



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Diseño de una instalación solar térmica de agua caliente sanitaria para una residencia de estudiantes en la ciudad de La Habana

English tittle:

Design of a solar water system for a student's residence in Havana, Cuba

Autor/es

Eduardo Vecino Puente

Director/es

Amaya Martínez Gracia



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. _____,

con nº de DNI _____ en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
_____, (Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, _____

Fdo: _____



Resumen

El proyecto se enmarca dentro de una pasantía en el Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER) dentro el Campus universitario José Antonio Echevarría (CUJAE), facultad de ingeniería de la ciudad de La Habana en Cuba. En dicha pasantía se realizó un curso sobre energía solar térmica a modo de preparatorio para la realización del proyecto.

En el presente trabajo se realiza el diseño preliminar de una instalación solar térmica para el suministro de agua caliente sanitaria a una residencia de estudiantes en la facultad de ingeniería de la CUJAE, en la ciudad de La Habana (Cuba).

En primer lugar se estudian los elementos principales que componen un sistema de calentamiento de agua mediante la utilización de la energía solar.

Para el cálculo de la instalación se utiliza un método estático, para después analizar la instalación diseñada mediante un método dinámico, a fin de poder comparar los resultados obtenidos mediante ambos métodos.

Posteriormente se realiza el análisis de la viabilidad económico-medioambiental de la instalación, enmarcado dentro del desarrollo de la tecnología solar en Cuba. Para ello se compara el sistema de energía solar con un sistema de energía convencional.

Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los diversos análisis realizados en el proyecto y se plantea el trabajo futuro al que da pie el proyecto.



Índice

INTRODUCCIÓN

1 Fundamentación del problema	6
2 Diseño teórico y metodológico	7
3 Aportes y resultados esperados	8
4 Estructura general del informe	9

DESARROLLO

1 Bases de cálculo	10
1.1 Descripción de la edificación a intervenir	10
1.2 Consumo de agua caliente sanitaria	11
2 Descripción de la instalación	12
2.1 Funcionamiento básico	12
2.2 Circuito primario	13
2.3 Circuito secundario	15
2.4 Tuberías	16
2.5 Intercambiador de calor	17
2.6 Otros componentes	19
2.7 Sistema auxiliar de apoyo convencional	21
3 Cálculo y diseño de la instalación	21
3.1 Introducción	21
3.2 Cálculo del sistema de ACS por método estático	22
3.2.1 Captadores solares	22
3.2.2 Tanque de almacenamiento	27
3.2.3 Intercambiador de calor	28
3.2.4 Tuberías	29
3.2.5 Sistema de bombeo	30
3.2.6 Dimensionado de la caldera auxiliar	34
3.3 Comprobación de la instalación con método dinámico	34
3.3.1 Procedimiento de trabajo con la hoja Excel	35



3.3.2 Resultados del análisis.....	40
DIAGNÓSTICO DEL ESTADO REAL Y SOLUCIÓN PROPUESTA	
1 Análisis medioambiental	41
1.1 Introducción	41
1.2 Ahorro de energía convencional	41
1.3 Ahorro de emisiones de CO ₂ a la atmósfera.....	42
2 Análisis económico	43
2.1 Introducción	43
2.2 Presupuesto.....	44
2.3 Valor Actual Neto de la instalación	44
CONCLUSIONES FINALES	
1 Resumen de resultados	47
2 Conclusiones y trabajo futuro	48
3 Normas y referencias.....	49
3.1 Programas utilizados	49
3.2 Bibliografía	49
ANEXOS	
Anexo A: Fotos del emplazamiento.....	50
Anexo B: Valoración del trabajo por parte del tribunal docente del CETER. 53	



INTRODUCCIÓN

1 Fundamentación del problema

El incremento de la demanda energética en Cuba hace necesario el desarrollo de nuevas tecnologías que proporcionen alternativas al uso de combustibles fósiles, especialmente teniendo en cuenta la gran dependencia externa que tiene el país de ellos. Las condiciones climáticas de la isla hacen de la energía solar una fuente energética muy adecuada a las necesidades de su población.

La energía solar tiene una implementación bastante reducida en la isla, especialmente si tenemos en cuenta el potencial energético que presenta. Sin embargo de unos años a esta parte el gobierno está tratando de cambiar el modelo energético a uno más sostenible tanto medioambientalmente como desde el punto de vista económico y de la soberanía que éste cambio puede suponer. Aunque la isla cuenta con unas pequeñas reservas de petróleo que fueron encontradas unos años atrás, éstas no son suficientes para proporcionar un sistema energético adecuado a las necesidades de la población. Si bien hasta los años 90, previo a la caída del bloque socialista, la isla era provista de energía a partir de las relaciones comerciales con estos países, llegando incluso a iniciar la construcción de la planta nuclear Castillo de Jagua en la ciudad de Cienfuegos, a partir del colapso de la URSS la isla se sumió en una profunda crisis de la que, desde luego, la energía no fue una excepción. A partir de entonces y con el ascenso de los gobiernos progresistas en la región latinoamericana, Cuba luchó por hacerse un hueco en dicho mercado saltando el bloqueo económico que los EE.UU. imponen a Cuba y de esa manera poder solventar en gran medida el problema energético a través de países productores de crudo del continente, especialmente Venezuela. Sin embargo la inestabilidad política que parece que vuelve a Sudamérica y el ascenso de nuevos gobiernos hostiles a Cuba en la región, vuelve a poner de relieve la fragilidad del sistema energético cubano y su excesiva dependencia del extranjero en dicha materia.

A través de la energía solar se pueden satisfacer tanto las demandas de calor como las de electricidad. Si bien en este proyecto únicamente se va a diseñar el uso de la energía solar térmica para calentamiento de agua, ésta también puede suponer un importante ahorro eléctrico, por su posibilidad de producir refrigeración mediante bomba de absorción, reduciendo al mínimo el uso de energía eléctrica, siendo este uno de los grandes consumos domésticos en Cuba.



