuado para edificios del sector terciario, con demanda intensiva de refrigeración y de calefacción (hoteles, centros comerciales u oficinas). En toda Europa está reapareciendo la tendencia a aplicar sistemas de refrigeración accionados mediante

energía solar térmica debido a diferentes motivos, entre los que destaca la búsqueda de refrigerantes alternativos a los CFC o HCFC y la existencia de un mercado consolidado de energía solar térmica.

Las tecnologías de refrigeración que se pueden acoplar a un sistema solar son las máquinas enfriadoras térmicas, tanto las de absorción como las de adsorción, y los procesos de desecación y enfriamiento evaporativo. En este apartado se hablará de enfriamiento por adsorción, ya que por tamaño (poca potencia) y aplicación de este trabajo (baja temperatura), es el sistema que más se adecúa a las características del mismo.

La tecnología de enfriamiento por adsorción es prácticamente nueva, ambientalmente amigable y proporciona un medio adecuado de uso de los recursos térmicos de baja temperatura. Un sistema de refrigeración por adsorción es similar a los sistemas de compresión de vapor con la diferencia de que la energía térmica (en lugar de la mecánica) es la que se usa para el proceso de compresión (figura 13).



Figura 13. Máquina de adsorción.

Principio de operación.

En los sistemas de adsorción el refrigerante se disuelve en un líquido adsorbente, siendo posible utilizar sustancias sólidas. La interacción entre la fase líquida con una sólida se le conoce como proceso de adsorción. Los ejemplos típicos de pares de trabajo son agua y gel de sílice, agua y zeolita y amoníaco-carbón activado. En las máquinas de adsorción el sólido adsorbente tiene que ser calentado y enfriado alternativamente para que sea posible el fenómeno de adsorción y desorción. Los enfriadores por adsorción tienen un COP en un rango de 0,4 a 0,6 (0,6 es el valor de la máquina utilizada en este proyecto) y pueden operar con una temperatura de activación en un rango de 60 a 90 °C (75 °C en este trabajo). La principal ventaja de las tecnologías de adsorción está en el requerimiento de menor temperatura de activación que los hace más adecuados para acoplarlos a fuentes de calor residual de más baja temperatura.

La máquina de adsorción trabaja con agua como refrigerante y silica-gel como adsorbente. Este equipo está constituido por cuatro elementos: 1 evaporador, 2 cámaras adsorbentes y 1 condensador. En el evaporador, el agua a baja presión se evapora, enfriando agua, en el caso de este proyecto de 12,22 °C a 10.04 °C (enfriando el edificio a simular), o a las temperaturas que se requieran, pudiendo ser ésta de hasta 5 °C [21]. La evaporación de agua producida, se adsorbe en una de las cámaras de adsorción mediante el deshidratante (silica gel), el cual se va saturando. Mientras, en la otra cámara de

adsorción, el agua caliente pasa a través del intercambiador de calor, regenerando el deshidratante que con anterioridad había adsorbido el vapor de agua.

El agua evaporada al regenerar el deshidratante es condensada mediante el agua de refrigeración en el condensador para ser devuelta de nuevo al evaporador. El agua de refrigeración del equipo pasa por el intercambiador de la cámara de adsorción, absorbiendo la potencia cedida por la condensación del vapor de agua y después pasa a través del condensador. Mediante una torre de refrigeración se enfría hasta la temperatura necesaria para poder ser introducida de nuevo en el equipo (figura 14).

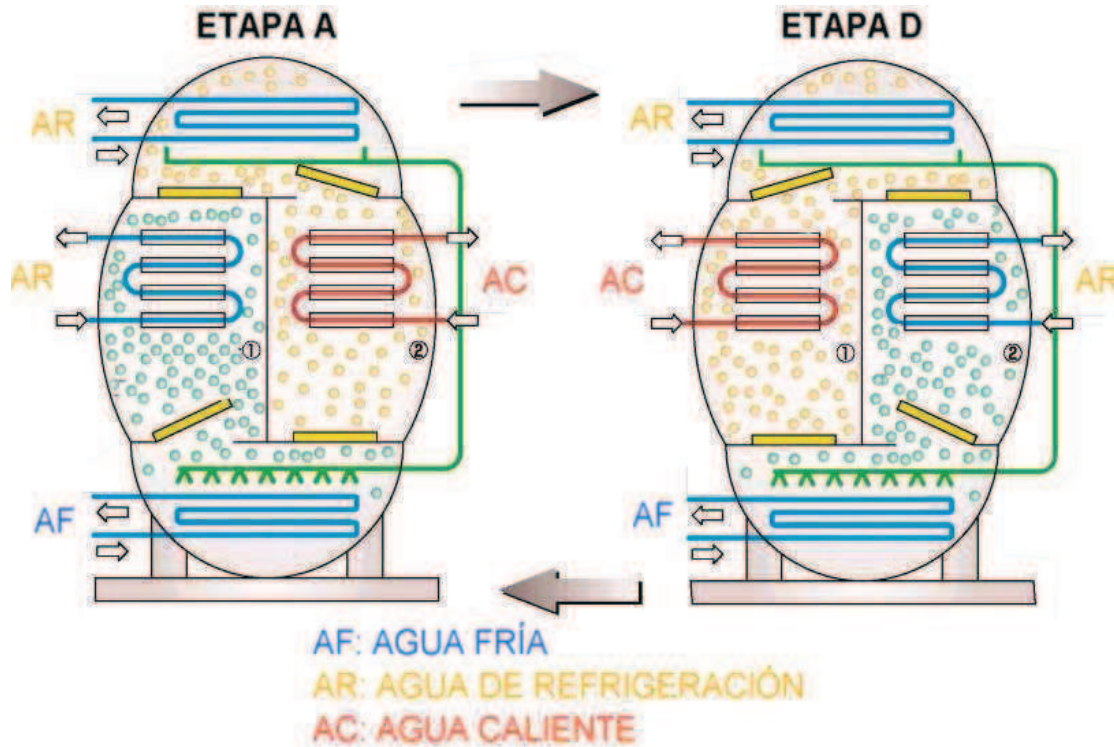


Figura 14. Funcionamiento de una máquina de adsorción (A: Adsorción; D: Desorción) [22].

Ya que no existen partes móviles en el sistema, excepto las válvulas, el sistema de adsorción es simple, no requiere de lubricación y por tanto, el mantenimiento es reducido. Otras ventajas incluyen una operación silenciosa y modularidad, de tal forma que es fácilmente escalable para aumentar la capacidad de enfriamiento mediante la incorporación de lechos adicionales. Puede usarse, además, calor residual de proceso o de sistemas motriz primario, así como el proveniente de energías renovables, como fuente de calor para activar el sistema.

Experimentos realizados con agua caliente para activar el enfriador, indican que la temperatura del agua caliente tiene un gran efecto sobre la capacidad de enfriamiento y el COP del enfriador. La temperatura de entrada del agua a enfriar afecta también la capacidad de enfriamiento y el COP. Siempre que sea posible, debe utilizarse una temperatura de activación lo más alta posible para asegurar un mayor rendimiento del enfriador (figura 15).

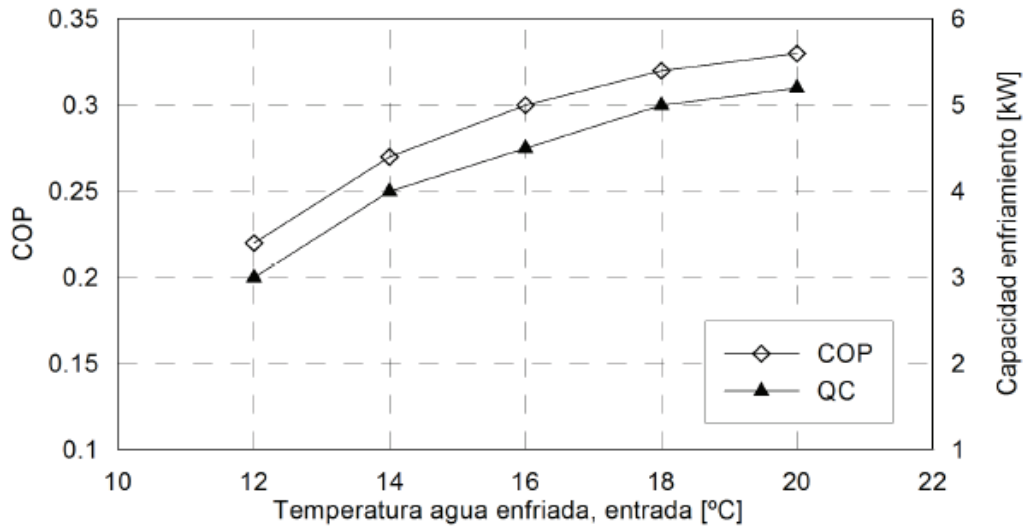


Figura 15. Variación del COP y la potencia como función de la temperatura de activación [23].

De acuerdo a Wu y Wang [21], existen enfriadores comercialmente disponibles con una capacidad de 10, 20, 50 y 100 kW con costes en US\$ de 10.000, 15.000, 30.000 y 50.000 respectivamente (en el año 2006).

3.3 Cargas eléctricas

En este apartado no se comentará las cargas eléctricas que podrían ser demandadas, porque no tendrá mucho interés para el dimensionamiento que se quiere hacer, ya que este se hace en función de las cargas térmicas, y una vez conocido el tamaño del colector se determinará la producción eléctrica que genera el panel híbrido. Además es lo que interesa en el concurso Solar Decathlon, lo que daría más puntos de cara a conseguir la mejor clasificación posible.

4. Metodología del proyecto

Para la realización del dimensionamiento de los paneles híbridos necesarios para la instalación en el edificio del Solar Decathlon, se ha usado como modelo a parametrizar el panel PV/T de la marca Absolicon X10, puesto que pertenece a la tecnología que se considera que tiene mejores resultados y porque presenta una amplia tabla de especificaciones técnicas con las que modelizar el panel en TRNSYS y poder compararlos con los que facilita la empresa fabricante. Este tipo de colector es la suma de muchos productos en uno sólo (figura 16).

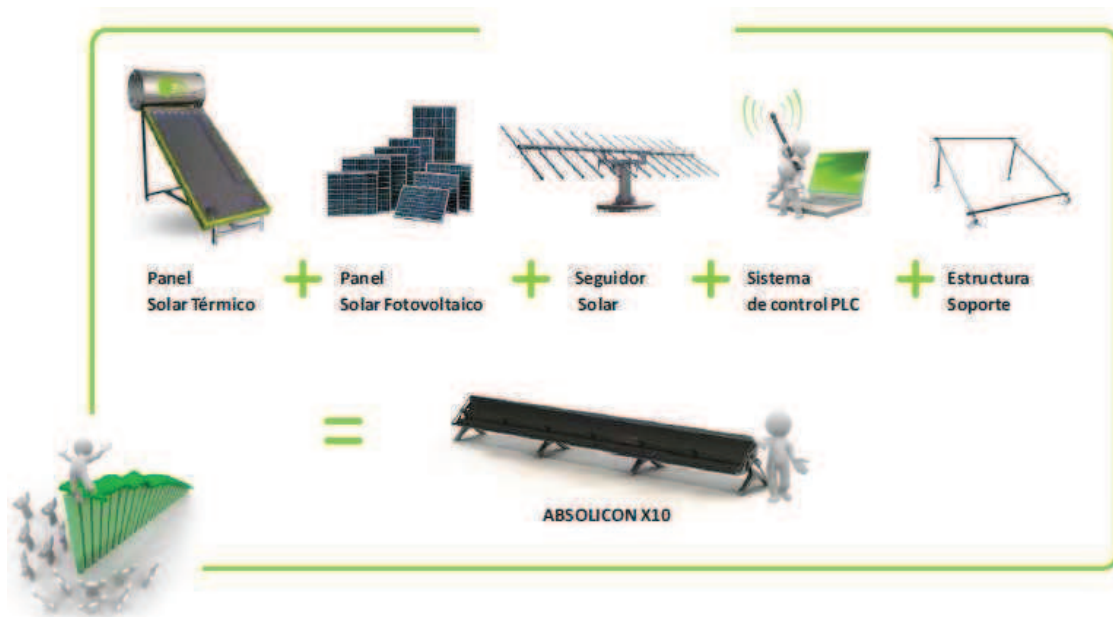


Figura 16. Compendio de tecnologías que comprende el panel híbrido Absolicon X10 [24].

