

ANEXOS

ÍNDICE ANEXOS

Anexo A: Metodología simplificada de dimensionamiento de paneles	1
A1 Demanda energética diaria de la vivienda unifamiliar.....	2
A.1.1 Cálculo demanda energética de calefacción.....	2
A.1.2 Cálculo demanda energética de refrigeración	3
A2 Cálculo producción energética unitaria del panel.....	4
A3 Resultados.....	5
A3.1 Cálculo del tamaño del panel para cubrir la demanda de calefacción	5
A3.2 Cálculo del tamaño del panel para cubrir la demanda de refrigeración	5
A3.3 Cálculo de la producción eléctrica	5
A3.4 Otros dimensionamientos	6
Anexo B: CPC y Absolicon X10	8
B1 Ventajas operativas y funcionales	8
B1.1 Ventajas operativas	8
B1.2 Ventajas funcionales	8
B2 Aplicaciones más importantes y sus diseños básicos	10
B3 Diseño y componentes del panel.....	12
Anexo C: TRNSYS	14
C1 Características principales de TRNSYS.....	14
C2 Comparación colector plano con colector parabólico.....	15
C3 Comparación según orientación del colector parabólico.....	17
C4 Esquema de instalación en TRNSYS	18

Anexo A: Metodología simplificada de dimensionamiento de paneles

Como se ha comentado en la memoria del proyecto se realizó para trabajo fin de una asignatura del máster unos primeros cálculos de dimensionamiento del panel híbrido, con los que luego se pudiera comparar los resultados obtenidos en la simulación mediante TRNSYS. Para ello se plantearon las siguientes demandas (reflejadas en la figura A1), para la vivienda Solar Decathlon, con una superficie a acondicionar de 75 m²:

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

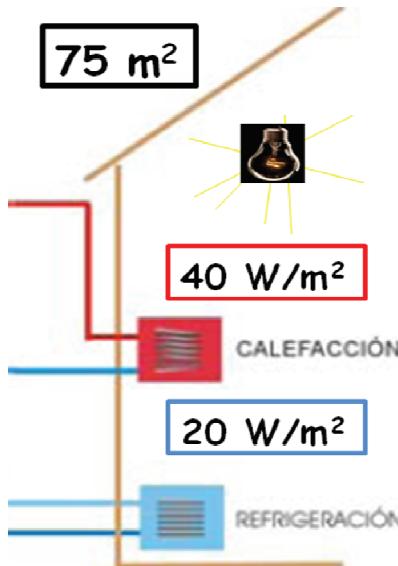


Figura A1. Esquema demandas estimadas para la vivienda unifamiliar

Los cálculos aquí realizados, se han hecho para dimensionar el panel híbrido, de tal manera, que cubra todas las demandas tanto de calefacción como las de refrigeración para el peor de los casos. Se ha utilizado el método bin, comentado en el apartado 4.2.1 de la memoria del proyecto [31,32], que permite calcular el consumo energético para diferentes valores de la temperatura exterior, multiplicando éste por el correspondiente número de horas.

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

- **Demandas energéticas diarias de la vivienda unifamiliar**, comentada en el apartado 3.2 de la memoria (figura A1). Diferenciando dos cálculos, el de calefacción para un mes de invierno y el de refrigeración para un mes de verano, para saber cuáles son las demandas más limitantes y dimensionar en función del mismo el tamaño del panel híbrido.
- **Producción energética unitaria del panel**: es decir, la cantidad de kWh/m² que produce el panel, cantidad que dividirá a la cantidad anterior, obteniéndose el tamaño de m² a instalar.

Lo que se ha hecho en este estudio es usar una base de datos, Meteonorm, que permite conocer los datos horarios de temperatura exterior para el caso de Madrid, donde se supone se localizaría la vivienda (figura A2), y TRNSYS para obtener los datos y poder exportarlos a Excel.

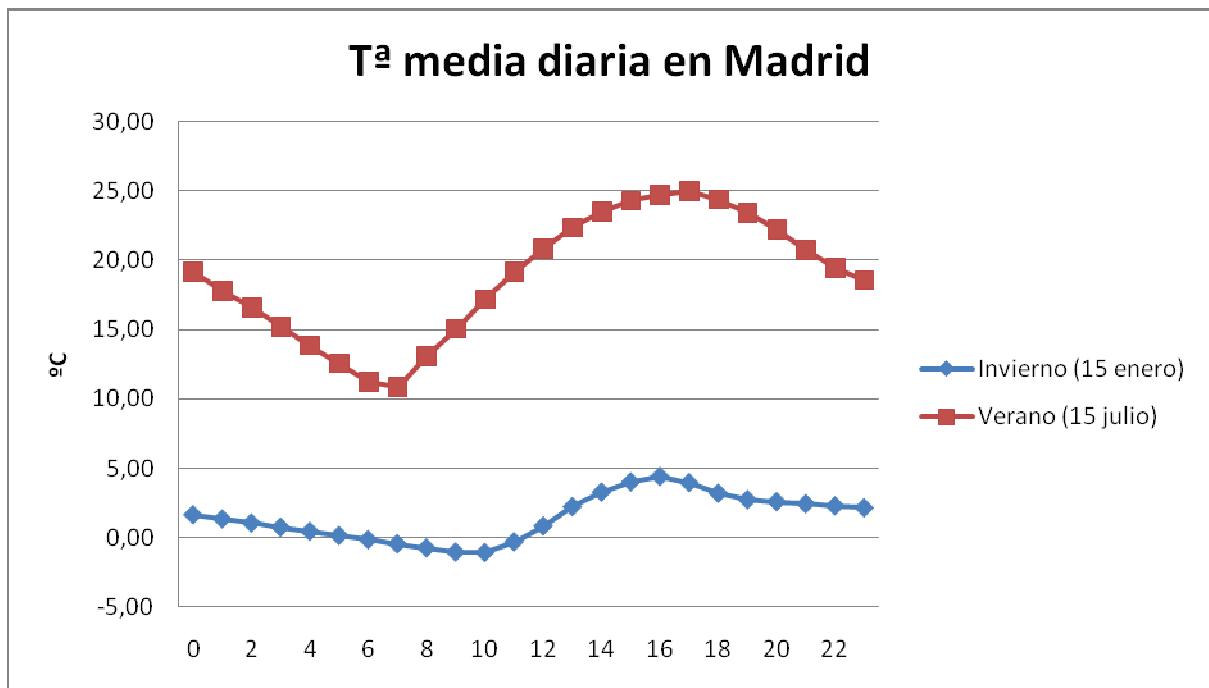


Figura A2. T^a media de un dia tipo de invierno y de verano en Madrid obtenidas de Meteonorm.

A1 Demanda energética diaria de la vivienda unifamiliar

A1.1 Cálculo demanda energética de calefacción

Debido a que la curva de demanda energética de calefacción horaria tipo de un día de invierno (cuando la demanda de calefacción será mayor) es diferente a la de producción solar horaria (figura A3), hay que realizar un cálculo energético para estimar el tamaño del colector. Ya que no coinciden los picos máximos de cada curva, lo correcto es igualar las áreas debajo de las dos curvas, para que la energía solar cubra la totalidad de la demanda.