En cuanto a los beneficios que esta energía aporta, en relación a las fuentes energéticas convencionales, podemos destacar los siguientes:

- La energía solar no es contaminante ya que no requiere de emisión de gases de combustión de ningún tipo.
- No necesita de una red de distribución, por lo que una vez instalado tiene una autonomía que permite que esta fuente de energía se lleve a puntos aislados de los grandes núcleos sin problema.
- La energía solar es una fuente gratuita e inagotable de energía, por lo que puede ser una fuente de desarrollo e independencia importante para los países del llamado tercer mundo.
- Es una tecnología que está bien desarrollada y en constante perfeccionamiento, lo que brinda la posibilidad de una gran eficiencia en la captación de energía. También el costo de producción tiende a bajar, lo que facilita el acceso a esta energía.

También es importante destacar las desventajas que esta fuente energética conlleva:

- La potencia de la radiación solar fluctúa a lo largo del tiempo y en los distintos puntos geográficos. Destacar que la radiación solar es menor en invierno, lo cual es muy significativo porque es cuando mayor demanda hay. Para el caso concreto de Cuba, este problema no supone un gran reto por la suavidad de la temporada fría, pero en las regiones de mayor latitud es un gran problema a afrontar.
- Si bien una vez funcionando no hay un coste para obtener la energía mas allá de las reparaciones que el sistema pueda necesitar, la inversión inicial necesaria para instalar un sistema de captación solar térmica es elevado, por lo que es necesario un exhaustivo análisis económico.
- La energía solar térmica no se puede almacenar eficientemente, por lo que se hace necesaria la instalación de sistemas auxiliares de energía, que suplan el déficit cuando la energía solar no es suficiente.

2 Diseño teórico y metodológico

El motivo por el que este proyecto es llevado a cabo está enmarcado dentro de la necesidad global de producir energía sin consumir los recursos energéticos fósiles del planeta. El objeto de estudio del proyecto es analizar la utilización de sistemas de calentamiento mediante la energía solar. Ésta puede ser utilizada para muchos fines, como calefacción, refrigeración o secado, entre otras, pero nuestro proyecto se va a basar únicamente en la utilización de la



energía solar para la producción de agua caliente sanitaria. Así pues nuestro objetivo con el proyecto es diseñar una instalación de calentamiento de agua en la que se reduzca el consumo de combustibles fósiles para la producción de agua caliente sanitaria, y analizar la viabilidad económica y medioambiental de dicha instalación.

El desarrollo del proyecto ha seguido los siguientes pasos:

- Primeramente se tomó un curso de Energía Solar Térmica impartido en el CETER por el Dr. Cisneros para afianzar los conocimientos sobre este tipo de energía [Véase Anexo B].
- En segundo lugar hubo que analizar la residencia de estudiantes “El Hotelito”. Para ello se hizo una inspección visual de los elementos que lo componen y se tomaron las medidas necesarias para el conocimiento de las dimensiones, así cómo se consultó con la administración valores como la ocupación máxima permitida en cada habitación.
- Después hubo que obtener los datos meteorológicos del emplazamiento. Para ello se hizo una investigación consultando bibliografía disponible en el CETER y mediante búsqueda en Internet.
- El siguiente paso es el análisis de los elementos necesarios para el funcionamiento del sistema así como el cálculo y diseño de cada uno de los mismos mediante un método estático de cálculo.
- Con este diseño hecho, se analiza la instalación con un método de cálculo dinámico para poder comparar los resultados a través de ambos métodos.
- Con el sistema ya diseñado se procede a hacer el análisis medioambiental y económico para analizar la viabilidad del proyecto.

3 Aportes y resultados esperados

Del presente proyecto se espera obtener el diseño de la instalación solar térmica para el abastecimiento de agua caliente sanitaria de la residencia de estudiantes “El Hotelito”, situado dentro del “Campus Universitario José Antonio Echevarría”, en el municipio de Marianao, La Habana.

A partir de ese diseño, se espera obtener la idoneidad y beneficio del mismo en base a un análisis tanto económico como medioambiental, obteniendo así el tiempo de recuperación de la inversión en base al precio del fuel, así como el ahorro de emisiones que esta instalación supone.



4 Estructura general del informe

En cuanto a la estructura general del informe, éste está separado en cuatro grandes capítulos:

1. **INTRODUCCIÓN:** Donde se fundamenta el problema y hace la función de hoja de presentación del proyecto, dando una idea general de los propósitos del mismo así como de la metodología implementada para conseguirlos.
2. **DESARROLLO:** Es el cuerpo como tal del proyecto, en el que se desarrolla la metodología para la obtención de los propósitos del proyecto. Está dividido a su vez en 3 capítulos:
 - **Bases de cálculo:** Donde se analizan los elementos a partir de los cuales se parten, como la edificación a trabajar o el consumo total energético.
 - **Descripción de la instalación:** Aquí se describen los distintos elementos que una instalación de ACS mediante energía solar necesita.
 - **Cálculo y diseño de la instalación:** El objetivo de este apartado es el dimensionado y selección en catálogo de los elementos que en la descripción de la instalación se explicaron, así como la comparación de resultados entre método estático y dinámico.
3. **DIANÓSTICO DEL ESTADO REAL Y SOLUCIÓN PROPUESTA:** En este apartado se analiza comparación tanto medioambiental como económica entre el sistema de producción energética convencional y el de producción mediante energía solar.
4. **CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJO FUTURO:** En primer lugar, se realiza un resumen de todo lo desarrollado durante la realización del proyecto. Tras eso se plantea el trabajo a futuro que el proyecto produce.



DESARROLLO

1 Bases de cálculo

1.1 Descripción de la edificación a intervenir

El edificio “El Hotelito de la CUJAE” es una residencia de estudiantes emplazada en el campus universitario José Antonio Echevarría, en el municipio de Marianao, en la ciudad de La Habana [Véase Anexo A].

La edificación cuenta con 36 habitaciones y es una edificación simétrica de forma que 18 de las habitaciones se encuentran a cada lado del edificio. A continuación se expone un dibujo esquemático del perfil de la edificación, mostrando uno de los dos lados que la componen.