4.1 Absolicon X10

Este tipo de panel es un concentrador solar cilindro-parabólico, el cual concentra la luz en un receptor ubicado en la línea focal del concentrador. El objetivo que se esconde tras la tecnología de concentración es el de producir grandes cantidades de energía a bajo coste, reduciendo el espacio y el equipamiento necesario, además de contribuir a reducir la emisión de gases contaminantes procedentes de los combustibles convencionales.

El coste es inferior comparado con el de una instalación solar fotovoltaica y solar térmica, lo que redunda en un aumento de la rentabilidad de la inversión. Además, el análisis de ciclo de vida indica que tiene un impacto ambiental cuatro veces mejor que los módulos fotovoltaicos comunes.

Este panel utiliza una doble tecnología solar (figura 17), que básicamente consiste en combinar un concentrador térmico y un concentrador fotovoltaico en uno solo, y de esta manera aumentar la producción energética un 40-50% con respecto a un panel fotovoltaico plano con un 10-20% de eficiencia. El resultado es evidente: se consigue optimizar el espacio disponible y la inversión económica necesaria.

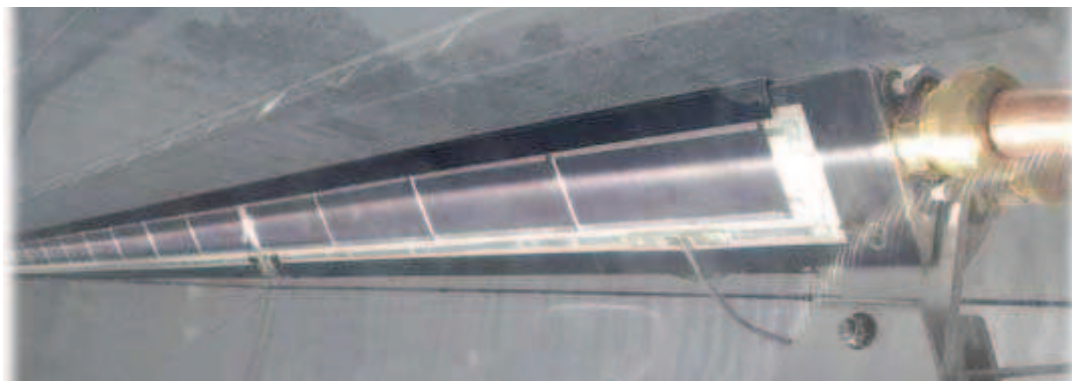


Figura 17. Receptor con doble tecnología solar: fotovoltaica y térmica [24].

4.1.1 Cómo funciona

En el funcionamiento normal, la producción de calor es cinco veces mayor que la producción eléctrica, siendo el rendimiento en producción eléctrica similar al de los paneles fotovoltaicos convencionales. Las células fotovoltaicas deben refrigerarse constantemente, por lo que conviene disponer siempre de algún foco de demanda térmica o de calor. Los rayos del sol inciden sobre el colector, el cual enfoca y por tanto concentra la luz del sol 10 veces sobre un elemento receptor ubicado en el centro del colector (figura 17 y 18).

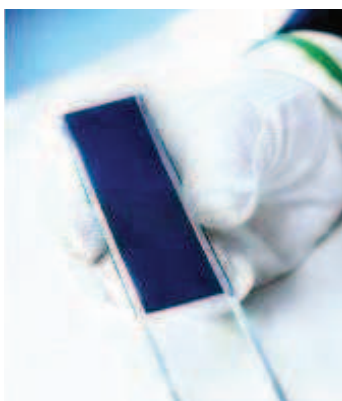


Figura 18. Célula fotovoltaica receptora del panel híbrido [24].

En la superficie del receptor se encuentran unas células fotovoltaicas especialmente diseñadas para soportar altos niveles de concentración, de hecho, son capaces de soportar el doble de concentración que los 10x a los que se le somete. Este panel tiene un sistema integrado para el seguimiento del sol, que permite enfocar siempre la luz en las células fotovoltaicas. El sistema está compuesto por una central reguladora que calcula la posición del sol y actuadores lineales eléctricos que giran el panel hacia el sol. Además se pone automáticamente en posición de seguridad horizontal cuando hay riesgo de sobrecalentamiento, sobrepresión, cortes eléctricos, tormentas o fuertes vientos. La central reguladora también puede controlar el suministro de calor desde los colectores solares al depósito acumulador y controlar automáticamente las bombas de circulación mediante sensores de temperatura situados en el panel y en el depósito acumulador.

Una de las **limitaciones** de los sistemas clásicos de energía solar, es la necesidad que tienen de provocar un efecto invernadero en su interior para así lograr alcanzar cierta temperatura adecuada de trabajo. Dicho efecto invernadero se traduce en una inercia térmica, es decir, un tiempo necesario en alcanzar la condición óptima de trabajo. Los paneles híbridos con concentración gracias precisamente a su poder de concentración (10 soles en su interior, para el caso estudiado) no requiere de tiempo de preparación: su

producción de energía es instantánea. Sin embargo, la inercia térmica no sólo tiene un efecto sobre el “arranque” del sistema, sino también sobre su funcionamiento; todos los cambios de los paneles clásicos están sometidos al tiempo y no son susceptibles de gestión durante el proceso de trabajo. Así pues, se consigue “dar” y “quitar” de manera instantánea, lo cual se traduce en una capacidad de gestión y control de energía, luego no requiere de preparaciones o acondicionamientos.

4.1.2 Modelo y características técnicas

A continuación se muestra el modelo de Absolicon de 6 m que presumiblemente se va a utilizar en el futuro concurso Solar Decathlon (figura 19), y sus especificaciones técnicas (figura 20), además de las del modelo de 10 m. Estas últimas son las que se han utilizado para modelar correctamente el panel en TRNSYS (en rojo el rendimiento y coeficiente térmico de pérdidas), como se explicará en el siguiente apartado.

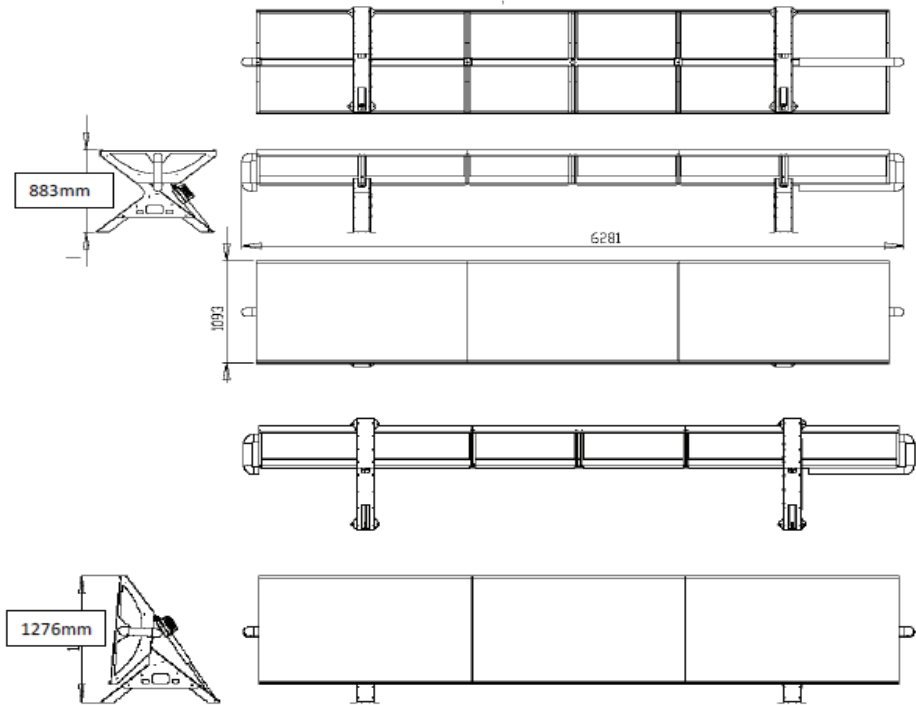


Figura 19. Croquis y dimensiones del modelo de 6 m del Absolicon X10 [24].

ABSOLICON X10		Designación de modelo	6 m	10 m
Orientación	anchura	Longitud de artesa, medida exterior (m)	6	10
Seguimiento	Eje Este – Oeste	Anchura de artesa, medida exterior (m)	1,1	1,1
	Cálculo astronómico	Peso (Kg)	195	315
		Número de apoyos (unidad)	2	3
Factor de Pérdidas (valor U)	0,5 W/m2.K; 0,005 W/m2.K2	Calor Solar		
Rendimiento Óptico directo (valor n0dir)	70%	Producción térmica anual Madrid (kWh, 50°C)	4017	6856
Rendimiento Óptico difuso (valor n0dif)	12%	Contenido de líquido, receptor (litros)	4,4	6,7
Dependencia angular (valor b0)	0,1	Caudal recomendado (litros / min.)	9	15
Pérdida de carga	40 Pa a 300 l/h	Superficie productora de calor (m2)	5,8	9,9
Rango de temperatura de trabajo	10°C – 80°C para el modelo DST	Electricidad Solar		
	10°C – 200°C para el modelo T	Superficie activa productora de electricidad (m2)	4,9	8,5
Potencia eléctrica a 25°C	100 Wp/m2 de superficie activa	Potencia eléctrica, Pmáx (Wp)	550	950
Factor de forma	FF = 70%	Corriente de cortocircuito, Isc (A)	13	13
		Tensión de circuito abierto, Voc (V)	51	91
Ratio Producción Eléctrica (Madrid)	120 kWh/m2.año (0,112 kWp/m2)	Corriente en punto de máxima potencia, Imp (A)	12,5	12,5
Ratio Producción Calor (50°C)	750 kWh/m2.año	Tensión en punto de máxima potencia, Vmp	40	72
		Coefficiente de temperatura de potencia, (%/°C)	-0,4	-0,4

Figura 20. Tabla de especificaciones técnica de los modelos de 6 y 10 m del Absolicon X10 [24].

Producción de electricidad solar:

El panel Absolicon X10 estudiado tiene células solares de sílice que generan corriente eléctrica continua. Las células solares están protegidas con diodos de derivación. La corriente de cortocircuito es de 13 A como máximo y la tensión en vacío varía según el modelo. El modelo de 6 m genera 51 Vcc, mientras que el de 18 m genera 172 Vcc (figura 21). El rendimiento de las células fotovoltaicas es del 17 %. Estos son los datos que se utilizarán en las simulaciones de TRNSYS.

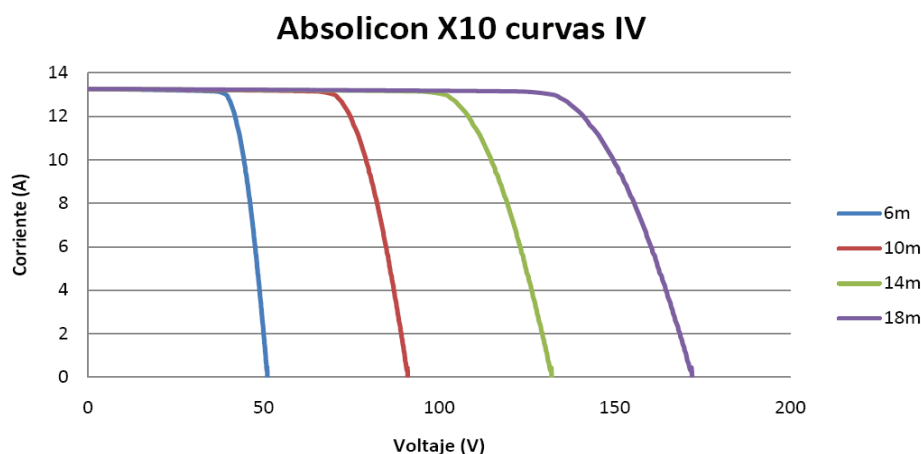


Figura 21. Curva de potencia eléctrica de los diferentes modelos del Absolicon X10 [24].