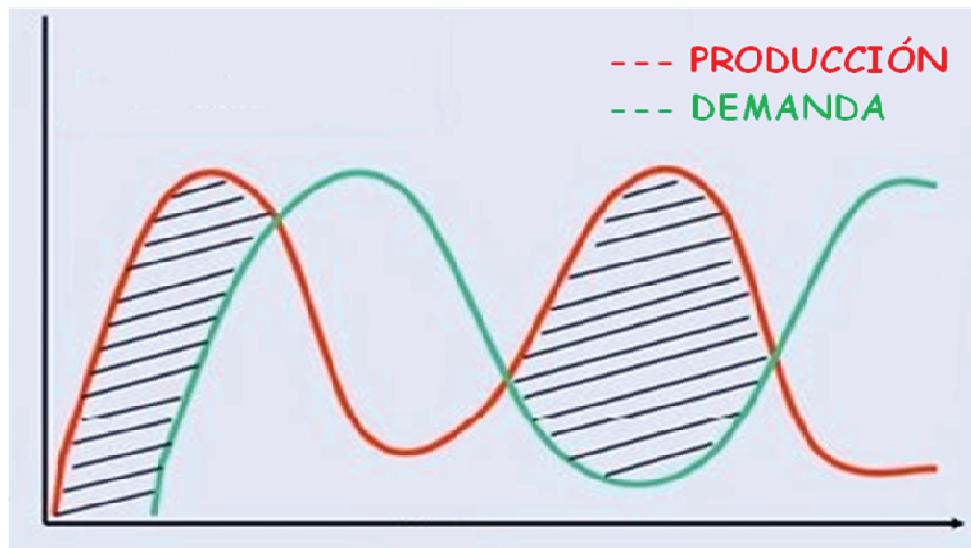


Figura A3. Diferencia entre la curva de producción solar y la demanda energética para un día tipo

Para ello, se han realizado una tabla Excel horaria (tabla A1) en las que se calcula para un día medio de invierno (15 de enero), las demandas energéticas horarias a partir de la siguiente fórmula:

$$Q_i = U \cdot A \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad Q_t = \frac{\sum_{i=1}^{24} Q_i}{1000} \quad (A1)$$

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/m^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, $2,22 \text{ W/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- A : es la superficie de la vivienda. Como se ha comentado en el apartado 4.2 es de 75 m^2 .
- T_{int} y T_{ext} : las temperaturas interior y exterior respectivamente y que han sido comentadas en el apartado 4.2.1 de la memoria del proyecto.
- Q_t : demanda energética total de un día tipo de invierno en kWh.

INVIERNO	Calefacción	40 W/ m ²	3 kW
		T ^a horaria	Q (Wh) = U*A*(Tint-Text)
0	1,65		2725,00
1	1,35		2775,00
2	1,05		2825,00
.....
22	2,30		2616,66
23	2,16		2640,62

Tabla A1. Cálculos de la demanda energética horaria y total para un día tipo de invierno en Madrid

A1.2 Cálculo demanda energética de refrigeración

En este caso la curva de demanda de refrigeración de un día tipo de verano (15 de julio) es similar a la curva de producción del panel, por lo que no hace falta calcular la energía debajo de cada curva e igualarlas. Basta con calcular los m^2 de panel necesarios para cubrir la máxima potencia de demanda, que en este caso será 1.5 kW, resultado de multiplicar los 20 W/m^2 estimados como potencia de refrigeración (la U será $2 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$, de dividir $20/10$, siendo 10 el ΔT , suponiendo 35°C de temperatura máxima), por la superficie de la vivienda (75 m^2). Pero hay que tener en cuenta que esa es la potencia demandada por el edificio a la máquina de adsorción, que tiene un rendimiento, esto es, un COP, en este caso de 0,6. Por tanto la potencia demanda real es de 2,5 kW. Este valor será el que se utilizará luego para calcular el tamaño de instalación.

A2 Cálculo producción energética unitaria del panel

En este apartado, también se van a diferenciar los cálculos para cada tipo de demanda, a saber calefacción y refrigeración, los cuales servirán para calcular en el siguiente apartado el tamaño final de panel a instalar.

Al ser los paneles híbridos, como se ha dicho antes, con concentración solar, quiere decir que sólo aprovecharán la radiación directa incidente. Esto es un problema a la hora de encontrar valores de radiación con los que realizar los cálculos. Mirando posibilidades, se observó que PVGIS [33], mostraba solo datos de radiación global y difusa, con lo que despreciando el efecto de albedo (1-2 %) y haciendo la diferencia de las dos cantidades, se obtendría el valor de la radiación directa. Ahora bien PVGIS solo da valores de radiación para captación solar sin seguimiento y seguimiento a 2 ejes. Lo que se ha hecho pues, es multiplicar la radiación directa que captaría un panel con seguimiento a 2 ejes, y multiplicarla por el coseno del azimut para conseguir la radiación directa a 1 eje.

Para calefacción hay que calcular la incidencia de la radiación horaria por la diferencia horaria entre curva de demanda y producción comentada en el apartado anterior, mientras que para refrigeración basta con coger el valor de mayor irradiación en potencia.

Además este valor de radiación no es el que aprovecha totalmente el panel híbrido. Como todo panel solar tiene un rendimiento térmico (η_t) dependiente del rendimiento óptico (η_0) de valor 0.7 y los coeficientes de pérdidas U_1 y U_2 , de valor 0,5 W/m² y 0,005 W/m² °K2, respectivamente, que son los valores que aparecen subrayadas en la figura 21 de la memoria del proyecto (especificaciones técnicas del modelo de 6 m de Absolicon x10).

$$\eta_t = \eta_0 - U_1 \cdot \frac{(T_m - T_{amb})}{G_{1b}} - U_2 \cdot \frac{(T_m - T_{amb})^2}{G_{1b}} \quad (A2)$$

Donde:

- η_0 : rendimiento óptico.
- U_1 y U_2 : coeficiente térmico de pérdidas.
- T_m : temperatura media del panel. Se ha considerado 35 °C, para invierno, y 75 °C, para verano, cuando la temperatura es más alta.
- T_{amb} : cálculo de la temperatura ambiente. Serán los mismos expuestos antes referentes a la temperatura exterior.
- G_{1b} : radiación directa incidente con seguimiento a 1 eje, en W/ m²

Ese rendimiento térmico horario se multiplica por la radiación directa en cada hora que haya radiación (nótese en la tabla A2, como en invierno a partir de las 17, hora solar, no hay radiación y por tanto no hay producción) y sumando cada término horario, se obtiene la producción horaria por m² de panel híbrido que se consigue en un día.

Esto es útil para el caso de calefacción como se ha dicho antes. Así pues, se obtiene que la producción diaria unitaria en Madrid con seguimiento a 1 eje este-oeste es de **1.54 kWh/ m²**. Para la refrigeración se multiplica la máxima radiación por su η_t en ese momento (tabla A3). La producción en potencia es **418,46 W/ m²**. Con esos datos de producción ya se podría calcular los m² de panel necesarios.

INVIERNO Enero				Tamb	Tamb (ºK)	COS(Azimut)	G1b	eta	eta*I	eta0
Hora	G2g	G2dif	G2b							
8	269	85	178,62	-0,75	272,40	-54,4	104,04	0,47	48,56	0,7
9	436	124	303,28	-1,05	272,10	-43,1	221,33	0,59	130,41	Tm
10	518	144	363,64	-1,08	272,07	-30,2	314,16	0,62	195,36	308,15
11	557	154	391,86	-0,31	272,84	-15,7	377,29	0,64	240,22	
12	570	157	401,6	0,84	273,99	0	401,6	0,64	258,20	
13	562	155	395,76	2,24	275,39	15,7	381,05	0,64	244,98	Qsol=suma(n*I)
14	530	147	372,4	3,29	276,44	30,2	321,73	0,64	204,33	1,54 kWh/m²
15	462	130	322,76	4,02	277,17	43,1	235,54	0,61	144,59	
16	323	97	219,54	4,42	277,57	54,4	127,87	0,54	69,55	
17	0	0	0	3,97	277,12	G1b=G2b*cos(Azimut)				
18	0	0	0	3,21	276,36	eta=eta0-0,5*(Tm-Tamb)/G1b-0,005*(Tm-Tamb)^2 / G1b				

Tabla A2. Producción horaria y total del panel híbrido por m² y cálculo de radiación directa con seguimiento a 1 eje en invierno.