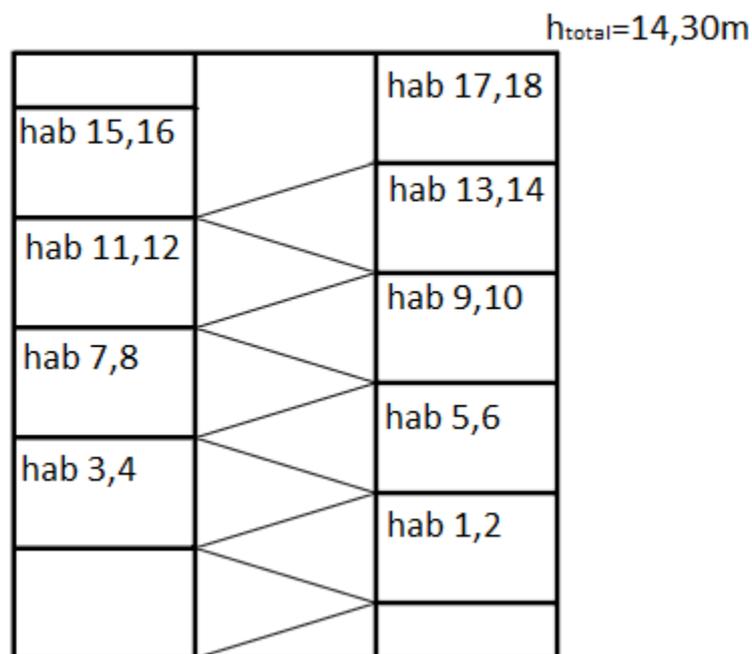


Figura 1-1: Esquema del perfil de un ala del hotelito.

Y el siguiente esquema se corresponde con la planta del edificio. Si bien éste está techado completamente, se ha representado la vista desde arriba sin él. Las cotas están expresadas en cm.

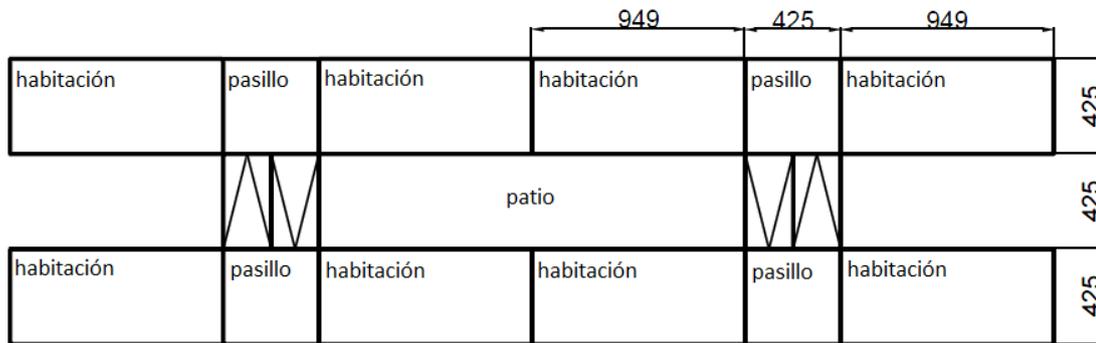


Figura 1-2: Esquema de la planta del hotelito.

Destacar que, como se ve en el perfil, las habitaciones están situadas en alturas intercaladas.

1.2 Consumo de agua caliente sanitaria

A fin de evitar los problemas derivados de la legionela, el agua se calentará a 60°C, aunque la temperatura de consumo de agua caliente es de 45°. Eso lo que implica es que, si bien el consumo de agua a 60°C es el que se ve en la gráfica correspondiente, el consumo total de agua caliente es mayor, ya que el agua a 60°C tendrá que ser mezclada con agua fría de red para alcanzar la demanda a 45°C requerida.

Para conocer la demanda de ACS, nos basaremos en los datos ofrecidos por HE4 [1]. En nuestro caso deberemos seleccionar el uso de residencia estudiantil en la tabla 1-1.

Vemos que el consumo es de 55l/día por cama en una residencia de estudiantes. Para calcular la demanda total, es necesario conocer que la residencia cuenta con 36 habitaciones con una capacidad máxima de 3 ocupantes por habitación. De esta manera, obtenido para máxima ocupación:

$$\dot{V}_{ACS} = 55 \frac{l}{día \cdot cama} \cdot 36 \text{ hab} \cdot 3 \frac{cama}{hab} = 5940 \frac{l}{día} \quad (1.1)$$



Criterio de consumo de ACS para diseño de instalaciones	
Tipo de edificio	Litros/día a 60 °C
Viviendas unifamiliares	30 por persona
Viviendas multifamiliares	22 por persona
Hospitales y clínicas	55 por cama
Hotel 4*	70 por cama
Hotel 3*	55 por cama
Hotel/Hostal 2*	40 por cama
Hostal/Pensión 1*	35 por cama
Camping	40 por emplazamiento
Residencias (ancianos, estudiantes, etc.)	55 por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	15 por servicio
Escuela	3 por alumno
Cuarteles	20 por persona
Fábricas y talleres	15 por persona
Administrativos	3 por persona
Gimnasios	20 a 25 por usuario
Lavanderías	3 a 5 por kg de ropa
Restaurantes	5 a 10 por comida
Cafeterías	1 por almuerzo

Tabla 1-1: Demanda de ACS según uso. Fuente: HE4.

2 Descripción de la instalación

2.1 Funcionamiento básico

El diseño más usual de una instalación de calentamiento de agua a través de la energía solar cuenta, principalmente, con los colectores solares, un intercambiador de calor, un tanque de almacenamiento y el sistema de calentamiento auxiliar, tal y como se expone en la figura 2-1. Además son necesarios otros elementos auxiliares tales como bombas o vasos de expansión.