4.1.3 Aplicaciones

Esta tecnología puede ser empleada en todas aquellas aplicaciones en las que se requiera generar ACS, calefacción, refrigeración y/o electricidad, pudiendo ser usuarios potenciales: hoteles, hospitales, comunidades de vecinos, polideportivos, industrias, viviendas unifamiliares, supermercados, aeropuertos, colegios, restaurantes, lavaderos de coches, campings, centros militares [25],... En el anexo B se muestran diseños básicos de instalaciones para las aplicaciones más importantes.

4.2 Metodología del trabajo

El objetivo es realizar una instalación con paneles híbridos que cubra en gran parte la demanda energética necesaria para producir agua caliente sanitaria, calefacción y refrigeración, así como la venta de la energía eléctrica producida a la red, con el fin de ahorrar en combustibles tradicionales y en emisiones de CO₂.

La instalación está pensada para realizarse en un proyecto de vivienda en la localidad de Madrid, realizado por el Grupo de Energía y Edificación (GEE) de la Universidad de Zaragoza y que participaría en un concurso de viviendas bioclimáticas llamado Solar Decathlon. Dicho concurso califica según diferentes criterios de evaluación, teniendo en cuenta que el evento se realiza en verano. Esta es la principal razón por la que este proyecto será diseñado para cubrir toda o casi toda la demanda energética de refrigeración. Para ello se ha determinado el área de colector necesaria mediante el software TRNSYS, que más adelante será descrito. Además, la hibridación con fotovoltaica permitirá obtener mayor puntuación, puesto que la generación eléctrica es otro modo de obtener una mayor puntuación para la casa y por tanto conseguir una mejor clasificación.

Este apartado se ha dividido en 2 subapartados principales donde se calculan:

- **Demanda energética de la vivienda** comentada en el apartado 3.2 (figura 10). Habría que diferenciar tres cálculos energéticos, el de calefacción, que tendrá mayor importancia en los meses de invierno, el de refrigeración que será requerido para los meses de verano y el ACS que será necesaria a lo largo de todo el año. El cálculo de ACS no ha sido realizado en este proyecto, pero bastaría con modificar la regulación de la instalación, de tal manera, que diera prioridad al suministro de agua caliente sanitaria a la temperatura deseada (normalmente entre 45 y 60 °C) ,
- **Producción energética del panel:** es decir, la cantidad de kWh que produce el panel, según la superficie de colector utilizada. Además se calculará la energía auxiliar necesaria a lo largo del año, ya que habrá momentos en los que la energía solar no sea capaz de satisfacer los requerimientos energéticos del edificio, y la fracción solar anual. Estos resultados serán presentados en el siguiente capítulo.

4.2.1 Cálculo demanda energética de la vivienda unifamiliar

Generalmente el sistema se diseña considerando las condiciones máximas o carga punta, escogiendo las condiciones climáticas más severas y agregándole un margen de seguridad. Esta selección de la capacidad de los equipos generalmente conduce a una capacidad por arriba de la requerida, provocando costes de inversión y operación muy altos, pero asegura el cubrimiento casi total de la instalación en materia energética. Además, hay que tener en cuenta que durante la mayor parte del tiempo el equipo funcionará a carga parcial disminuyendo su eficiencia energética con el consecuente desperdicio de recursos. En la actualidad, es necesario establecer un compromiso entre el costo del equipo y el riesgo de una ligera disminución del confort cuando ocurra un extremo climático, que según las condiciones actuales se espera que se den con mayor frecuencia debido al calentamiento global [26].

Antes de diferenciar los dos cálculos comentados antes, calefacción y refrigeración, se comentarán unos parámetros comunes de los dos sistemas y una exposición de los diferentes métodos de estimación de cargas.

a) Condiciones interiores.

El ambiente interior de un espacio es afectado por factores capaces de influir instantáneamente o en el transcurso del tiempo sobre las personas o sus actividades. En este sentido, la noción de bienestar o confort es algo totalmente subjetiva y variable en cada persona. No obstante, puede decirse que un espacio posee condiciones confortables cuando la mayoría de sus ocupantes experimentan una sensación de confort. Las condiciones de temperatura interior suelen estar en el rango de 26 a 21 °C en verano y de 17 a 22 °C en invierno. Para los cálculos de este trabajo se ha considerado 25 °C como temperatura de confort interior para el mes de verano tipo y 18 °C para el de invierno.

b) Condiciones exteriores.

En cuanto a las condiciones exteriores, se determinan normalmente atendiendo a un análisis estadístico de las condiciones exteriores obtenidas durante un cierto número de años. La recopilación de la información climatológica puede hacerse por el uso directo de mediciones en estaciones meteorológicas o, en su defecto cuando no se dispone del acceso a esta información, por medio del uso de ecuaciones o algoritmos.

Cuando no se dispone de la información de estaciones meteorológicas, los datos de temperatura pueden reproducirse por medio del uso de modelos o ecuaciones que

utilizan datos promedio mensuales o semanales. Los modelos que se han encontrado en la literatura son el de Erbs, Klein y Beckmann, de Gelezenis, y el modelo del E.S.R.A (European Solar Radiation Atlas) [27-30].

Lo que se ha hecho en este proyecto es usar la base de datos Meteonorm, que utiliza TRNSYS para obtener los datos ambientales pertinentes como los datos horarios de temperatura exterior para el caso de Madrid, donde se supone se localizaría la vivienda, además de los datos de radiación y posición del Sol.

Métodos simplificados de estimación de cargas térmicas.

En la industria, los consumos energéticos de los procesos son generalmente constantes y como consecuencia son muy simples de estimar a partir de las condiciones normales de operación. Por el contrario, esto no sucede en los proyectos de calefacción y enfriamiento en edificaciones donde los consumos energéticos varían durante el año de manera considerable.

Existen varios métodos para estimar los requerimientos energéticos de calefacción y enfriamiento. Con los métodos más detallados se puede simular el comportamiento dinámico de las cargas térmicas pero se requieren datos ganancias de calor internas, inercia térmica y geometría detallada del edificio, ganancias solares, etc., además de datos del climáticos de al menos un año, lo cual pocas veces se dispone. Por ello, se han desarrollado métodos más simples de estimación de cargas térmicas.

Los métodos simples utilizan modelos en estado estacionario, y requieren pocos datos para proporcionar resultados adecuados y suficientes para estudios de viabilidad o generales. Para situaciones donde la eficiencia o las condiciones de utilización varían con la temperatura exterior, se puede calcular el consumo para diferentes valores de la temperatura exterior, multiplicando éste por el correspondiente número de horas. Esta forma de cálculo se conoce como *método bin* [31, 32], que es el que se utilizó para el cálculo de la demanda energética de calefacción en el trabajo previo que se presenta en el anexo A.

La limitación de estos métodos es que si la temperatura interior varía, los métodos no aportan una información realista. En la mayoría de soluciones para los casos prácticos, se han desarrollado varios factores de corrección para permitir un tratamiento aproximado de algunos efectos dinámicos.

Métodos detallados de estimación de la carga térmica.

La estimación de la carga térmica con modelos detallados consiste en evaluar cada uno de los términos que intervienen sin incluir ninguna simplificación. El planteamiento del problema resulta en un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que deben ser resueltas simultáneamente, lo que requiere mucho tiempo, trabajo y recursos computacionales. Lo cual es adecuado para trabajo de investigación o cuando se requiere conocer con alta precisión la evolución de las cargas térmicas a lo largo del año.

Los métodos detallados requieren de la elaboración de rutinas y algoritmos implementados en lenguajes de programación, dando como resultado una serie de paquetes computacionales. A continuación se puede ver una lista del software disponible para determinar las cargas térmicas en edificios a través de simulación, entre los más utilizados se encuentran:

- DOE2 (eQuest).
- DesignBuilder.

- ECOTEC.
- ESP-r.
- **TRNSYS:** es el que se ha utilizado para la realización de este Trabajo Fin de Máster
- EnergyPlus.

La elección de uno u otro depende del tipo de análisis requerido, además de los recursos económicos disponibles para esta tarea.

c) Potencias demandadas y flujos másicos equivalentes

Una vez conocidas las temperaturas interior y exterior se puede pasar a calcular las energías demandadas, tanto de calefacción como de refrigeración. Estos valores han sido calculados con el software TRNSYS, que se presenta en el siguiente apartado. La fórmula con la que se calcula es la siguiente;

$$\dot{Q}_i = U \cdot A \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \quad \dot{Q}_t = \frac{\sum_{i=1}^{8760} \dot{Q}_i}{1000} \quad (1)$$

Donde:

- **Q_i:** demanda energética horaria en Wh.
- **U:** es el factor de pérdidas térmicas. Que se obtiene de dividir, la estimación considerada de 40 W/m² (apartado 3.2) entre el ΔT (diferencia entre la T^a de confort en invierno en el interior de la casa, 18 °C, y 0 °C). Es decir, 2,2 W/ m² °C. Como se ha considerado para verano 20 W/m² y un valor de ΔT de 10 °C (diferencia entre una T^a exterior máxima, aunque puede ser mayor, de 35 °C y la T^a de confort en verano en el interior de la casa elegida antes, 25 °C), el valor de U es similar al de invierno, 2 W/ m² °C.
- **A:** superficie estimada a calefactar o refrigerar que tendrá la vivienda que se presentará al concurso Solar Decathlon. Como el proyecto está aún en fase de desarrollo no se conoce la superficie final. Así pues, en estas simulaciones se ha utilizado como superficie 75 m², ya que se prevé que no supere dicho valor.
- **T_{int} y T_{ext}:** las temperaturas interior y exterior respectivamente y que han sido comentadas en este mismo apartado.
- **Q_t:** demanda energética total anual en kWh.

A partir de estas energías demandadas se pueden calcular los flujos másicos de fluido que debe circular por cada sistema de la instalación. Si bien la calefacción ha sido calculada con un simple circuito, la refrigeración por adsorción cuenta con tres circuitos distintos, por lo que cobra más importancia el cálculo de estos flujos. Sus valores se presentan en el siguiente apartado.

La fórmula para calcular los flujos másico en kg/h es:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_t \cdot 1000}{C_p \cdot \Delta T} \quad (2)$$

Donde:

- **Q_t**: demanda energética total anual en kWh.
- **C_p**: su valor para el agua es 1,164 Wh/kg °K.
- **ΔT**: es la diferencia de temperaturas entre la salida y la entrada del sistema cuyo flujo másico se este calculando.

A continuación se presentarán las gráficas obtenidas de energía demandada de calefacción y refrigeración (figura 26), pero antes hay que aclarar dos conceptos. Primero, que el uso de los equipos suele ser estacionario, principalmente el de calefacción, porque aunque en verano tengas temperaturas inferiores a 18 °C (temperatura por debajo de la cual habría que poner la calefacción), fácilmente alcanzable por la noche, nunca se pone la calefacción. Por tanto se ha propuesto un calendario de funcionamiento de los equipos. La máquina de adsorción refrigerará, cuando sea necesario entre el 15 de junio y el 15 de septiembre, mientras que la calefacción de suelo radiante será conectada entre el 15 de octubre y el 31 de marzo. En segundo lugar, adelantar, aunque luego se explicarán los flujos y potencias de la máquina de adsorción, que la energía frigorífica a suministrar por la máquina de adsorción que se grafica (figura 26) es la demandada por la vivienda dividida entre el COP de dicha máquina, en este caso, 0,6.

Dicho esto se presentan las graficas de las demandas de calefacción y refrigeración a lo largo del año junto a la temperatura ambiente de la que dependen las dos variables anteriores (figura 22). En ella se observa la estacionalidad impuesta para cada equipo y la dependencia de las dos variables energéticas respecto a la temperatura ambiente.