G1b max	eta	eta*I
657,42	0,64	418,46

Tabla A3. Producción total en potencia del panel híbrido por m² en verano.

A3 Resultados

En este apartado se expondrán los resultados finales, referentes al tamaño de instalación necesario para cubrir cada demanda energética, ya sea calefacción o refrigeración, y ver cuál de los dos es más limitante, lo cuál determinará el tamaño final del panel, siempre recordando que esta diseñado para cubrir la totalidad de la demanda energética.

Además se determinará la energía eléctrica generada en función del número de m² de panel instalado, observando las especificaciones técnicas del fabricante. Y por último se hablará de otros sistemas a dimensionar.

A3.1 Cálculo del tamaño del panel para cubrir la demanda de calefacción

Para realizar este cálculo bastara con dividir, la demanda energética de calefacción estimada para un día medio de invierno entre la producción diaria del panel por m². Así se obtiene, que son necesarios **42,98 m²** de panel híbrido.

A3.2 Cálculo del tamaño del panel para cubrir la demanda de refrigeración

En este caso, el cociente es entre potencias. Se divide la potencia de refrigeración estimada de 2,5 kW entre la potencia por m² para la irradiación máxima y se obtiene que son necesarios **5,97 m²** de panel. Así pues, es más limitante el estudio para la calefacción.

A3.3. Cálculo de la producción eléctrica

Una vez elegido el panel, simplemente hay que ir a las especificaciones del fabricante (figura 20, memoria del proyecto) y ver cuanto se produce por m² de panel híbrido. Según dicha tabla, en Madrid se producen **120 kWh/m² año**. Multiplicando esta cifra por los m² de panel necesarios para cubrir la demanda de calefacción, se obtiene una producción eléctrica de **5,16 MWh/año** (para los 42,98 m² de panel instalado).

Ahora bien esa cifra de paneles no será la instalada y en función de lo que se instale se obtendrá una producción eléctrica, mayor o menor.

Una vez determinada la producción unitaria hay que decidir que tamaño nos conviene instalar en la vivienda de Solar Decathlon, en función del diseño y el dinero que se pueda invertir.

A3.4 Otros dimensionamientos

Finalmente se comentarán brevemente los dimensionamientos de otras partes de la instalación:

- **Maquina de adsorción y torre de refrigeración:** la máquina de adsorción se ha dimensionado según tablas de fabricantes. Así pues, bastaría con una máquina de 5 kW, que tendría un COP de 0.6, aproximadamente (figura A4). Para el dimensionamiento de la torre de refrigeración, habría que sumar, esos 5 kW + 1,5 kW que se quieren extraer de la casa, es decir, 6,5 kW de torre.

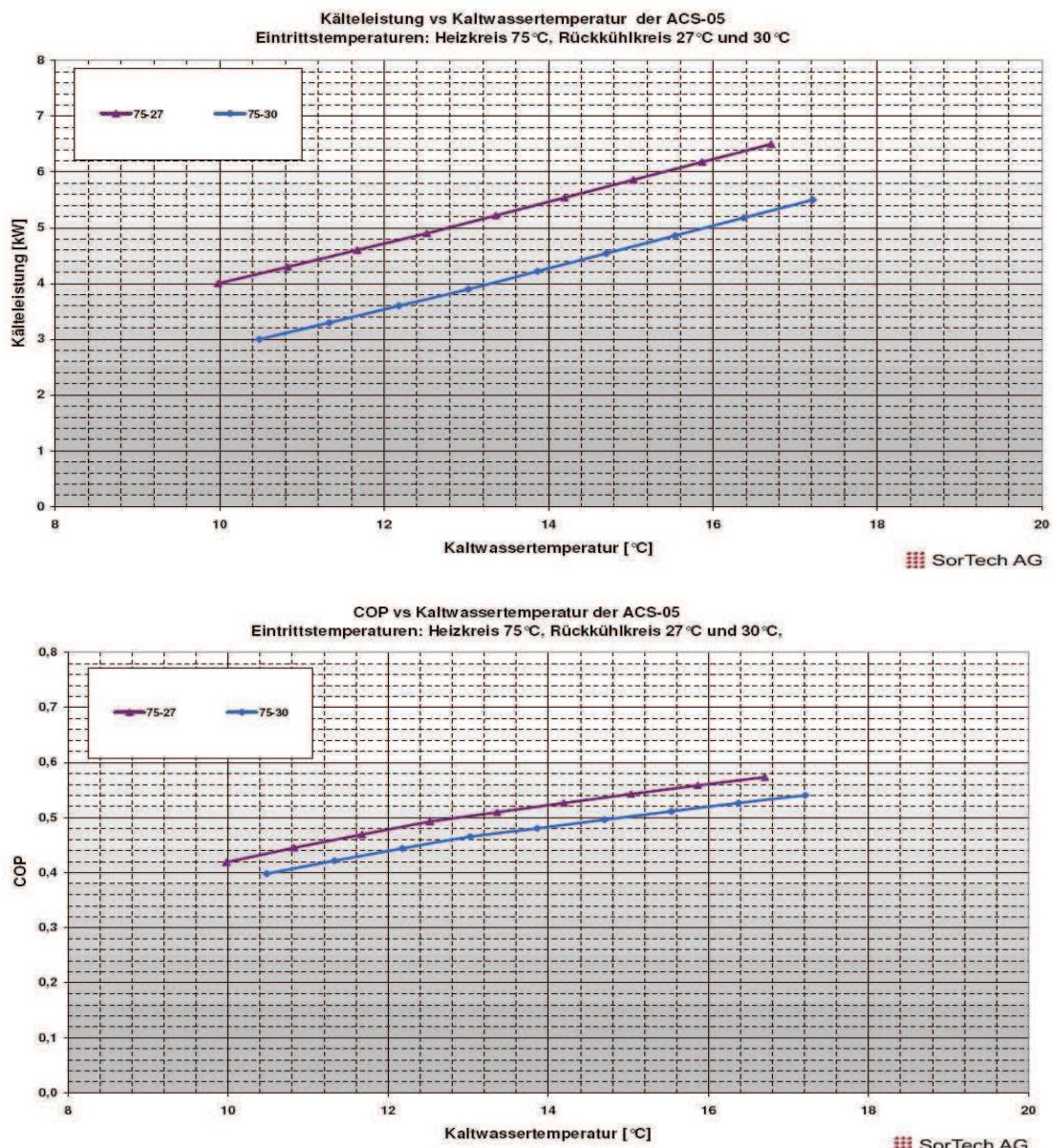


Figura A4. Curvas, para $T_m = 75^{\circ}\text{C}$, de potencia frigorífica y COP de máquinas de adsorción de la compañía SorTech AG.