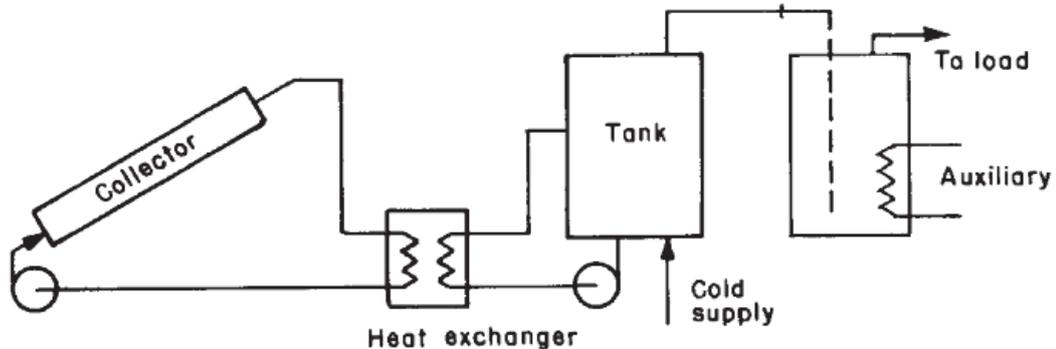


Figura 2-1: Esquema básico de una instalación solar de baja temperatura[2].

Esta disposición de la instalación consta de dos partes diferenciadas, un circuito primario, que es el compuesto por el colector y por cuyo interior circula un fluido caloportador cuya función es calentarse a su paso por el colector y después ceder ese calor en el intercambiador al agua que circula por el circuito secundario. El circuito secundario es el encargado de mantener el agua caliente en el tanque lista para su uso cuando sea demandada.

Es de vital importancia analizar correctamente la coordinación entre el calentamiento por energía solar y el suministrado por el sistema de calentamiento auxiliar, teniendo siempre presente que, como el objetivo de la instalación es reducir el consumo de energía convencional, siempre habrá que darle prioridad al uso de la energía solar sobre el calentador auxiliar.

2.2 Circuito primario

El circuito primario es el encargado de absorber la energía proveniente del sol para después ser utilizada, transfiriéndola mediante el intercambiador de calor al circuito secundario[3]. Como se ha dicho, el elemento más importante de este circuito es el colector solar.

Los componentes necesarios para el funcionamiento de un colector son los siguientes:

- Carcasa: Su función es ser el elemento estructural del conjunto, es decir, proteger y soportar los diversos elementos que constituyen al colector. Por su función protectora es importante que sea resistente a la corrosión y a los cambios de temperaturas.
- Cubierta transparente: Su función es dejar entrar la radiación solar y provocar un efecto invernadero en su interior, que incrementa la cesión de calor al fluido caloportador. Por ello es muy importante que tenga un alto coeficiente de transmisión de la irradiación. También es importante que tenga un bajo coeficiente de conductividad térmica, a fin de evitar cesiones de calor al exterior.



- Superficie absorbente: Su objetivo es recibir la irradiación y transformarla en calor que se cede al fluido caloportador que circula por el colector. Puede estar formada por placas o por tubos aleteados, a fin de asegurar un óptimo aprovechamiento de la irradiación. A fin de asegurar un uso óptimo, tiene que contar con una alta absorptividad y una baja emisividad.
- Aislamiento térmico: Recubre al colector y su finalidad es evitar que el calor se ceda al ambiente. Tiene que ser estable ante las variaciones de temperatura, tener una baja conductividad térmica y ser resistente a la humedad y la corrosión a fin de asegurar un correcto funcionamiento durante toda su vida útil.

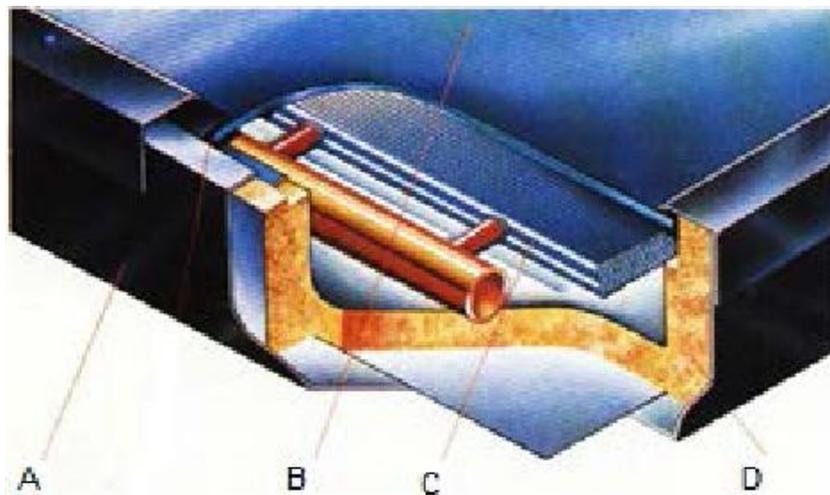


Figura 2-2: Partes de un colector solar con cubierta. A: Carcasa. B: Cubierta transparente. C: Superficie absorbente. D: Aislamiento térmico.[3]

A fin del diseño de un intercambiador de placas, el dato técnico más importante que éste ofrece es su curva de rendimiento. Ésta curva nos da la relación de la energía solar total aprovechada en el fluido caloportador en función de la temperatura del fluido en el paso por la placa. Ésta curva viene dada por tres factores:

- η_0 : Nos da el valor del rendimiento cuando la temperatura de la placa esta adecuada a la del ambiente. Es el punto de corte de la gráfica con el eje de ordenadas.
- a_1 : Es el valor del coeficiente lineal de la gráfica. Sus unidades son $(W/m^2)/K$.
- a_2 : Es el valor del coeficiente cuadrático de la gráfica. Sus unidades son $[(W/m^2)/K]^2$. Este valor, si la curva de la gráfica se aproxima mucho a una gráfica lineal no es necesario.

De esta forma la ecuación quedaría:



$$\eta = \eta_0 - a1 \cdot X - a2 \cdot X^2 \quad (1.2)$$

Donde X es la relación entre la energía solar recibida por metro cuadrado y la diferencia de temperatura entre el ambiente y la placa.

2.3 Circuito secundario

Este circuito es el encargado de almacenar la energía recogida por el colector y suministrarla al consumo[2]. El elemento principal de este circuito es el tanque de almacenamiento.