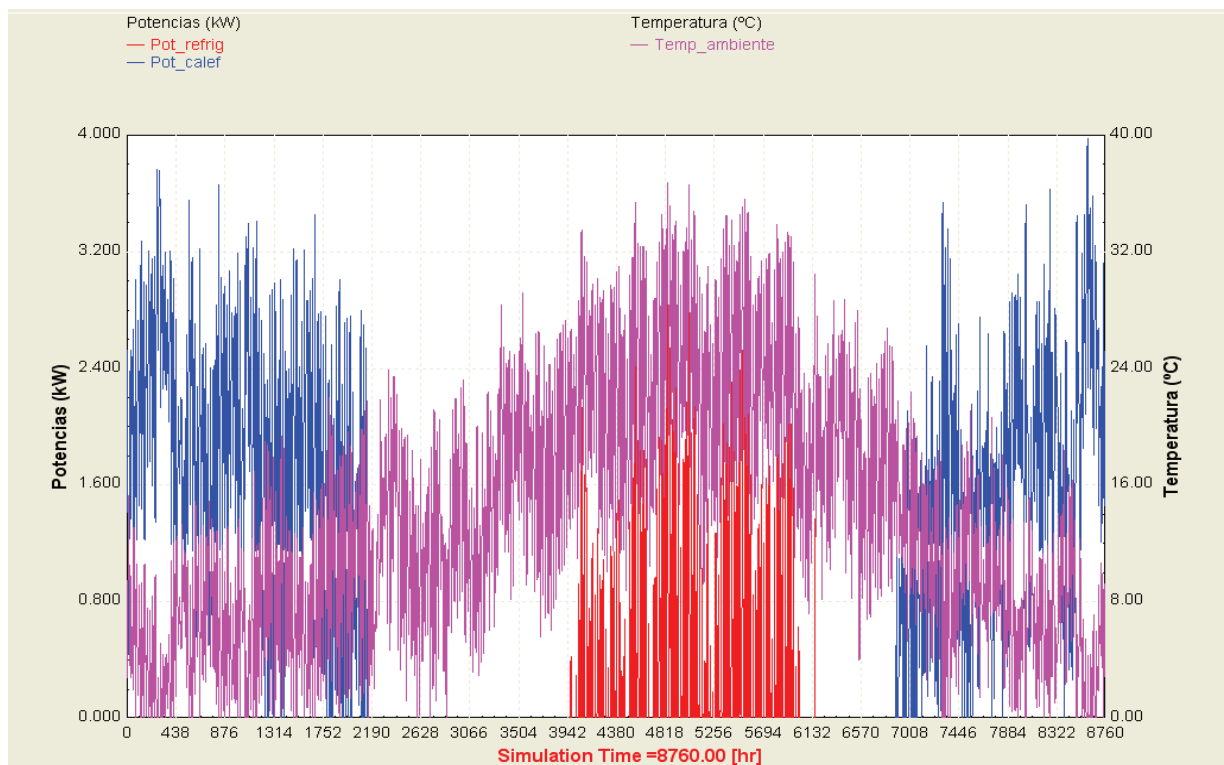


Figura 22. Simulación en TRNSYS de la potencia de refrigeración y calefacción a cubrir por el equipo solar a lo largo del año y la temperatura ambiente anual.

d) Calor auxiliar y fracción solar

Una vez sabido lo que la vivienda requiere, se calcula lo que la instalación solar puede aportar. Pero dependiendo del tamaño del colector, además de otros parámetros menos influyentes, se cubrirá más o menos demanda. Cuando no sea suficiente con la aportación del colector será necesario un aporte exterior, es decir, una energía auxiliar. En este caso por seguir utilizando tecnología renovable, se ha propuesto una caldera de biomasa para este aporte. Su tamaño se dimensiona para cubrir la máxima demanda de calefacción o refrigeración, para casos en los que no hubiera radiación directa. Será el sistema que apoyará al panel híbrido cuando la radiación no sea la adecuada. A la vista de la figura 22, bastará con 4 kW de potencia instalada, aunque sería mejor un poco más teniendo en cuenta el rendimiento de dicha caldera.

Respecto a la fracción solar, se refiere al porcentaje de energía demandada que cubre la instalación solar. A continuación se presentan las fórmulas de los dos parámetros:

$$\dot{Q}_{aux} = \dot{Q}_{dem} - \dot{Q}_{sol} \qquad FS = \frac{\dot{Q}_{sol}}{\dot{Q}_{dem}} \cdot 100 \quad (\%) \qquad (3)$$

Donde:

- **Q_{aux}**: energía auxiliar necesaria a aportar por la caldera de biomasa.
- **FS**: fracción de demanda que cubre la instalación solar en porcentaje.
- **Q_{dem}**: energía demandada por la vivienda tanto de calefacción como de refrigeración.
- **Q_{sol}**: energía aportada por el colector solar.

Estas dos variables son las que se han utilizado principalmente en los resultados para determinar que valores son los mejores para aumentar la fracción solar o disminuir el calor auxiliar a aportar, es decir, optimizar energéticamente la instalación

4.3 TRNSYS

El objetivo de este proyecto es mostrar el comportamiento del sistema diseñado, simulando su funcionamiento en condiciones climatológicas representativas de un año meteorológico típico. De esta forma se permiten presentar resultados de la producción de energía eléctrica y térmica contrastables y comparables con otros sistemas de producción térmica y eléctrica existentes.

Para realizar la simulación se utiliza el software comercial TRNSYS 16. Es un programa que desarrolla modelos transitorios con una estructura modular. Reconoce un lenguaje de descripción en el que el usuario especifica los componentes que constituyen el sistema y la manera en la que están interconectados. Es software comercial desarrollado por la universidad de Wisconsin. Como con cualquier simulación, los datos obtenidos son contrastados con los calculados en ámbito teórico. En el anexo C se describe más detalladamente las características de este programa.

El paquete informático incorpora una librería con archivos que contienen los datos climáticos generados por Meteonorm, (programa que incorpora un catálogo de

datos meteorológicos y procedimientos de cálculo para aplicaciones solares y diseño de sistemas para un gran número de localidades mundiales), para diferentes localizaciones geográficas de Europa (Type 109-TMY2, donde TMY son las siglas de Typical Meteorological Year o Año Meteorológico Típico).

El Año Meteorológico Típico (AMT) recoge los distintos valores horarios de irradiación global horizontal y temperatura ambiente obtenidos a lo largo de un año hipotético constituido por una sucesión de doce meses pertenecientes a un conjunto de años reales. Estos doce meses se escogen de modo que el AMT represente con fiabilidad las características meteorológicas del lugar en cuestión. Los datos proporcionados por este año “artificial” permiten modelar el comportamiento de los sistemas solares de forma más precisa que usando los valores de un determinado año o valores medios mensuales.

Además para ser más precisos y evitar problemas en la regulación de la instalación se han realizado las simulaciones cada 15 minutos, de manera que se obtienen aún mejores resultados que horariamente.

4.3.1 Parámetros climáticos del emplazamiento

El perfil de temperatura ambiente del AMT en Madrid (Latitud = $40^{\circ}25'0''$, Longitud = $-3^{\circ}42'1''$), emplazamiento de la instalación, es el siguiente (figura 23):

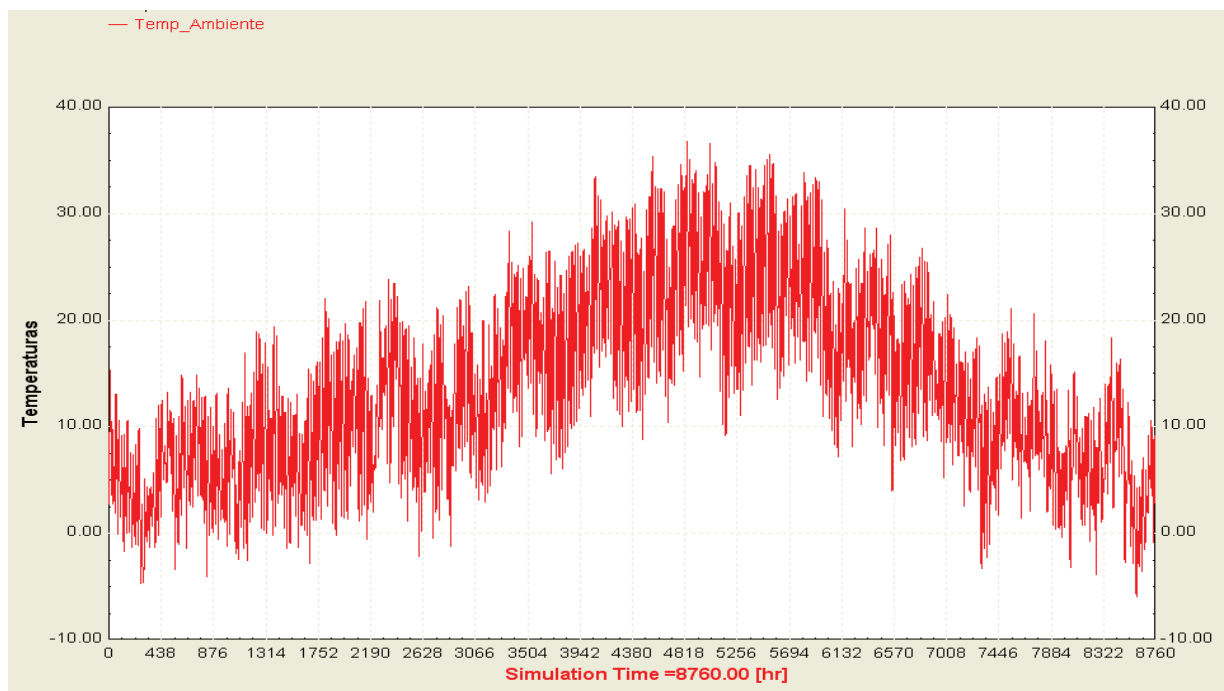


Figura 23. Perfil de temperaturas ambiente (AMT) de Madrid, simulado en TRNSYS.

Las condiciones radiativas en el área de Madrid son las siguientes (figuras 24 y 25):

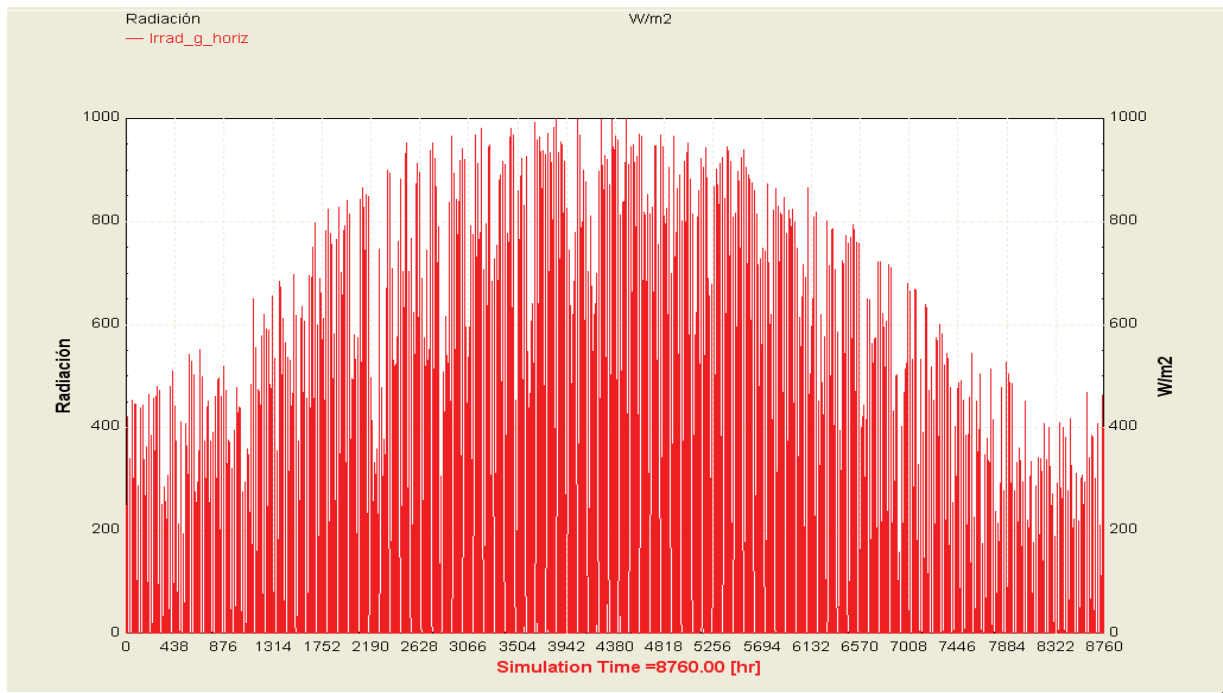


Figura 24. Irradiancia global sobre el plano horizontal.