- **Caldera auxiliar de biomasa:** simplemente comentar que se dimensiona para cubrir la máxima demanda de calefacción, para casos en los que no hubiera radiación directa. Será el sistema que apoyará al panel híbrido cuando la radiación no sea la adecuada. Además se ha querido que sea de biomasa para que la instalación sea totalmente renovable. Bastará con 5 kW de potencia instalada

Anexo B: CPC y Absolicon X10

En este anexo se amplían un poco más las ventajas y aplicaciones del uso de este tipo de paneles híbridos que demuestran el porqué son una tecnología de futuro y con grandes posibilidades de desarrollo y explotación. Además se esquematizan las principales partes del modelo comercial

B1 Ventajas operativas y funcionales

En el capítulo 2 de la memoria del proyecto, se habían mostrado las ventajas de los sistemas de concentración. En este anexo se presentaran las ventajas propias de los sistemas híbridos, y más concretamente de los CPC's. Se pueden dividir en 2 grandes grupos:

B1.1 Ventajas operativas

Con el fin de concretar y esquematizar un poco más se presentan las ventajas operativas más notables de este tipo de paneles híbridos:

- **Doble tecnología solar:** producción de calor y electricidad simultáneamente. Es decir, con un solo equipo se producen las dos formas de energía al mismo tiempo.
- **Concentración Solar x10:** generación de 10 soles. Cuando la radiación solar es de 1.000 W/m^2 , el panel está “viendo” 10.000 W/m^2 . Funcionamiento basado en el aprovechamiento de la componente radiación, sin hacer uso de convección y conducción (efecto invernadero), por lo que no hay inercia térmica (no hay problemas de precalentamiento como ocurre con la energía solar térmica clásica) y la producción, además de ser notablemente superior, es instantánea desde la primera hora del día hasta la última, como se observa en la figura B1.

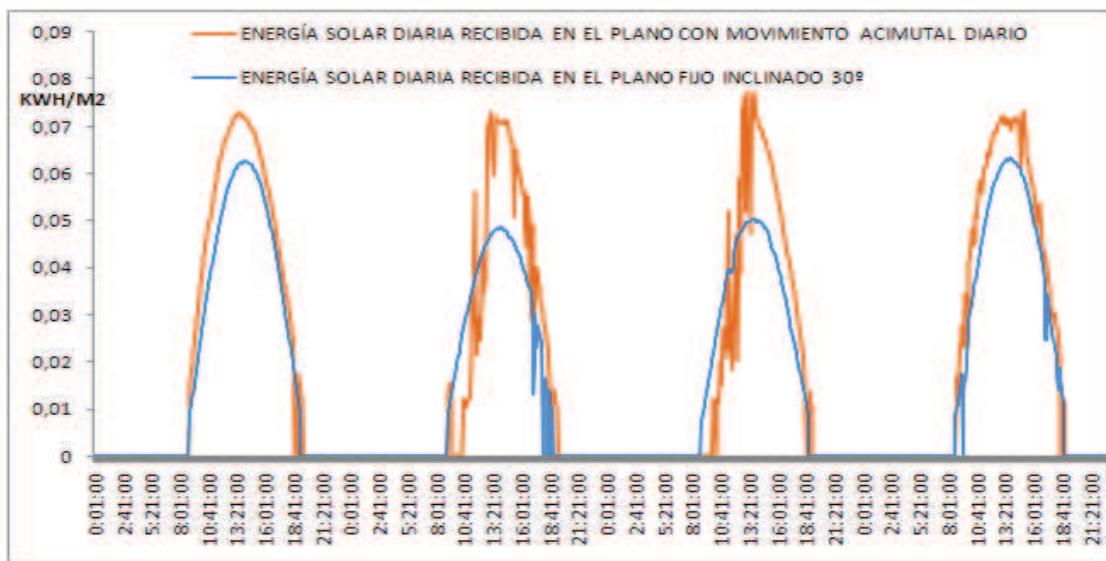


Figura B1. Comparativa de 4 días consecutivos, entre la energía que recibe el panel híbrido concentrado con seguimiento y la energía que recibiría un supuesto captador fijo con inclinación óptima [24].

- **Versatilidad:** al estar diseñado por piezas desmontables, el panel nunca será un equipo solar obsoleto. Si se daña un componente, se cambia. Es decir, puede ser actualizado tecnológicamente. El receptor, compuesto principalmente por células fotovoltaicas de alto rendimiento para la generación de electricidad solar, puede ser extraído y sustituirse en un futuro las células fotovoltaicas por otras de mayor rendimiento.

- **Sistemas de seguridad por control automático.** Un sistema de control diseñado específicamente controla de manera automática el equipo, controla su movimiento y la seguridad del sistema. Todos los equipos, por defecto, son controlados y permanente actualizados y no existirán nunca problemas de sobrecalentamiento en el sistema térmico
- **Optimización del espacio disponible** en el tejado, en términos de cantidad de energía generada. Por cada m^2 de panel son necesarios $2\ m^2$ de tecnología convencional.
- **Costes de instalación inferiores**, debido a que el sistema simplifica mucho la necesidad de tuberías y cables. Para el caso de Absolicon x10, se suministran unidades pre-ensambladas en España de 6 y $10\ m^2$, lo que redundaría en reducción de costes de mano de obra de montaje.
- Debido a la concentración solar y al movimiento, en **invierno** se produce notablemente **más cantidad de calor** que un sistema solar térmico clásico de placa plana. Esto **reduce los excesos de calor en verano**, lo cual es un problema asociado a las tecnologías convencionales de energía solar.
- **Menor impacto medioambiental** en relación al análisis del ciclo de vida. Su impacto es del orden de la cuarta parte producida por un sistema solar fotovoltaico.

B1.2 Ventajas funcionales

- **Protección contra sobre temperaturas y sobre presiones:** uno de los efectos dramáticos sobre variables afectadas en paneles clásicos, es la **presión**, la cual puede dar lugar a situaciones de desequilibrio hidráulico. Es la razón anterior la que lleva a dichos paneles clásicos a requerir de tiempo para cualquier acción, lo que lleva en muchas ocasiones al colapso de los sistemas. Además los paneles híbridos actúan correctamente en situaciones de “no consumo”, mientras los colectores clásicos pueden entrar en estado de colapso, el panel híbrido “lo sabe”, y reacciona de manera automática auto protegiéndose, empleando para ello su capacidad de movimiento. El movimiento de alta precisión y el control permanente de temperaturas permite que el panel, en segundos, se disponga en posición de desenfoque; cuando los valores alcanzan los permitidos, recupera de manera inmediata el enfoque y concentración. Como se ha explicado antes, cada uno de estos movimientos tiene un efecto inmediato sobre las variables afectadas, ya que no existe ninguna clase de inercia térmica involucrada en el proceso.
- **Seguridad en la concentración fotovoltaica:** si se alcanza la temperatura considerada como no apta para garantizar el buen estado de la célula fotovoltaica, se produce un desenfoque inmediato; si se recuperan los valores permitidos, se vuelve a restaurar el enfoque y concentración. Al emplear un fluido como refrigerante, si la demanda de calor es tal que se den temperaturas bajas en dicho fluido, del orden de los $20-30\ ^\circ C$ (típico en instalaciones de gran demanda de calor), el rendimiento del sistema fotovoltaico de concentración incorporado mejorará notablemente en relación a un sistema fotovoltaico clásico.
- **Protección por inoperatividad o “no uso”:** en ocasiones, y por diversas razones, un sistema de energía solar debe ser parado, coincidiendo en muchas ocasiones dichas paradas con épocas de alta radiación. Ante dicha situación, el panel híbrido simplemente se dispondrá de manera automática en posición de seguridad, posición en la que la radiación solar no tiene ningún efecto sobre éste.

Tal orden también puede darse como orden expresa en el cuadro de control a través de un pulsador.

- **Protección contra vientos y lluvia:** aunque son equipos diseñados para soportar las inclemencias meteorológicas, si detecta un viento “no deseado”, automáticamente, se coloca en posición horizontal. Al no poseer un diseño plano, la posición horizontal le protege de manera muy notable. Y si llueve por encima de un valor considerado como mínimo, se coloca en posición vertical, de manera que deje de estar expuesto al “chorro”. Si nieva, un pulsador permite que sea movido a su posición vertical para eliminar ésta de manera natural, volviendo posteriormente a su movimiento automático.