Su función es almacenar la energía en forma de agua caliente. La necesidad de este elemento viene determinada por el hecho de que la disponibilidad de energía solar y la demanda de agua caliente no tienen por qué coincidir, lo que hace estrictamente necesario disponer de un sistema que almacene el agua que se calienta cuando hay disponibilidad de energía solar y la libere cuando se demande.

A continuación se exponen las características más importantes de un tanque de almacenamiento para obtener un buen rendimiento de éste:

- El aislamiento del tanque tiene que ser lo mejor posible, para evitar la transferencia de calor entre el agua caliente a 60°C y el ambiente más frío.
- Debe existir una válvula de expansión a modo de seguridad que asegure la evacuación del vapor si se superasen los 100°C.
- El tanque debe estar conectado mediante una válvula al agua de red, para compensar el caudal de agua que sale del depósito hacia el consumo.
- El volumen del tanque debe estar adecuado a la demanda de agua. Éste se suele determinar en función del área de captación, de modo que sea capaz de recoger toda la energía solar de un día de irradiación normal.
- A fin de favorecer la estratificación para suministrar agua caliente a temperatura constante, la altura deberá ser mayor que el diámetro. Una buena relación suele ser 2:1.
- También es importante que la relación entre la superficie exterior y el volumen sea bajo, para, de esa manera, reducir las pérdidas de calor.
- Si bien no es necesario, también es conveniente instalar una protección catódica a fin de proteger al depósito de la corrosión. Ésta deberá ser cambiada regularmente.
- Al tener agua almacenada a 60°C y ser necesaria una demanda de agua caliente a 45°C, será necesaria una conexión entre el agua calentada por el sistema solar y el agua de red para que el agua suministrada se adecúe a la demandada.

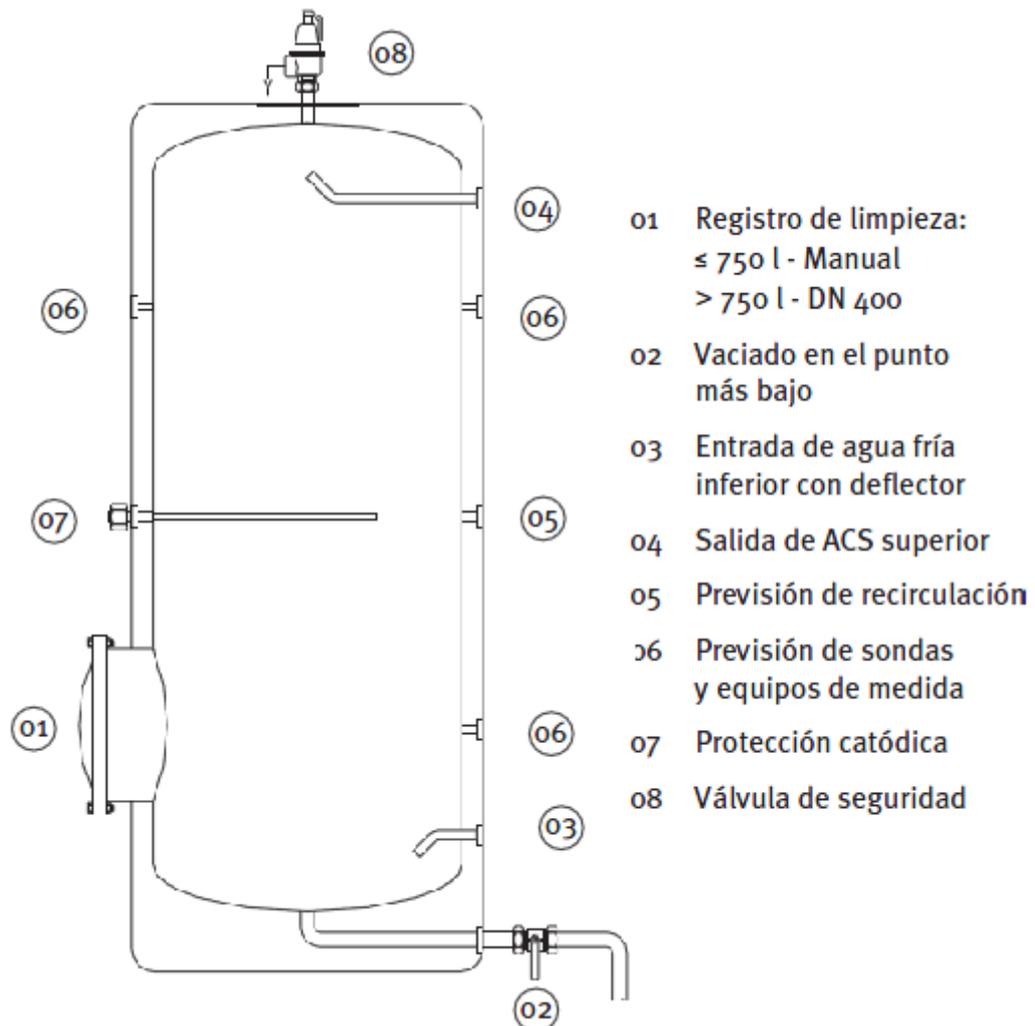


Figura 2-3: Conexiones necesarias en acumuladores[4]

2.4 Tuberías

Las tuberías son el soporte principal por el que circulará el agua[4]. En base a las recomendaciones del RITE es importante tener en cuenta los siguientes aspectos a la hora de seleccionar el modelo de tubería a instalar:

- Compatibilidad con el fluido de trabajo: En este caso agua para consumo humano. Se debe cuidar que el material de la tubería no afecte a la composición del agua ni produzca ningún tipo de reacción. En el mismo RITE se exponen unas tablas a fin de seleccionar el material que serán consultadas cuando se calcule la instalación.
- Presión de trabajo: Hay que asegurarse de que las tuberías son capaces de soportar la presión de trabajo de la instalación. En principio si las tuberías son metálicas no tiene por qué haber



problema, pero en caso de tuberías termoplásticas es un factor a tener muy en cuenta teniéndolo en cuenta también en función de la temperatura.