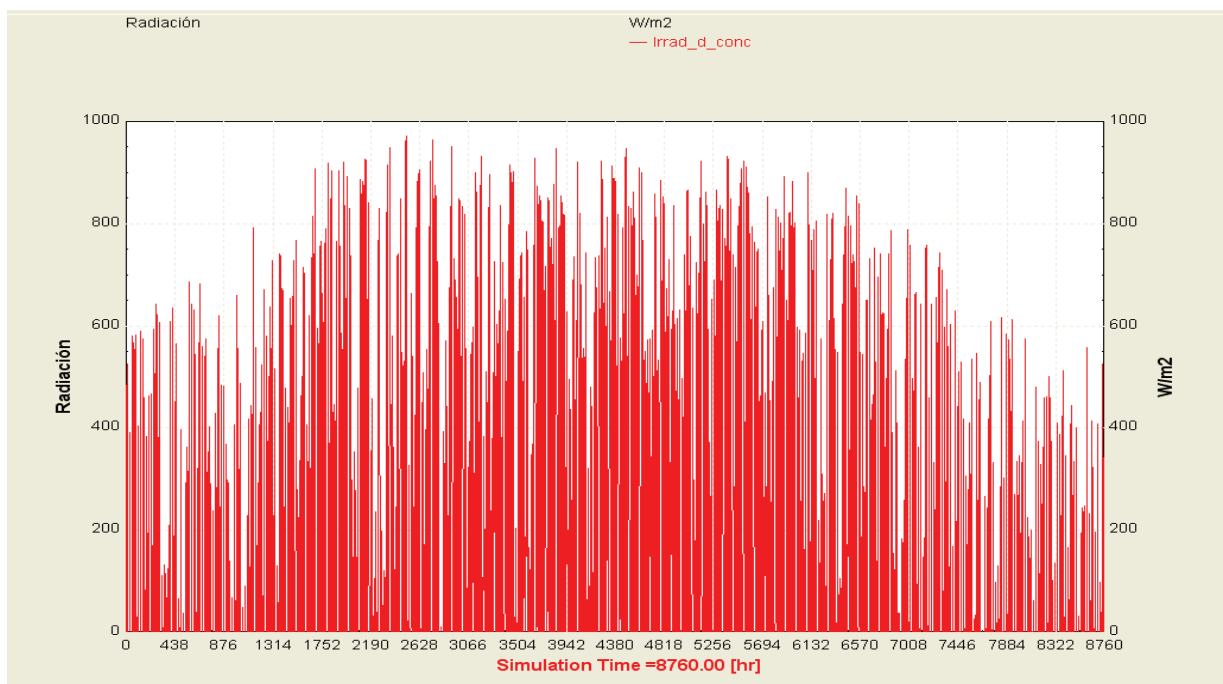


Figura 25. Irradiancia directa sobre el plano del concentrador.

Los valores de flujo de irradiancia (potencia) directa que se reciben sobre la superficie del concentrador (este tipo de sistemas sólo aprovecha esta magnitud), obtenidos con seguimiento a 1 eje Este-Oeste, tienen sus picos máximos prácticamente todo el año por encima de 650 W/m^2 , alcanzando en determinados momentos valores superiores a los 900 W/m^2 . Se observa como son cercanos a los valores globales de radiación sobre la horizontal en verano y mayores en invierno.

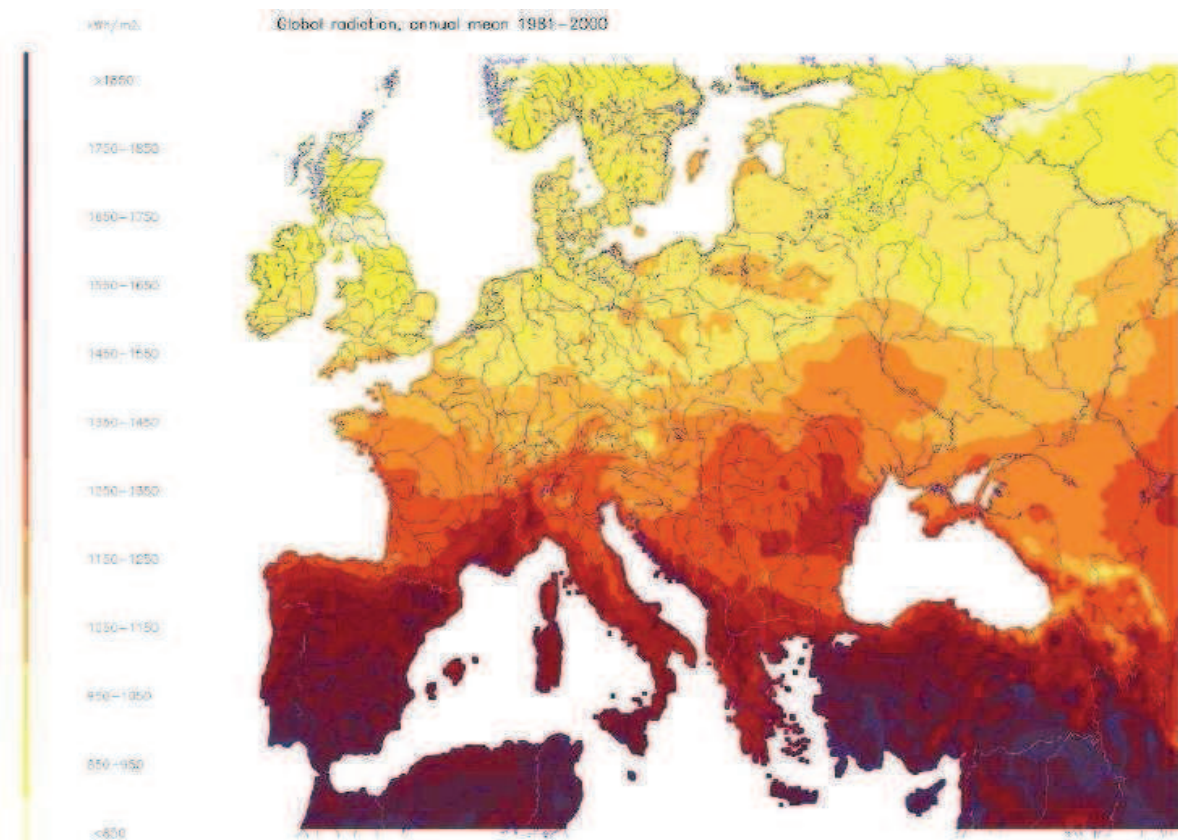


Figura 26. Mapa de radiación anual europeo [18].

Esta similitud se acentúa al obtener los valores de irradiación global sobre superficie horizontal y de irradiación directa (ahora se habla de términos de energía) sobre el concentrador anuales que son $1661,65 \text{ kWh/m}^2$ y $1612,38 \text{ kWh/m}^2$, respectivamente, lo que supone unos valores medios diarios de $4,55 \text{ kWh/m}^2$ y $4,42 \text{ kWh/m}^2$.

Para tener referencias comparativas y encuadrar estos valores dentro del marco europeo, se ha mostrado el mapa de la irradiación global sobre superficie horizontal en Europa realizado por Meteonorm (figura 26). Según el JRC (Join Research Centre) de la Comisión Europea la radiación media global anual en Europa sobre una superficie horizontal es de 1096 kWh/m^2 , dos terceras partes de la relativa a Madrid.

4.3.2 Módulos de la instalación

Una vez conocidas las principales variables del emplazamiento que influyen en el cálculo del balance energético, se procede al cálculo de las producciones anuales de energía térmica y eléctrica. Para ello se han implementado los diferentes sistemas que componen la instalación. Al ser TRNSYS un software con estructura modular es necesario ir parametrizando cada type (así son llamados los módulos en TRNSYS) del programa por separado para luego crear pequeños macros o subconjuntos que finalmente se agrupan en una instalación final con cada módulo trabajando en las condiciones esperadas en el diseño inicial de la instalación. Desde un punto de vista práctico, es abordar la resolución de pequeños problemas en vez de un gran problema. A continuación se enumerarán los diferentes sistemas o types que se han utilizado y sus características principales.:

- **Colector CPC:** se ha parametrizado de tal manera que se ajuste a las características del modelo Absolicon X10 (curva de rendimiento, figura 20) con

el fin de comparar los valores de TRNSYS con los presentados por el fabricante, y en vistas de integrarlo arquitectónicamente en la casa proyectada para el concurso Solar Decathlon. Una vez obtenido la curvatura y funcionamiento del colector adecuados, se optimizó el tamaño del área del colector necesario para cubrir la demanda energética requerida y se determinó el caudal del fluido caloportador a lo largo del colector (resultados en el capítulo 5).

- **Depósito:** se ha simulado un tanque estratificado en diferentes temperaturas y se ha variado el volumen en función del área de colector, buscando un compromiso entre 2 factores antagónicos, distribución de temperaturas internas y temperatura de salida hacia la carga. Quiere decir que si se aumenta el ratio volumen/área colector se obtiene una mejor distribución entre temperaturas internas, pero al haber más volumen la temperatura de salida es menor y por tanto será necesario mayor calor auxiliar para obtener la temperatura del agua adecuada, ya sea para calefacción, refrigeración o ACS. Finalmente se encontró como ratio más adecuada 150 l/m^2 . Es útil recordar que el parámetro habitual para colectores planos está entre 75 y 200 l/m^2 . Los resultados también se presentarán en el siguiente capítulo.
- **Bomba de circulación:** es el sistema encargado de hacer circular el fluido a lo largo del circuito. Tiene una capacidad máxima de flujo variable dependiente del área de captación y del caudal a través del colector, el cual tiene un valor de unos 90 l/h .
- **Regulador ON – OFF:** sistema que actúa sobre la bomba del sistema para controlar el encendido y apagado del circuito. Posee un corte por alta temperatura. También está limitada la temperatura máxima del depósito a 90°C .
- **Tubos aislantes:** elementos que se han colocado a la entrada y salida del colector para controlar las temperaturas a lo largo del circuito hidráulico. El material utilizado como aislante ha sido lana de roca cuyo coeficiente de pérdidas es $0,035 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$. Hay que buscar un compromiso entre el tamaño del tubo (a mayor tamaño mayor precio) y la disminución del calor auxiliar necesario que supone aumentar el diámetro del tubo.
- **Máquina de adsorción:** sistema de gran importancia en esta instalación, cuyo funcionamiento se ha explicado en el apartado 3.2.2. Primero, ha sido necesario modelizar su comportamiento en TRNSYS a partir de curvas de funcionamiento. Se ha diseñado para que trabaje con un COP de $0,6$, el cual es suficiente para los requerimientos de carga del sistema. Por otro lado, su temperatura de activación es de 75° , por lo que esa es la temperatura a la que debe salir el agua del depósito, en el caso de que no se alcance por falta de aporte solar. Este es el momento en el que entra a funcionar la caldera auxiliar, que calienta el agua hasta dicha temperatura de activación. Por especificaciones técnicas, el agua abandona el circuito denominado de “agua caliente” a unos 30°C .