B2 Aplicaciones más importantes y sus diseños básicos

Como se ha explicado en la memoria en el apartado 4.1.3, esta tecnología doble se puede utilizar para cualquier edificio que requiera cubrir demandas energéticas de calefacción, refrigeración, ACS y/o electricidad. A continuación se muestran unos ejemplos de instalaciones usando esta tecnología:

- **Viviendas unifamiliares:** el calor extraído de la célula fotovoltaica del panel híbrido puede ser empleado para ACS, calentamiento de piscinas cubiertas o descubiertas, calefacción, o incluso refrigeración, como se ha comentado antes, mediante una máquina de absorción o adsorción. Además la electricidad generada convierte a la vivienda en un productor de energía eléctrica en régimen especial, energía que es inyectada y vendida a la red eléctrica al amparo del R.D. 1578/2008. Así pues, mientras se abastece la demanda térmica del edificio, se generan unos ingresos por venta de energía eléctrica, todo de manera simultánea (figura B2). Esta es la aplicación donde se centra este trabajo, más concretamente se pretende implantar en la vivienda presentada para el proyecto de Solar Decathlon.

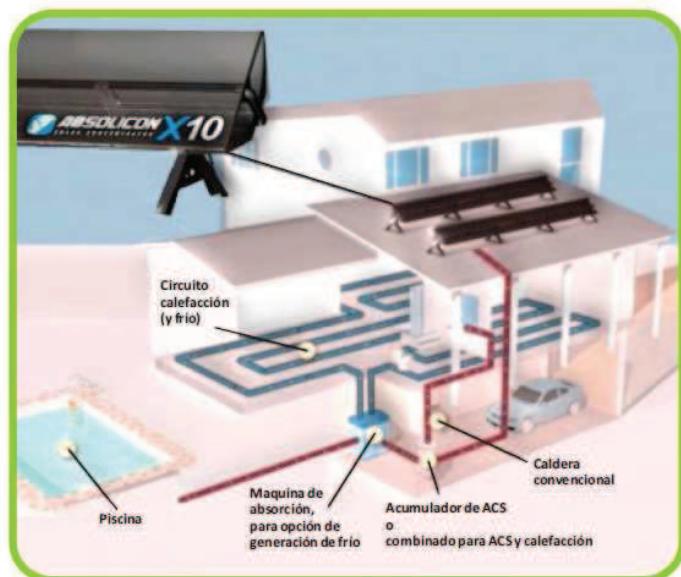


Figura B2. Aplicación del panel híbrido Absolicon x10 a viviendas unifamiliares.

- **Hoteles, hospitales, bloques de viviendas:** todos estos edificios poseen un consumo energético con unas características particulares (figura B3).

- El consumo de ACS es muy elevado, representando un gasto energético significativo
- Su consumo eléctrico también es significativo
- En algunos casos, su perfil de consumo a lo largo del año posee una coincidencia muy elevada con el perfil de radiación, es decir, los períodos de mayor ocupación coinciden con los de mayor radiación (hoteles, principalmente de verano).

Al igual que en viviendas unifamiliares puede utilizarse para ACS, lavanderías, piscinas, calefacción y refrigeración.



Figura B3. Aplicación del panel híbrido Absolicon x10 a hospitales, hoteles y bloques de viviendas

➤ Naves industriales y centros comerciales:

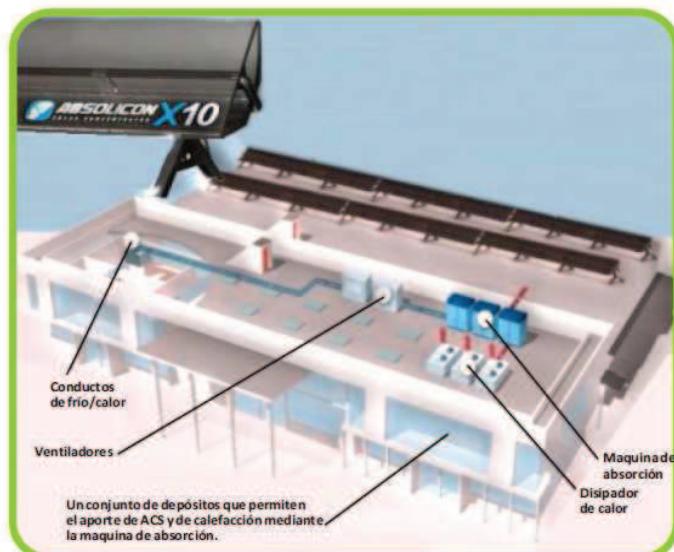


Figura B4. Aplicación del panel híbrido Absolicon x10 a naves industriales y centros comerciales.

➤ Industria

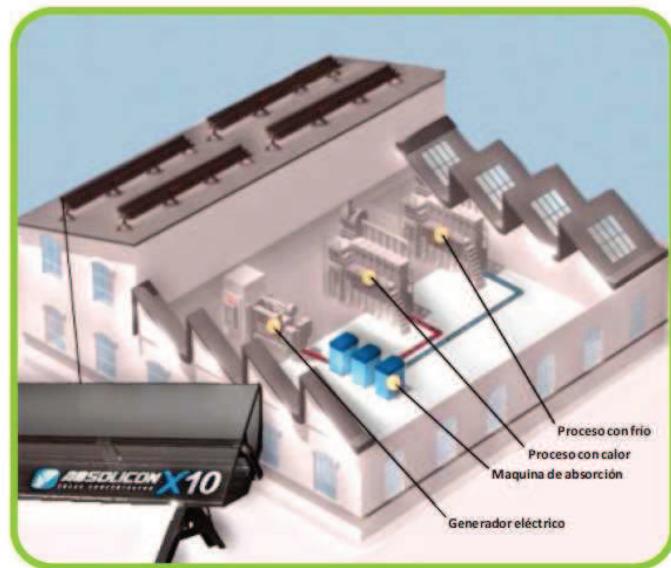


Figura B5. Aplicación del panel híbrido Absolicon x10 a la industria

B3. Diseño y componentes del panel

El panel híbrido tiene cuatro componentes principales (figura B6):

1. El reflector cilindro-parabólico, con su receptor.
2. El bastidor de sujeción.
3. Los actuadores de giro.
4. La central reguladora.

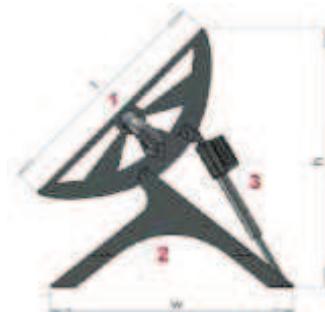


Figura B6. Componentes del receptor híbrido [24].

1. Reflector cilindro-parabólico y receptor

El reflector y el receptor se componen de 5 componentes principales (figura B7):

1. Los bastidores portantes de la carcasa.
2. La carcasa portante del reflector.
3. Vidrio templado antireflexivo.
4. El receptor.
5. La sujeción del receptor.

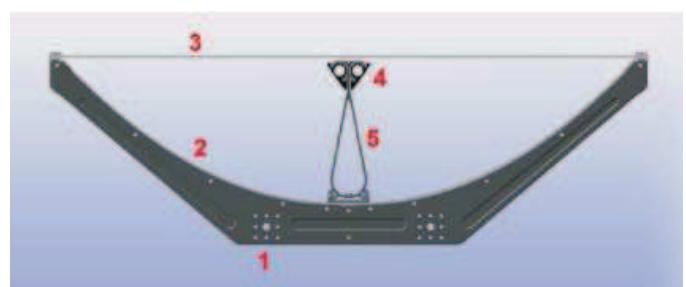


Figura B7. Componentes principales del receptor cilindro parabólico [24].