- Temperatura de trabajo: De la misma manera que la presión, hay que asegurarse que la tubería es capaz de soportar la temperatura de trabajo a la que va a ser sometida.

Los accesorios y uniones de tuberías tienen que cumplir con las mismas condiciones impuestas para las tuberías. En muchas ocasiones éstas son las limitantes por ser el punto más débil de la instalación.

2.5 Intercambiador de calor

Para instalaciones de éste tipo existen dos grandes tipos de intercambiadores[5]:

- Intercambiadores internos
Éstos tienen la particularidad de estar introducidos dentro del tanque de almacenamiento, haciendo circular por dentro de un serpentín el fluido caloportador y calentando directamente el agua dentro del mismo tanque. La principal ventaja que presentan respecto de los intercambiadores externos es que al estar dentro del tanque, se reduce considerablemente el calor cedido del intercambiador al ambiente.
- Intercambiadores externos
A diferencia de los anteriores, éstos están situados fuera del tanque, haciendo necesaria una instalación que haga fluir el agua del tanque al mismo y luego la devuelva dentro. La principal ventaja de éste tipo de intercambiadores es la facilidad que tienen de mantenimiento, ya que al no ser una pieza acoplada al interior del tanque, su desmontaje requiere de muchos menos problemas.

Para este proyecto se ha determinado que seleccionaremos un intercambiador de tipo externo. Éste será de placas por ser el tipo más adecuado para este tipo de instalaciones.

Un intercambiador de placas está compuesto por una serie de placas metálicas corrugadas con gran conducción, y atornillado a dos placas que ejercen el papel de tapas. Una gran ventaja es que se adaptan bien a distintos valores de potencia a intercambiar, únicamente cambiando el número de placas del intercambiador.

Un intercambiador de placas está formado por dos elementos principales:



- Bastidor
Forma la estructura del intercambiador de calor, y su función es aportar la rigidez y estabilidad al conjunto. Es el encargado de que las placas se mantengan unidas.
- Placas
Son el elemento fundamental del intercambiador, y consisten en láminas delgadas de baja resistencia térmica. Éstas están corrugadas a fin de favorecer la turbulencia del fluido, optimizando así la transferencia de calor.

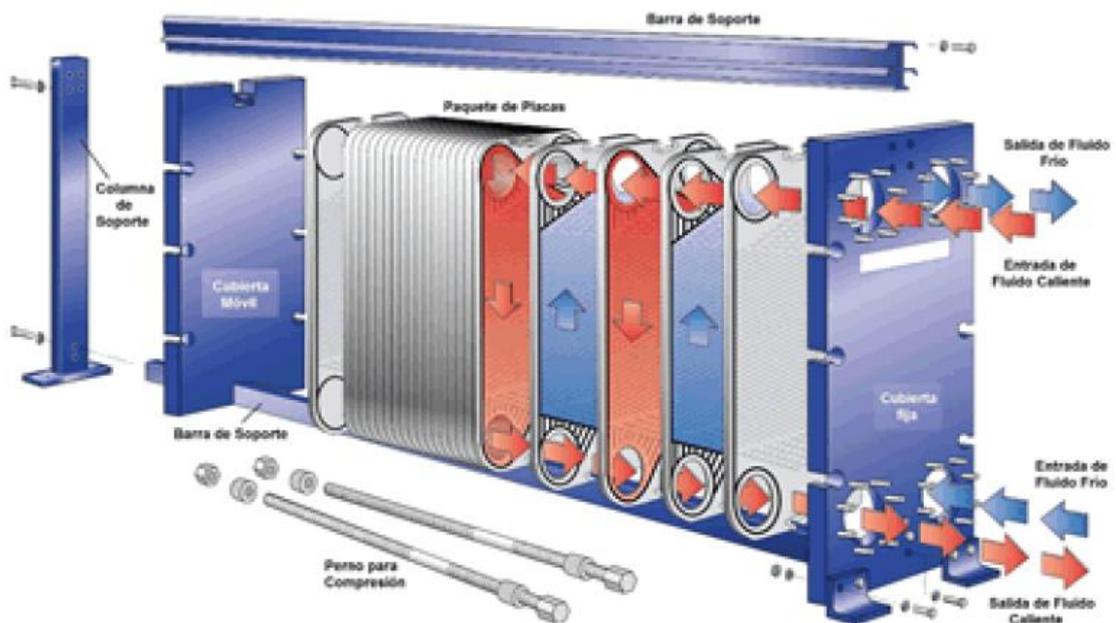


Figura 2-4: Componentes de un intercambiador de calor de placas.

El esquema de funcionamiento de un intercambiador de placas es el que se ve en la figura siguiente, de tal forma que un fluido circula por los canales pares y el otro por los impares haciendo así que nunca entren en contacto.

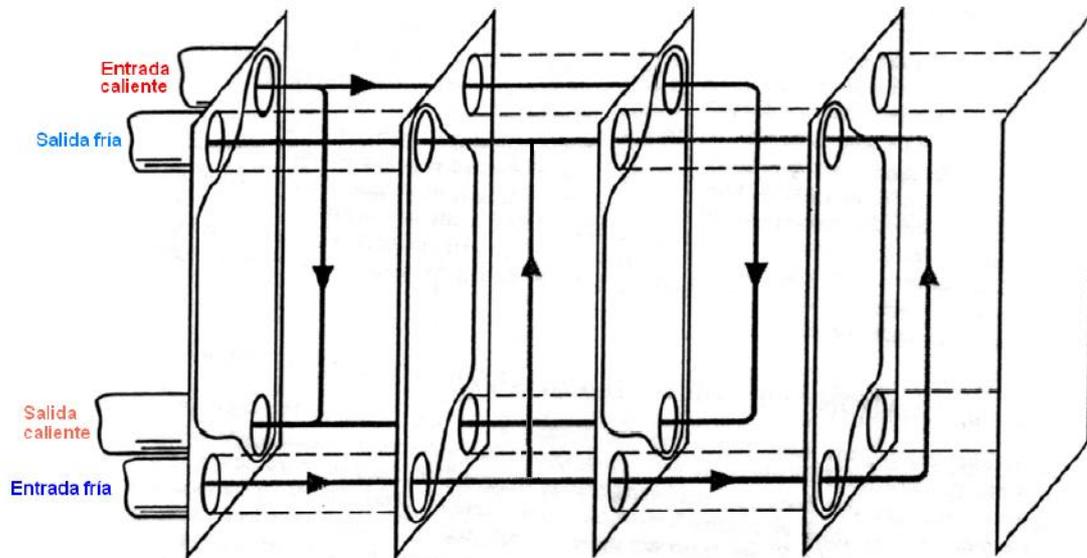


Figura 2-5: Funcionamiento de un intercambiador de calor de placas.