Además hay que diferenciar otros dos circuitos dentro de la máquina de adsorción. Uno sería el relativo a la casa a refrigerar, en la que la temperatura de salida del agua del edificio es de $12,22^\circ\text{C}$ y la de entrada de $10,04^\circ\text{C}$, es decir se calienta el agua, con el calor que se evacúa de la casa. El tercer circuito es el relativo a la torre de refrigeración, que es el elemento que absorbe todo el calor de los otros dos circuitos. Su temperatura de entrada es de $32,22^\circ\text{C}$ y la de salida de 22°C . Estas temperaturas se observan en la simulación de la máquina de adsorción TRNSYS de los 3 circuitos para unos días tipo en verano (figura 27).



Figura 27. Simulación de TRNSYS que representa las temperaturas de entrada y salida de los 3 circuitos de la máquina de adsorción, siendo el rojo el del edificio, el morado el propio de la máquina de adsorción y el azul, el de la torre de refrigeración.

Los flujos másicos son las variables importantes y son calculados según la potencia demandada por la vivienda (que a su vez depende de la T^a de confort y la ambiental, además de U y el área de la vivienda) y la diferencia de temperaturas entre la salida y entrada del circuito. A partir de la potencia demandada, se divide por el COP y se obtiene la potencia a generar por la máquina de adsorción. Por último la potencia de la torre de refrigeración será la suma de las 2 anteriores.

- **Sistema de calefacción:** como se ha comentado, antes se ha utilizado suelo radiante, por la menor temperatura que requieren para calefactar y su buena adaptación a sistemas solares. Utilizando las fórmulas 1 y 2 explicadas antes se calcula el flujo másico en cada periodo de tiempo. La temperatura de entrada al sistema es de 35 °C y la de salida, 22 °C.
- **Caldera auxiliar biomasa:** como se ha explicado antes, bastará con una caldera de capacidad máxima de 4 kW, con una eficiencia en promedio del 92% y un setting de temperatura en 75 °C para suplir el déficit en refrigeración, y de 35 °C en el caso de la calefacción.
- **Válvulas:** además se han colocado válvulas que aseguran la temperatura a obtener, diversificadores de flujo, resumiendo, sistemas que permiten el correcto funcionamiento de la instalación.
- **Placas fotovoltaicas:** es el sistema mediante el que se obtiene electricidad a partir de la radiación solar. Para su cálculo se han utilizado las especificaciones técnicas que aporta el fabricante (figura 20), más concretamente el rendimiento que facilitan a 25 °C, que es de 0,17, y el factor de variación de la potencia con la variación de temperatura que es -0,4%/°C. Con todo esto se ha aplicado la siguiente fórmula que te da la potencia unitaria y la energía total a lo largo del año, en kW y kWh, respectivamente:

$$P_{FV} = \frac{I_d \cdot A \cdot \eta}{1000} \quad E_{FV} = \sum_1^{8760} P_{FV} \quad (4)$$

Donde:

- **I_d**: es la irradiancia directa en W/m².
- **A**: es la superficie del colector.
- **η**: es el rendimiento fotovoltaico en cada instante.

Así pues, cada componente es representado por un número de parámetros constantes, datos de entrada y de salida dependientes del tiempo de simulación. Un dato de salida de un componente puede ser usado como dato de entrada para cualquier otro (u otros) componente (s). El sistema final es montado conectando todas las entradas y salidas de forma apropiada para simular el sistema real. El modelo obtenido con los principales componentes TRNSYS y todas las interconexiones del sistema, se muestra en la anexo C.

5. Resultados

En este capítulo se mostrarán los resultados finales obtenidos de las simulaciones con TRNSYS. Los resultados de los diferentes parámetros serán optimizados principalmente por las dos variables de energía auxiliar y factor de cobertura por la instalación solar respecto a la energía demandada por la vivienda, las cuáles son explicadas en el apartado 4.2.1.

Los primeros resultados a presentar tienen el objetivo de determinar el tamaño de colector óptimo para cubrir la demanda de refrigeración, por los motivos explicados en los capítulos 3 y 4 de esta memoria. Además se hablará de porque ese tamaño no se puede instalar (motivos comerciales) y se mostrarán las gráficas de TRNSYS que muestran el buen funcionamiento de la instalación y la energía auxiliar necesaria para cubrir la demanda de calefacción, tanto a lo largo del año como en una semana tipo.

Después se muestran las gráficas de optimización de algunos módulos de la instalación solar. Finalmente se mostrarán unos gráficos que de comparación del colector CPC con un colector plano de las mismas características, para demostrar el buen dimensionamiento del concentrador.

5.1 Optimización del tamaño del colector CPC

Pese a que la radiación sea concentrada, el área del colector a optimizar es el área del reflector. Luego es este parámetro, el que se ha variado en busca de la menor energía auxiliar necesaria para cubrir toda la demanda. Como se ha explicado antes la carga limitante es la refrigeración, por tanto lo que se ha hecho es simular con diferentes tamaños de colector, para saber a partir de cuál, se cubre por lo menos el 95% de la demanda total de refrigeración. Esto se ve reflejado en la siguiente tabla y figura (tabla 1 y figura 28), donde, en la tabla se muestra las energías demandadas por la vivienda (E_{frig} y E_{calef} , para refrigeración y calefacción, respectivamente) a lo largo del año, la energía auxiliar anual necesaria en caso de no cubrir el total de la demanda ($E_{\text{aux_ver}}$ y $E_{\text{aux_inv}}$, para refrigeración y calefacción respectivamente), la fracción solar que cubre la instalación solar respecto a la energía total demandada a lo largo del año ($F_{\text{sol_ver}}$ y $F_{\text{sol_inv}}$) y por último la producción fotovoltaica anual de cada tamaño de colector, tanto por m^2 como la cantidad total producida ($E_{\text{Fv/m}^2}$ y $E_{\text{Fv_tot}}$):

Área colector (m ²)	$E_{\text{aux_ver}}$ (kWh)	$E_{\text{aux_inv}}$ (kWh)	$F_{\text{sol_ver}}$ (%)	$F_{\text{sol_inv}}$ (%)	E_{frig} (kWh)	E_{calef} (kWh)	$E_{\text{Fv/m}^2}$ (kWh/m ²)	$E_{\text{Fv_tot}}$ (MWh)
3	140,927	6491,10	84,837%	4,90%	929,43	6825,54	214,00	0,64
4	41,563	6191,49	95,528%	9,29%	929,43	6825,54	209,85	0,84
5	10,699	5890,23	98,849%	13,70%	929,43	6825,54	207,02	1,04
5,8	0,286	5652,77	99,969%	17,18%	929,43	6825,54	205,38	1,19
12	0,019	4134,03	99,998%	39,43%	929,43	6825,54	197,70	2,37
18	0,006	3011,84	99,999%	55,87%	929,43	6825,54	194,06	3,49
24	0,003	2209,55	100,000%	67,63%	929,43	6825,54	191,12	4,59
30	0,001	1565,49	100,000%	77,06%	929,43	6825,54	189,15	5,67
36	0,001	999,33	100,000%	85,36%	929,43	6825,54	187,72	6,76
42	0,001	534,16	100,000%	92,17%	929,43	6825,54	186,44	7,83
48	0,001	327,38	100,000%	95,20%	929,43	6825,54	184,89	8,87

Tabla 1. Energías auxiliares y demandadas de refrigeración y calefacción, además de la fracción solar que cubre la instalación y la energía fotovoltaica producida por m^2 y total, en función del área del colector.

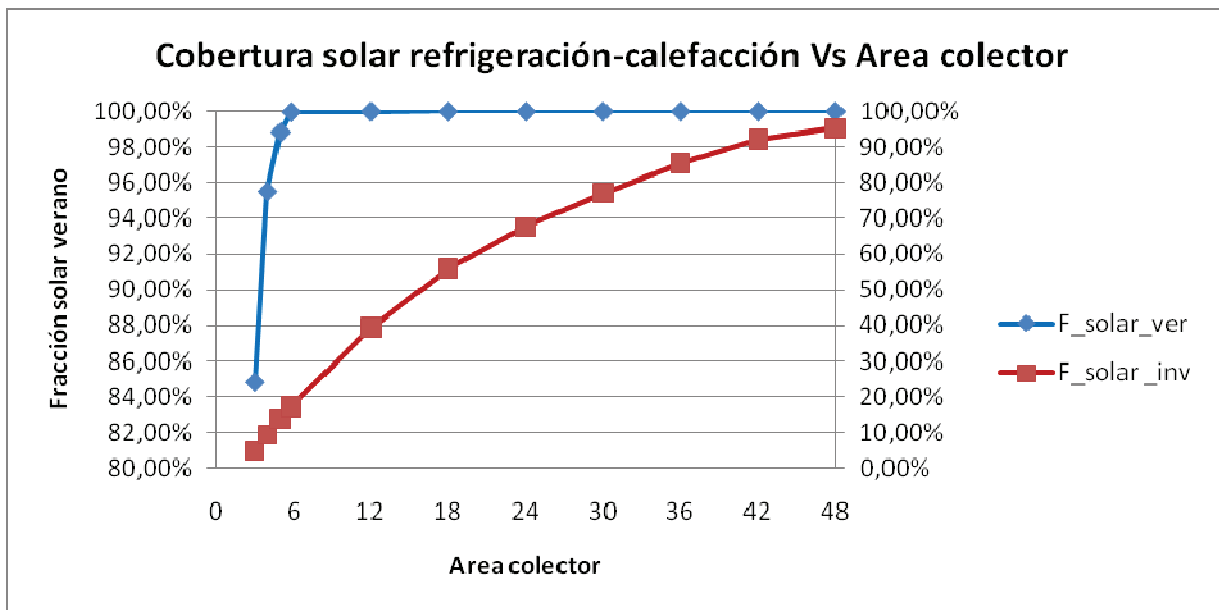


Figura 28. Relación entre el área del colector y el porcentaje de energía demandada que cubre la instalación, tanto de refrigeración como de calefacción.

Tanto en la tabla 1, como en la figura 28 se observa que el tamaño óptimo sería el de 4 m² (subrayado en amarillo), porque asegura cubrir el 95% de la demanda de refrigeración. Además a partir de ese tamaño apenas se mejora la cobertura de la refrigeración, mientras que aumenta el factor de cobertura de la calefacción, pero mayor tamaño de colector, implica mayores gastos de inversión. Es más rentable el apoyo de la caldera auxiliar de biomasa para la demanda de calefacción. Pero claro, hay que ceñirse a las especificaciones técnicas del fabricante, cuyo modelo más cercano a 4 m² es el modelo de 6 m de largo, cuyo área de captación es de 5,8 m² (figura 20). Como la idea de este proyecto es de aplicación real, a un caso que se tiene pensado desarrollar, los cálculos de los demás parámetros han sido calculados finalmente con este tamaño “comercial”. Además, se observa como los datos son muy fiables, ya que por el método bin (anexo A) se obtienen que el tamaño necesario para cubrir toda la demanda de refrigeración es 5,97 m², muy similar a los 5,8 del tamaño comercial que da una cobertura de la demanda del 99,97%.

Por otro lado, se siguió simulando para determinar los m² que serían necesarios para cubrir toda la demanda de calefacción, con el fin de compararlo con lo obtenido mediante el método bin. Satisfactoriamente se observa que con el método bin se obtienen 43 m² de tamaño necesario, mientras que con TRNSYS se cubre para ese tamaño del colector un 92-93%, cifra que realmente aumentaría si no se considerarían los picos de energía auxiliar que aparecen al principio de la simulación, puesto que TRNSYS supone el funcionamiento del sistema desde cero y eso no será lo habitual. De todos modos, este tamaño de colector es inviable porque en verano habría grandes sobrecalentamientos y la instalación estaría muy sobredimensionada, con lo que no trabajaría en las mejores condiciones.