El receptor posee dos caras activas, cada una de las cuales recibe la luz de cada una de las dos mitades del reflector. Cada cara activa posee 17 células solares fotovoltaicas conectadas en serie, protegidas por un laminado superficial. Ambas caras activas envuelven unos tubos en el receptor, los cuales transportan, mediante un fluido portador, el calor generado (figura B8).

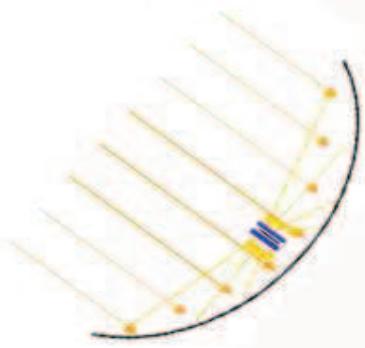


Figura B8. Concentración de los rayos solares sobre las células fotovoltaicas [24].

2 y 3. Actuadores de giro y Seguimiento

Para el seguimiento se emplean unos actuadores magnéticos especiales de giro (figura B9), que se controlan desde una unidad de control. El objetivo del sistema de giro es orientar el espejo reflector a la posición de verticalidad con respecto a la luz del sol. Toda la luz recibida verticalmente desde el sol, incidirá sobre el receptor y producirá calor y electricidad, mientras que toda la luz que reciba con un ángulo diferente, no interactuará con el receptor, siendo esto empleado como mecanismo de gestión de la seguridad.



Figura B9. Actuadores magnéticos de giro [24].

4. Central reguladora

La central reguladora es el núcleo de la instalación. Su función principal es controlar el seguimiento del sol, gestionar los sistemas de seguridad y gestionar el control de la instalación hidráulica

Anexo C: TRNSYS

Hoy en día, es fundamental que los diseñadores de instalaciones y equipos termoenergéticos tengan a su disposición de herramientas potentes y fiables para el cálculo y optimización de sistemas. El avance en los últimos años de la potencia de cálculo de los ordenadores y de los métodos numéricos, ha hecho posible la resolución de problemas en otras épocas inabordables.

Los sistemas termoenergéticos se caracterizan por exhibir una dependencia no lineal con las características meteorológicas. El uso de técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y de simulaciones transitorias constituye el complemento ideal a la siempre necesaria experimentación. El análisis de sistemas altamente complejos como pueda ser una instalación solar térmica completa para un edificio de viviendas puede realizarse de manera rápida con un software de simulación dinámica como TRNSYS. La simulación dinámica es órdenes de magnitud más rápida y órdenes de magnitud más económica que la experimentación, en la que pequeños cambios en el sistema pueden significar costes de tiempo y económicos elevados.

Con la potencia de cálculo de los ordenadores actuales, el estudio de sistemas complejos con la simulación detallada vía técnicas de discretización finitas es altamente costoso en tiempo y requiere el uso de computadoras de última generación, mientras que una simulación dinámica al nivel de TRNSYS puede realizarse en ordenadores personales. El análisis al detalle que permiten las técnicas CFD, aunque útil y necesario para ciertos problemas, no tiene mucho sentido cuando se pretende al análisis de sistemas completos donde hay un número grande de parámetros.

En este anexo, se ampliará la información del apartado 4.3, mostrando las principales características de TRNSYS, además de incluir los resultados y gráficas que muestran el similar comportamiento del colector parabólico con un colector plano de las mismas características. También se incluye otra comparación, esta vez entre la cobertura solar que se consigue según la orientación del colector parabólico, es decir, según el azimut. Por último, se mostrará el diseño de la instalación realizado con TRNSYS.

C1 Características principales de TRNSYS

TRNSYS es un solver de ecuaciones algebraicas y diferenciales que incorpora una librería con los más comunes sistemas termoenergéticos y diseñado especialmente para simulaciones transitorias. Adopta una estructura modular para la resolución de sistemas de componentes, donde cada uno de los componentes se describe mediante una subrutina que, en la nomenclatura que utiliza el programa, recibe el nombre de TYPE. Esta técnica modular permite analizar un sistema entero como la suma de componentes o sistemas individuales y la interconexión entre éstos. Cada type o subrutina contiene uno o varios modelos de un componente de sistema. Por ejemplo, la subrutina Type 4, es un modelo detallado de tanque de almacenamiento. Especificando los parámetros (valores independientes del tiempo como por ejemplo el volumen del tanque) y las variables de entrada (valores dependientes del tiempo como la temperatura del agua de entrada y el flujo máscico), el modelo calcula las variables de salida dependientes del tiempo (como por ejemplo, la temperatura del agua a la salida del tanque o la perdidas de calor a través de la pared del tanque). Estos valores de salida calculados pueden ser usados como variables de entrada para otros modelos.

La librería estándar de TRNSYS incluye la mayoría de componentes comúnmente encontrados en los sistemas termoenergéticos (desde equipamientos HVAC hasta edificios en forma detallada, desde controladores y sistemas de regulación hasta colectores solares), así como subrutinas de componentes que permiten tratar datos meteorológicos y otras funciones de carácter transitorio. TRNSYS también dispone de subrutinas que permiten el tratamiento y dar formato de salida a los resultados de las simulaciones. El usuario debe crear para simular un sistema un fichero de entrada para el ejecutable de TRNSYS que consiste en una descripción de los componentes que constituyen el sistema y sus interconexiones. Dicho ejecutable, resuelve los componentes del sistema e itera para cada instante de tiempo hasta que el sistema de ecuaciones converge.

Las simulaciones son de carácter transitorio y pueden realizarse en los rangos de espacios de tiempo especificados por el usuario: desde varias horas hasta varios segundos, dependiendo del tipo de proceso que requiera ser estudiado. La modularidad del programa permite al usuario tener tantos elementos, (bombas, refrigeradores, colectores solares, etc.), como sea necesario, en cualquier configuración.

Ya que los modelos de los componentes están escritos en FORTRAN, el usuario puede fácilmente modificarlos y generar nuevos componentes para tecnologías no incluidas en la librería estándar. Debido a que son muchos los usuarios de TRNSYS en todo el mundo existen librerías no estándar disponibles que simulan el comportamiento de otros componentes, desde bombas de calor y sistemas geotérmicos hasta modelos detallados de colectores solares, controladores o piscinas.

Pero TRNSYS no es simple y llanamente un solver de ecuaciones. El paquete completo incluye además de los códigos fuente de las subrutinas y el programa ejecutable, el entorno TRNSHELL que permite la edición de ficheros e incorpora en un solo programa las acciones necesarias para construir, ejecutar y analizar una simulación TRNSYS. A diferencia de muchas herramientas de simulación presentes en el mercado hoy en día, TRNSYS permite al usuario describir completamente y visualizar todas las interacciones entre componentes del sistema. Mediante una interface basada en iconos gráficos, el usuario directamente define los componentes de su sistema y los conecta. Mediante esta interface gráfica tiene la capacidad de definir los parámetros y variables de entrada de cada uno de los componentes del sistema y de crear el fichero de entrada para que el ejecutable TRNSYS pueda realizar la simulación.

C2 Comparación colector plano con colector parabólico

En el apartado 4.3 se han mostrado los valores de cobertura solar anual y de energía auxiliar necesaria para cubrir la demanda energética para el caso del colector parabólico y un colector plano con las mismas características térmicas y mismo tamaño de colector. Se observaba que los valores eran muy similares, por lo que se demostraba el buen diseño del colector CPC. A continuación se muestran las gráficas del rendimiento de los dos colectores para confirmar los datos de la tabla 4 de la memoria, en las que se muestran los cálculos obtenidos con TRNSYS para los dos tipos de colector simulados y en dos períodos determinados del año. Se observa como el colector CPC da un poco más de rendimiento pero al final como se veía en la tabla 4 del proyecto, los valores de energía auxiliar y de cobertura solar eran similares.