2.6 Otros componentes

- Bomba de circulación del fluido:

Su función es aportar la presión necesaria para la circulación del fluido de trabajo. Para ello será necesario conocer la presión de trabajo requerida en la instalación.

Se instalarán en las zonas más frías del circuito a fin de protegerlas de la corrosión y el desgaste.

Habrá que seleccionar la bomba que, para la presión y caudal del circuito, presente las mejores características de rendimiento.

- Vaso de expansión:

Su función es absorber las variaciones de volumen en el circuito, debidas a variaciones de presión y temperatura del fluido de trabajo. Éstos pueden ser abiertos o cerrados. Los abiertos están en comunicación con la atmósfera y también sirven para eliminar los vapores a la atmósfera y los cerrados, cuya principal ventaja es que permite la operación a presiones superiores a la atmosférica. También presentan otras ventajas tales como la no necesidad de aislamiento, no absorción de oxígeno del aire o posibilidad de montaje en cualquier punto.

Por estas ventajas se determina que para esta instalación se utilizarán vasos de expansión de tipo cerrado.



- Purgador de aire o de vapor:

Sirve para permitir la salida del aire acumulado en el circuito. Su colocación se realiza en los puntos altos de la salida de baterías de colectores, para evitar que se hielen, lo cual no es de especial interés en La Habana, y no se acumule agua en las líneas.

A fin de que cumplan bien su función, el circuito debe presentar características que permitan que el aire atrapado se desplace hacia puntos altos. Por ello, las tuberías horizontales siempre deben tener al menos una pendiente del 1% en el sentido de la circulación.

- Aerotermo:

Se utilizan para evitar posibles sobrecalentamientos. Su instalación se realiza en la cubierta, a poder ser en un lugar sombreado.

- Válvulas de corte:

Estas válvulas permiten interrumpir manualmente la circulación del fluido en diferentes tramos del circuito. La utilidad de esto es, por ejemplo, para poder realizar las actividades de mantenimiento o reparación del circuito.

- Válvulas de equilibrado:

Permiten regular el caudal y las pérdidas de carga del circuito.

- Válvulas antirretorno:

Su función es impedir la circulación del fluido en sentido contrario al deseado. Su instalación es importante especialmente en los las tomas de llenado y en el circuito primario solar.

- Válvulas de vaciado:

Deben estar situadas en los puntos bajos la instalación y su función es permitir el vaciado de la instalación para actividades de reparación o sustitución de elementos del circuito.



- Válvulas de seguridad:

Limitan la presión máxima del circuito, a fin de asegurar que en ningún momento se supere la presión máxima de trabajo de ningún componente en la instalación, evitando así roturas.

- Flitros:

Su función es retener las impurezas del fluido para proteger del desgaste elementos tales como las bombas o las válvulas.

2.7 Sistema auxiliar de apoyo convencional

Su función es proveer la energía necesaria para cumplir con la demanda total de energía en aquellos momentos en que el sistema de energía solar no sea capaz. Para ello se requerirá de un sistema de calentamiento alimentado por energía convencional. Será necesario que ésta esté vinculada a un sistema de control automático que regule su puesta en marcha y su apagado.

Éste sistema normalmente está alimentado mediante un sistema eléctrico o mediante combustibles fósiles. Normalmente el sistema eléctrico es para equipos pequeños, suministrando la energía a través de una resistencia. En cuanto a las calderas de gas o gasóleo, su función es más variable, pudiendo alimentar desde pequeños sistemas hasta otros mucho más grandes, en función del tamaño de la caldera.

Elegiremos la caldera de gas, por ser ésta una fuente de energía más barata que la electricidad en Cuba. Además ésta será diseñada para cubrir toda la demanda de ACS, por si sucede una imposibilidad de aporte solar en la instalación.

Estará situada a la salida del tanque de almacenamiento y será regulada por un controlador automático que dará más o menos potencia en función de la temperatura a la que el agua salga del tanque.

3 Cálculo y diseño de la instalación

3.1 Introducción

En un primer paso se calculará la instalación y los elementos que la componen a través de un método estático, esto es a partir de los datos de radiación media en cada mes del año. A partir de esa dimensión de la instalación en un siguiente apartado se analizará su comportamiento a través de un método dinámico para poder comparar ambos análisis.



La principal diferencia entre ambos métodos radica en que la discretización de la energía es más fina en los métodos dinámicos ya que se basan en una distribución horaria de la energía disponible y el consumo, de tal forma que se puede analizar mejor la energía real que se puede aprovechar en el calentamiento de agua a lo largo del día, porque al no coincidir temporalmente la demanda y el consumo, el hecho de que haya energía diaria suficiente para cubrir una determinada fracción solar, no indica que ésta vaya a serlo realmente. Por este motivo es de esperar que en ningún caso la fracción solar obtenida mediante un método dinámico supere a la obtenida mediante un método estático, como máximo podrá ser igual.

3.2 Cálculo del sistema de ACS por método estático

3.2.1 Captadores solares

Para el cálculo del sistema vamos a utilizar el método F-Chart que nos determinará la superficie de placa necesaria para cubrir una determinada fracción solar. El método F-Chart se basa en correlaciones de parámetros adimensionales, que fueron obtenidas numéricamente[2].