Además se muestran los valores de energía fotovoltaica que se producen al año tanto por m² como en el total del año. Respecto al primer valor, comentar que es lógico que sea mayor la producción fotovoltaica unitaria conforme disminuye el área de colector, ya que disminuye la temperatura de la célula y, por tanto, aumenta el rendimiento de la misma. Comparando los 205 kWh/m² obtenidos para 5,8 m² de colector con las especificaciones del fabricante, 120 kWh/m², se observa una notable

diferencia a la que no se ha encontrado solución. El segundo valor, como se espera, es mayor a más área de colector. Con el valor comercial de $5,8 \text{ m}^2$ se generan a lo largo del año $1,19 \text{ MWh}$.

A continuación se mostrará el buen funcionamiento de la instalación solar a lo largo de una semana tipo en verano, que al fin y al cabo es cuando es deseable, ya que esta instalación se está dimensionando para cubrir la casi totalidad de la demanda de refrigeración. Para ello se presenta la siguiente gráfica (figura 29) donde se representa en el eje vertical izquierdo la estratificación del depósito en diferentes temperaturas, la temperatura de agua a la que debe entrar a la máquina de adsorción, 75°C y en el eje vertical derecho, las potencias auxiliares en kW, en caso de ser necesarias, y las energías demandadas de refrigeración y calefacción.

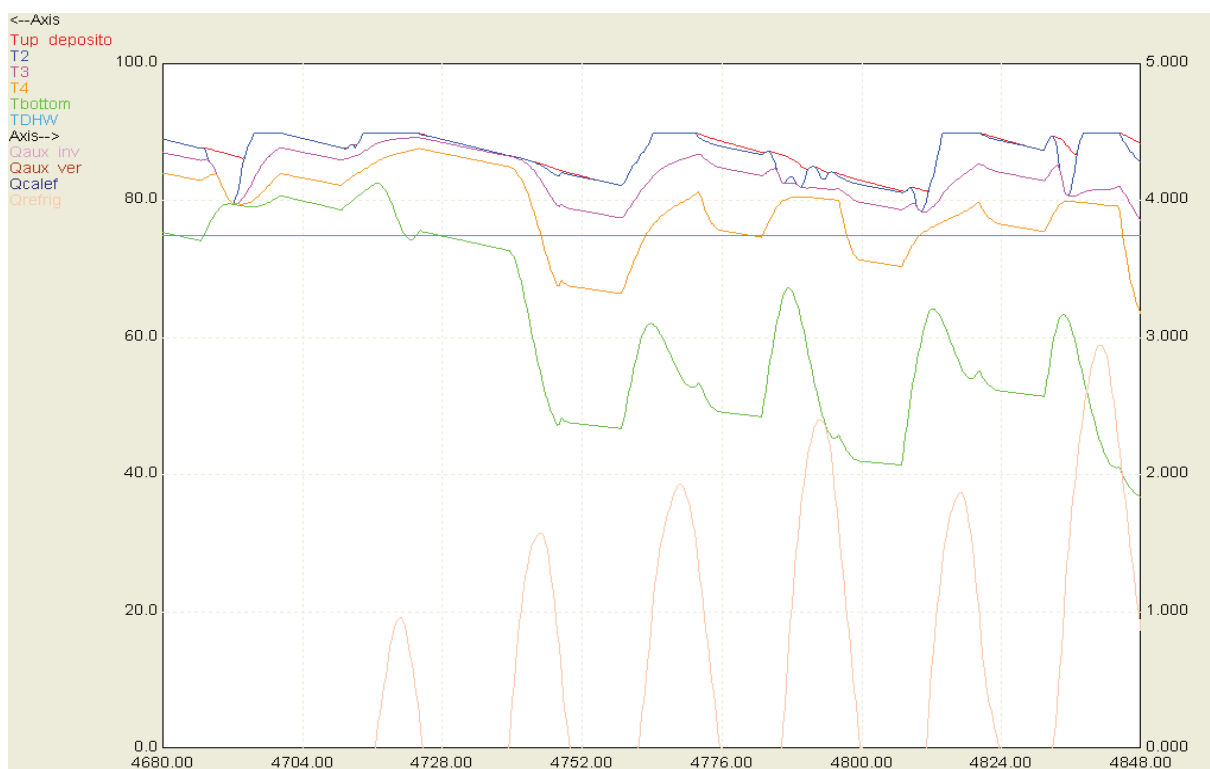


Figura 29. Gráfica de TRNSYS de la estratificación del depósito, la temperatura requerida a la salida del depósito y las energías auxiliares necesarias y las energías demandadas de calefacción y refrigeración.

Como se observa en la figura 29, en todo momento de la semana del 15 de julio (comienza en la hora 4680) al 21 de julio (finaliza en la hora 4848), la temperatura de salida del depósito (línea roja) es superior a 75°C (línea azul), por lo que no se necesita ningún aporte auxiliar. También se puede ver el valor de la potencia de refrigeración de cada día, dependiente de la temperatura ambiente, y como varía las temperaturas dentro del depósito dependiendo de dicha potencia. Se observa, además, la limitación a 90°C de la temperatura de salida del depósito impuesta por el regulador ON – OFF comentada en el apartado 4.3.2.

5.2 Optimización de otros módulos de la instalación solar

Como se ha explicado anteriormente en el apartado 4.3.2., existen numerosos módulos que configuran la instalación que se ha simulado en TRNSYS. En este apartado se presentarán principalmente la optimización del volumen del depósito y el flujo másico que circula por el colector.

Hay que recordar, que en el apartado 4.3.2, se hablaba de que el parámetro a optimizar en el depósito era el ratio volumen/área. En la tabla 2 y figura 30, se muestra los datos con los que tomar una primera decisión.

Volumen/Área (l/m ²)	E_aux_ver (kWh)	E_aux_inv (kWh)	F_sol_ver (%)	F_sol_inv (%)	E_frig (kWh)	E calef (kWh)
100	0,915	5650,36	99,902%	17,22%	929,43	6825,54
150	0,286	5652,77	99,969%	17,18%	929,43	6825,54
200	0,087	5654,71	99,991%	17,15%	929,43	6825,54
250	0,053	5655,54	99,994%	17,14%	929,43	6825,54
300	0,049	5655,67	99,995%	17,14%	929,43	6825,54

Tabla 2. Energías auxiliares y demandadas de refrigeración y calefacción, además de la fracción solar que cubre la instalación, en los dos sistemas en función del ratio volumen/área.

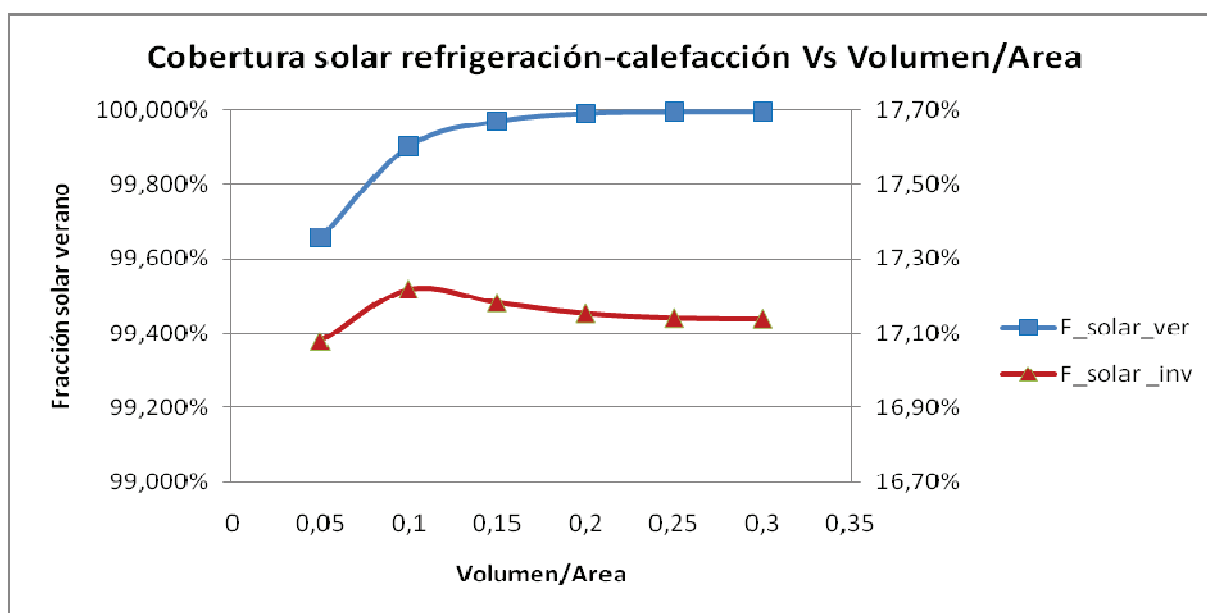


Figura 30. Relación entre el ratio volumen del depósito/área del colector y el porcentaje de energía demandada que cubre la instalación, tanto de refrigeración como de calefacción.

Con estos datos se observa que los depósitos de menor volumen, obtienen mayor cobertura de calefacción pero menor de refrigeración. Pero el tanque de 150 l/m² tiene casi 100% de cobertura de la demanda de refrigeración y será más barato que volúmenes de depósito de mayor calibre. Con respecto a depósitos de menores volúmenes, no sólo se observa una tendencia a reducir el porcentaje de cobertura de la demanda de refrigeración sino que además hay una peor estratificación de temperaturas en el depósito (observado en TRNSYS), por lo que se elige 150 en lugar de 100 l/m².

Si la variable de estudio es el flujo másico del fluido caloportador a lo largo del colector, se observa en las simulaciones y resultados (tabla 3 y figura 31), que hay un amplio rango de valores de flujo del fluido donde el aporte de la instalación es similar. De hecho, se observa como en el rango ente los 80 y los 130 (kg/h), la cobertura de refrigeración y calefacción es similar y máxima. Además es un valor muy aproximado a referencias en otros proyectos, que hablan de un caudal típico de 100 kg/h.

Flujo_colector (kg/h)	E_aux_ver (kWh)	E_aux_inv (kWh)	F_sol_ver (%)	F_sol_inv (%)	E_frig (kWh)	E_calef (kWh)
11,2	25,34	5885,95	97,274%	13,77%	929,43	6825,54
14,9	10,98	5807,06	98,819%	14,92%	929,43	6825,54
22,4	0,68	5741,74	99,927%	15,88%	929,43	6825,54
44,7	0,29	5652,77	99,969%	17,18%	929,43	6825,54
89,5	0,05	5620,38	99,994%	17,66%	929,43	6825,54
116,0	0,05	5620,34	99,994%	17,66%	929,43	6825,54
156,6	0,11	5631,63	99,988%	17,49%	929,43	6825,54
208,8	1,20E+02	5,66E+03	87,078%	17,15%	929,43	6825,54
313,2	3,18E+02	5,78E+03	65,799%	15,34%	929,43	6825,54

Tabla 3. Energías auxiliares y demandadas de refrigeración y calefacción, además de la fracción solar que cubre la instalación, en los dos sistemas en función del caudal másico circulante por el colector.