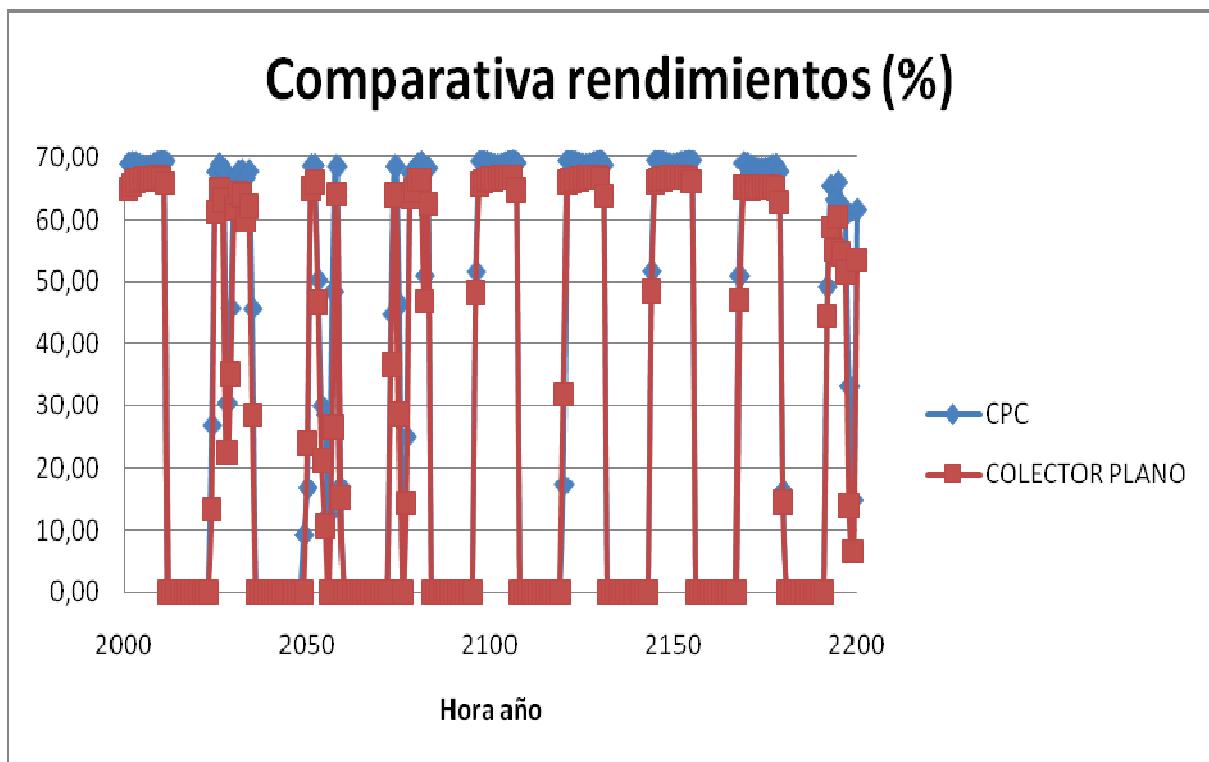


Figura C1. Comparativa entre rendimientos del colector plano y del CPC simulados con TRNSYS para el periodo del año, entre la hora 2001 y 2200.

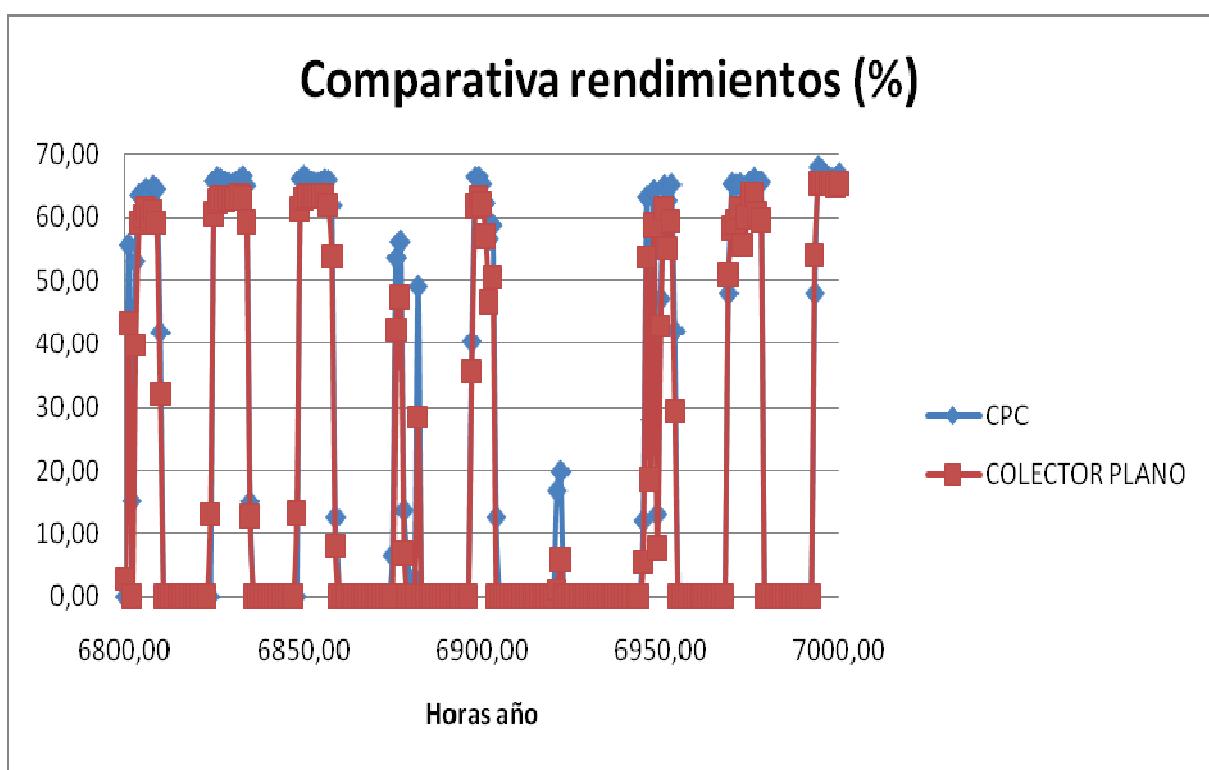


Figura C2. Comparativa entre rendimientos del colector plano y del CPC simulados con TRNSYS para el periodo del año, entre la hora 6801 y 7000.

C3 Comparación según orientación del colector parabólico

En este apartado del anexo se van a mostrar la tabla y la gráfica que demuestran porque se ha elegido la orientación Este – Oeste para el eje del colector parabólico y no otra. La razón va a ser como en los otros casos según las variables energía auxiliar y factor de cobertura solar.

Así pues, se han comparado dicha orientación Este – Oeste con la Norte – Sur, con el fin de conocer la que mejores resultados energéticos da. Una vez escogida la orientación óptima, habría que plantearse la integración arquitectónica pertinente. A continuación se muestra la tabla y gráfica, donde se demuestra que la mejor orientación es, como se expuso anteriormente, la Este – Oeste, que es además para la que la empresa Absolicon muestra sus datos en las especificaciones del fabricante.

Azimut	E_aux_ver (kWh)	E_aux_inv (kWh)	F_sol_ver (%)	F_sol_inv (%)	E_frig (kWh)	E_calef (kWh)
Este-Oeste	0,29	5652,77	99,97%	17,18%	929,43	6825,54
Norte-Sur	39,57	5861,46	95,74%	14,12%	929,43	6825,54

Tabla C1. Energías auxiliares y demandadas de refrigeración y calefacción, además de la fracción solar que cubre la instalación, en los dos sistemas en función de la orientación del colector parabólico.

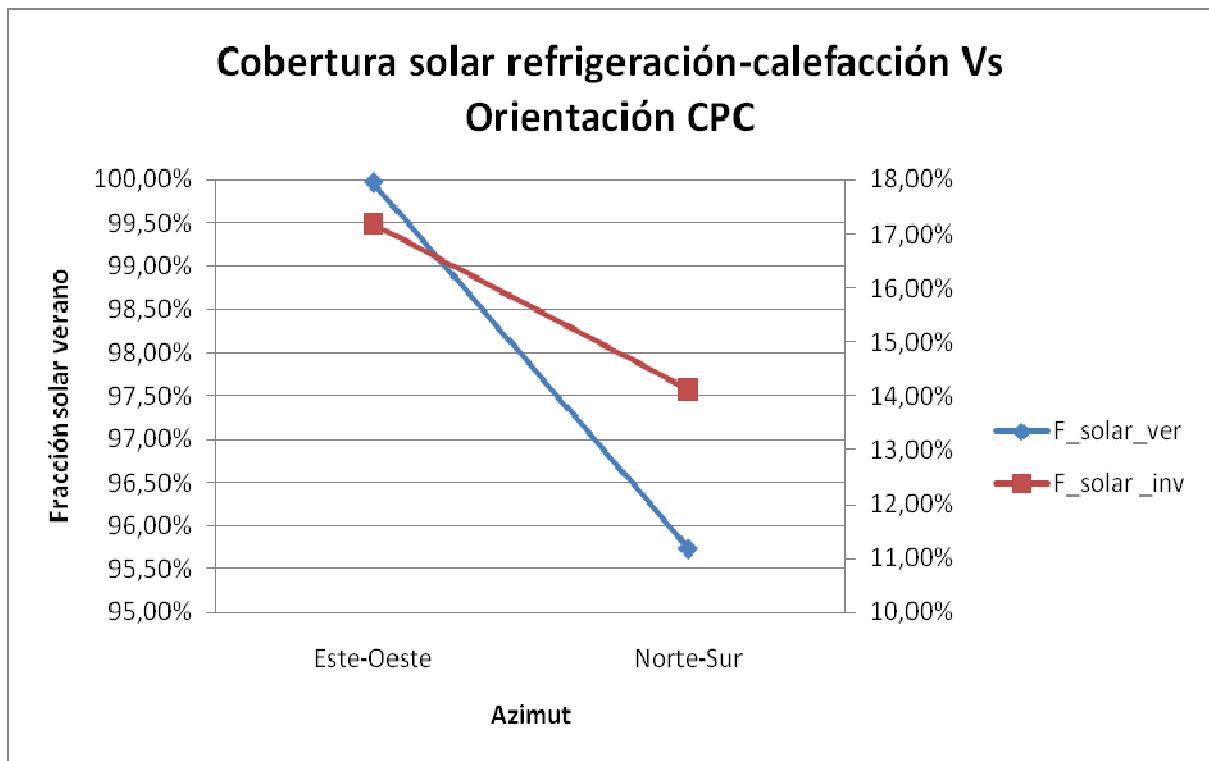


Figura C3. Relación entre la orientación del colector cilíndrico parabólico y el porcentaje de energía demandada que cubre la instalación, tanto de refrigeración como de calefacción.

C4 Esquema de instalación en TRNSYS

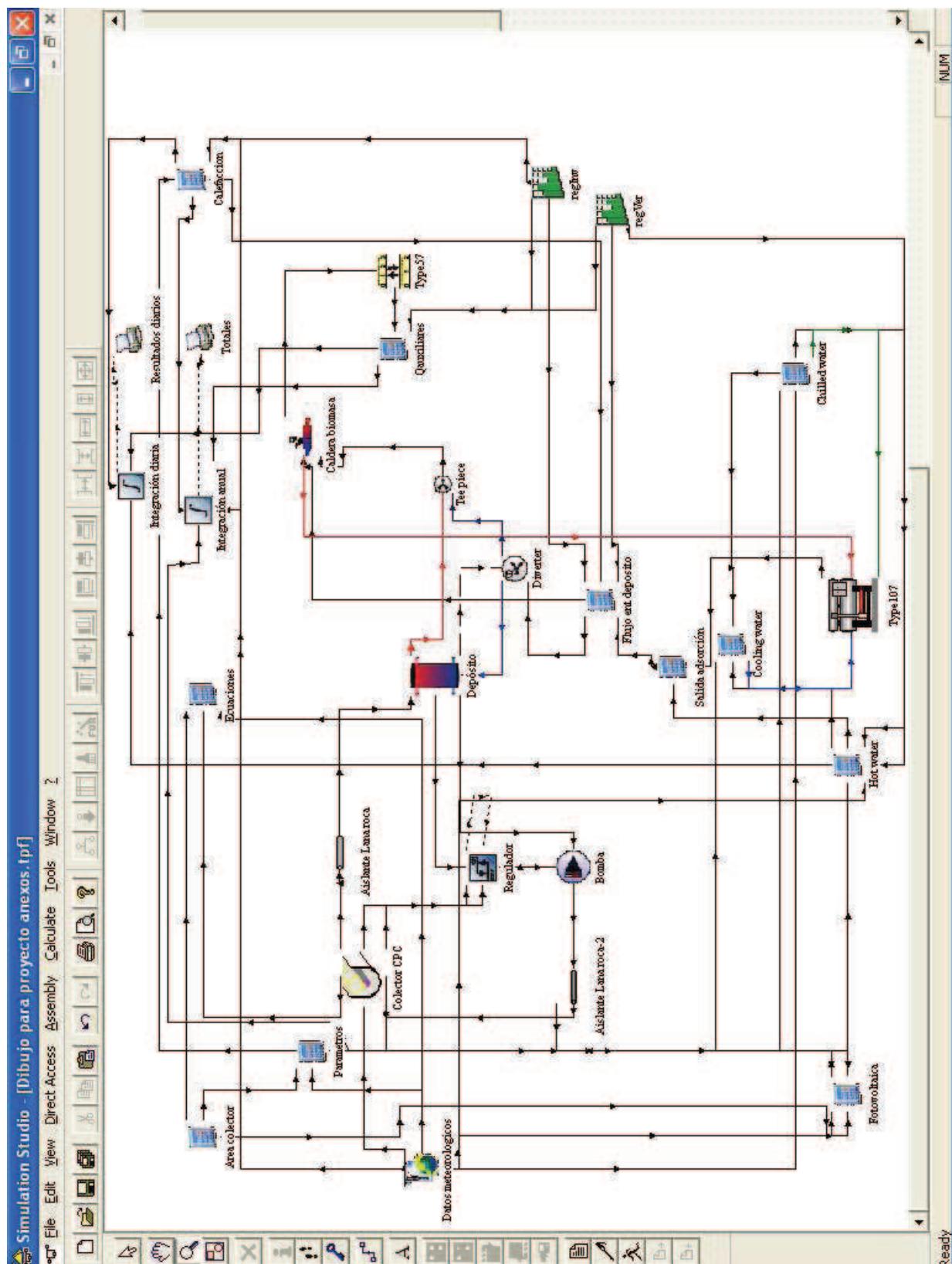


Figura C4. Esquema de la instalacion híbrida solar simulada en TRNSYS.