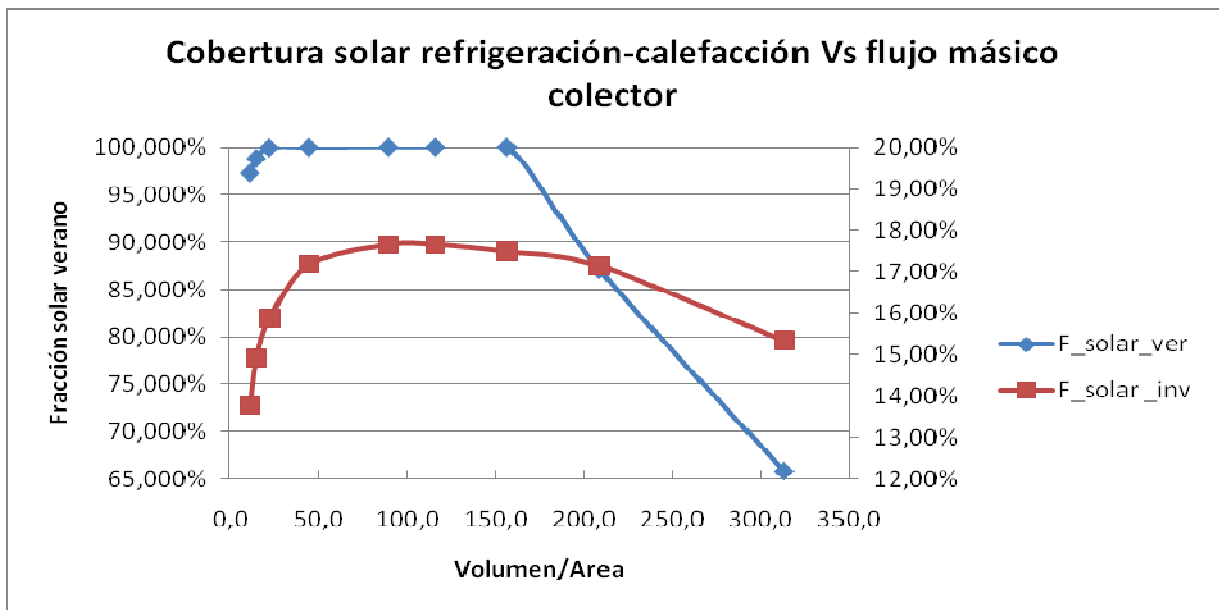


Figura 31. Relación entre el flujo másico circulante por el colector y el porcentaje de energía demandada que cubre la instalación, tanto de refrigeración como de calefacción.

5.3 Comparación colector plano con CPC

En este apartado simplemente se presentará la tabla 4 que junto con las gráficas que aparecen en el anexo C, certifican el buen funcionamiento del CPC diseñado mediante TRNSYS. Esto es así porque el CPC se ha parametrizado para que su curva de rendimiento se adecuará a los valores que ofrecía el fabricante de Absolicon X10 (figura 20), con un $\eta_0 = 0,7$ y unos coeficientes de pérdidas de $0,5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$ y $0,005 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^2$. Así pues, es lógico pensar que un colector plano con esos parámetros y el mismo área de captación, debería tener similar comportamiento térmico, en el caso de que se le aplique la misma radiación que al CPC. Por tanto lo que se ha hecho, es simular un colector plano como si recibiera sólo radiación directa y como se observa en la tabla 4, los datos obtenidos son muy parecidos. Ahora bien, si hablamos de la parte fotovoltaica sería distinto al no tener concentración el colector plano, para tener la misma producción que el CPC híbrido debería tener 10 veces más tamaño de célula fotovoltaica.

Flujo_colector (kg/h)	E_aux_ver (kWh)	E_aux_inv (kWh)	F_sol_ver (%)	F_sol_inv (%)	E_frig (kWh)	E_calef (kWh)
CPC	0,286	5652,77	99,969%	17,18%	929,43	6825,54
Plano	0,031	5628,46	99,997%	17,54%	929,43	6825,54

Tabla 4. Energías auxiliares y demandadas de refrigeración y calefacción, además de la fracción solar que cubre la instalación, en los dos sistemas en función del tipo de colector.

6. Conclusiones

En la actualidad, un concepto que está adquiriendo una gran relevancia es la integrabilidad arquitectónica. La utilización de paneles híbridos PV/T, se presenta como una solución técnica, para minimizar el espacio en tejados y conseguir la generación de tres energías distintas. Esto es lo que se ha probado en el desarrollo de este proyecto, con el fin de poder aplicarlo a una vivienda participante en un concurso de proyectos de viviendas bioclimáticas, llamado Solar Decathlon, realizado en Madrid en verano, por lo que se ha diseñado la instalación para su buen funcionamiento en dichas condiciones meteorológicas y de emplazamiento.

Así pues, se han expuesto las razones para utilizar paneles híbridos y el porqué del uso de concentración, con el fin de disminuir gastos, pese a necesitarse un seguimiento de la radiación solar. Se ha tratado también los antecedentes y el estado del arte actual.

A continuación, se ha hablado de la posible trigeneración que se podría obtener con este tipo de paneles y se han propuesto unas estimaciones de demanda tanto de calefacción como de refrigeración, que serán las que se aplicarán presumiblemente en la vivienda participante en el concurso. Además se ha profundizado en dichos sistemas, más concretamente en suelo radiante para el sistema de calefacción y la máquina de adsorción, para el de refrigeración.

Ya en el cuarto capítulo, se ha explicado que tipo de panel se ha utilizado, qué características y especificaciones tiene,... Además se ha comentado la metodología seguida para conocer la energía necesaria a calefactar o refrigerar, y conceptos tan importantes como son la energía auxiliar a aportar en caso de insuficiente cobertura solar y dicho porcentaje de cobertura, los dos a lo largo del año. Para finalizar el capítulo se presenta el software TRNSYS, herramienta informática de carácter modular, utilizada durante este proyecto para simular dinámicamente el funcionamiento de una instalación solar híbrida. Esta visión transitoria del sistema no es habitual y es muy completa y correcta para la simulación de este tipo de instalaciones, ya que permite visualizar rápida y fácilmente cualquier elemento de la misma y descubrir errores o valores incorrectos, en caso de que los haya. También se comentan los diferentes módulos que integran dicha instalación y sus principales parámetros, tanto en la memoria como en anexos.

Finalmente en el quinto capítulo se han expuestos los principales resultados. Primeramente, se realizó el dimensionamiento del tamaño de panel a instalar, en función de la cobertura de casi la totalidad de la demanda frigorífica. Se ha obtenido, que el tamaño óptimo sería un panel de 4 m^2 , pero la empresa fabricante del panel vende modelos comerciales de $5,8 \text{ m}^2$, así que este valor ha sido el utilizado para la mayoría de los resultados. Estos datos de simulación han sido verificados mediante el método bin, cuyos resultados están en los anexos, y son muy parecidos. Además se han optimizado otros parámetros de la instalación, como el tamaño del depósito de agua caliente o el flujo másico del fluido circulante por el colector. Por últimos se ha comparado el panel CPC con un colector plano para comprobar su parecido funcionamiento, lo que muestra el buen hacer del programa diseñado.

También se han dimensionado durante este proyecto, tanto la caldera auxiliar de biomasa, en caso de radiación solar insuficiente, como el sistema de refrigeración (máquina de adsorción y torre de refrigeración) y calefacción, así como las partes que componen el circuito hidráulico del sistema.

Bibliografía

- [1] Oswaldo E. Hanco Apaza, Raúl Luque Álvarez, Alberto Montoya Portugal, Ernesto Palo Tejada, Miguel Vizcardo Cornejo. Diseño, construcción y evaluación de un sistema solar híbrido fotovoltaico/térmico para aumentar la eficiencia de un panel solar.
- [2] P.G. Charalambous, G.G. Maidment, S.A. Kalogirou, K. Yiakoumetti. Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review.
- [3] Garg, H.P., Adhikari, R.S. Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs. *International Journal of Energy Research*, 23, 1295-1304, 1999.
- [4] Garg, H.P., Agarwal, R.K., Joshi, J.C. Experimental study on a hybrid photovoltaic thermal solar water heater and its performance predictions. *Energy Conversion & Management*, 35, 621-633, 1994.
- [5] Sharan, S.N., Kandpal, T.C. Testing of a Prototype Combined Photovoltaic-Thermal Linear Fresnel Concentrator-Receiver System. *Energy Conservation and Management*, 33, 37-39, 1992.
- [6] Brogren, M. Low-Concentrating Photovoltaic Systems with Parabolic Reflectors, Licentiate Thesis, Division of Solid State Physics, Uppsala University, 2001.
- [7] Brogren, M. Nostell, P., Karlsson, B. Optical Efficiency of a PV-Thermal Hybrid CPC Module. *Eurosun 2000 - ISES Europe Solar Conference*, Copenhagen, 2000.
- [8] Brogren, M., Karlsson, B. Low-concentrating water-cooled PV-thermal hybrid systems for high latitudes. *29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, May 19-24 2002, New Orleans, LA, United States, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1733-1736, 2002.
- [9] Coventry, J.S. Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. *Solar Energy*, 78, 211-222, 2005.
- [10] Coventry, J.S., Lovegrove, K. Development of an approach to compare the 'value' of electrical and thermal output from a domestic PV/thermal system. *Solar Energy*, 75, 63-72, 2003.
- [11] Chemisana, D., Barrau, J., Rosell, J.I., Ibáñez, M. Performance of a concentrating pv-thermal system for domestic heating and cooling. *Eurosun 2006 - ISES Europe Solar Conference*, Glasgow, 2006.
- [12] Rosell, J.I., Vallverdú, X., Lechón, M. A., Ibáñez, M. Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management*, 46, 3034-3046, 2005.
- [13] Imenes, A.G., Mills, D.R. Spectral Beam Splitting for Increased Conversion Efficiency in Solar Concentrating Systems. *ANZSES Solar Energy Conference*, Newcastle, 2002.
- [14] Hamdy, M.A., Luttmann, F., Osborn, D. Model of a Spectrally Selective Decoupled Photovoltaic/Thermal Concentrating System. *Applied Energy*, 30, 209-225, 1998.

- [15] Yang, M.J., Izumi, H., Sato, M., Matsunaga, S. A 3kW PV-Thermal System for Home Use. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, California, 1313-1316, 1997.
- [16] Mills, D.R., Schramek, P., Dey, C., Buie, D., Imenes, A.G., Haynes, B.S., Morrison, G. Multi Tower Solar Array Project. ANZSES Solar Energy Conference, Newcastle, 2002.
- [17] Lasich, J.B. Apparatus for separating solar radiation into longer and shorter wavelength components. Australian Patent 731,495, 29, 2001.
- [18] Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) www.ciemat.es
- [19] Daniel Chemisana Villegas. Tesis doctoral: Diseño y caracterización de un concentrador térmico-fotovoltaico cuasiestacionario para integración arquitectónica.
- [20] Manual técnico de calefacción por suelo radiante Uponor.
http://uponor.generadordeprecios.info/uponor_suelo_rad/pagina18.html
- [21] Wu, D. W. y Wang, R. Z. Combined cooling, heating and power: A review. Progress in Energy and Combustion Science 32(5-6): 459-495, 2006.
- [22] Especificaciones técnicas de la máquina de adsorción de la empresa ICOGEN <http://www.icogen-sa.com/pdf/ICOGEN-NISHIYODO%20en%20castellano.pdf>
- [23] Wang, R. Z. y Oliveira, R. G. Adsorption refrigeration - an efficient way to make good use of waste heat and solar energy. International Sorption Heat Pump Conference. Denver, CO, USA. 2005.
- [24] Página web Solar Kuántica - Absolicon X10. www.solarkuantica.com/index.php
- [25] <http://ensos.net/> Ensos: Proyectos energéticos sostenibles
- [26] Christenson, M., Manz, H., et al. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. Energy Conversion and Management 47(6): 671-686, 2006.
- [27] Cannistraro, G., Giaconia, C., et al. Reduced weather data for building climatization and application to 29 European locations. Energy 20(7): 637-64, 1995.
- [28] Badescu, V. y Zamfir, E. Degree-days, degree-hours and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures (Romania). Energy Conversion and Management 40(8): 885-900, 1999.
- [29] Gelezenis, J. J. Estimation of hourly temperature data from their monthly average values: case study of Greece. Renewable Energy 18(1): 49-60, 1999.
- [30] Huld, T. A., Sári, M., et al. Estimating average daytime and daily temperature profiles within Europe. Environmental Modelling & Software 21(12): 1650-1661, 2006.
- [31] Threlkeld, J. L., Ramsey, James W., et al. Thermal environmental engineering. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, Inc., 1998.
- [32] Kreider, J. F., Curtiss, P. S., et al. Heating and Cooling of Buildings - Design for efficiency. Singapore, McGraw-Hill, 2005.
- [33] PVGIS <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/radday.php?lang=es&map=africa>