Para la resolución del sistema se empleará el programa resolutorio de ecuaciones EES. En un primer momento se calculará la instalación para las condiciones de un mes con las características promedio de todo el año y para una fracción solar del 70%. Este valor se ha elegido por el hecho de que al no tener Cuba una legislación clara al respecto, se ha utilizado la legislación española, haciendo corresponder La Habana con el valor de las zonas climáticas con una radiación solar más parecida y mayor proximidad en cuanto a la distancia del ecuador, como son las Islas Canarias o las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Después, a partir de esa superficie, se comprobará para cada mes la fracción solar que se cubre y se hará una valoración a partir de ello.

Se han seleccionado tres tipos diferentes de colectores, para hacer una selección:

- Colectores solares planos modelo CPC/ML3.0 TINOX, del distribuidor Salvador Escoda, cuyas características técnicas son las que se ven en la tabla 3-1. Éstos tienen un precio de 715€ por colector.



DATOS TÉCNICOS:

Modelo	CPC/ML 3.0 TINOX
Dimens. ext. LxAxH mm	2300x1240 x77
S. Total m ²	2,88
S. absorción m ²	2,58
Rendimiento	
n ₀	0,78
a ¹ W/m ² /K	3

Tabla 3-1: Datos técnicos del colector solar plano CPC/ML3.0 TINOX.

- Colector de alto rendimiento TERMOCAN serie NEO modelo 20, que tiene un precio de 595€ por colector y cuyas características técnicas son las que se exponen en la tabla 3-2.

		NEO 20
Largo	mm	2.098
Ancho	mm	1.056
Fondo	mm	94,5
Área Total	m ²	2,22
Área Útil	m ²	2,00
Peso	kg	40,0
Cap. Fluido	L	1,50
Caudal R.	l/h	90
Salidas		4x22
η	%	75,70
a ₁	W/m ² ·K	3,994

Tabla 3-2: Datos técnicos del colector solar de alto rendimiento TERMOCAN NEO20.

- Colector de tubos al vacío TUBOSOL 3000-20R, con un precio de 690€ por colector, y características técnicas expuestas en la tabla 3-3:

Modelo	Nº de tubos	Altura/ Diámetro de tubos de vacío (mm)	Área absorbente (M2)	Área de apertura (M2)	Área total	Peso (kg)	A (mm)	B (mm)	C (mm)
Am_Tubosol 3000-20R	20	1800/58	1607	1860	3377	73	1698	1560	2010
			η ₀	0,85					
			a ₁	1,53					

Tabla 3-3: Datos técnicos del colector solar de tubos al vacío TUBOSOL 3000-20R.



La energía necesaria para calentar 5940 litros de agua a 60°C en los distintos meses del año viene dada en la tabla 3-2, así como la energía necesaria para el mes promedio del año. La energía necesaria para calentar el agua desde la temperatura de red hasta los 60°C se obtiene a partir de la siguiente ecuación[6]:

$$\text{Consumo} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{mes}} \right] = \dot{m}_{\text{agua}} \left[\frac{\text{l}}{\text{mes}} \right] \cdot c_{p_{\text{agua}}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{°C} \cdot \text{l}} \right] \cdot (60[\text{°C}] - T_{\text{red}}[\text{°C}]) \quad (1.3)$$

	Temperatura de red (°C)	Número de días	Consumo mes (kWh)	Consumo mes (kJ)
Enero	15	31	9612,11	34603588,8
Febrero	15	28	8681,90	31254854,4
Marzo	16	31	9398,51	33834620,2
Abril	16	30	9095,33	32743180,8
Mayo	17	31	9184,90	33065651,5
Junio	18	30	8681,90	31254854,4
Julio	20	31	8544,10	30758745,6
Agosto	20	31	8544,10	30758745,6
Septiembre	20	30	8268,48	29766528
Octubre	18	31	8971,30	32296682,9
Noviembre	17	30	8888,62	31999017,6
Diciembre	16	31	9398,51	33834620,2
MEDIA	17,33	30,42		32299872

Tabla 3-2: Consumo mensual de energía para ACS en El Hotelito.

En primer lugar impondremos la ecuación que determina el valor de X, siendo el significado del parámetro X la expresión de la relación entre las pérdidas de energía en el captador para una determinada temperatura y la energía necesaria durante un mes:

$$X = \frac{\text{energía perdida captador}}{\text{energía necesaria mensual}} \quad (1.4)$$

Y la ecuación para obtener el parámetro:

$$X = F_R U_L \frac{F'_R}{F_R} (t_{ref} - \bar{t}_a) \Delta\tau \frac{A_c}{q_{total}} \quad (1.5)$$

Donde:

- $F_R U_L$ es una característica propia del colector solar seleccionado, y dado por el fabricante que hace referencia al rendimiento del mismo en nuestro caso tiene un valor de 3.



- F'_R/F_R no será considerado por lo que se le impone valor 1 al ratio.
- La temperatura tomada de referencia es la de ebullición del agua, por lo que serán tomados 100°C y la temperatura ambiente media en La Habana es de 22,3°C.
- El valor de ΔT se corresponde con el número de segundos que un mes promedio del año (30,42 días) tiene.
- A_c será la incógnita que quede a despejar dentro del sistema de ecuaciones para fijar una F.S. de 0,7
- El q_{total} está obtenido en la tabla arriba y para un mes promedio tiene un valor de 32299872000 J.

Ahora es necesario imponer la ecuación del factor Y, siendo éste parámetro la expresión de la relación entre la energía absorbida por la placa del captador solar y la energía necesaria durante un mes.

$$Y = \frac{\text{energía absorbida captador}}{\text{energía necesaria mensual}} \quad (1.6)$$

Siendo la ecuación del parámetro:

$$Y = F_R(\tau\alpha)_n \frac{F'_R}{F_R} \left[\frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n} \right] \bar{H}_t N \frac{A_c}{q_{total}} \quad (1.7)$$

Donde:

- $F_R(\tau\alpha)$ también hace referencia al rendimiento de captación de los colectores solares. En este caso el valor del mismo es de 0,78.
- El coeficiente $\frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n}$ tendrá valor 1.
- \bar{H}_t es la cantidad de radiación recibida en un día del mes promedio. El valor en la habana para este coeficiente es de 19,56 MJ/(m² día)[7].
- N hace referencia al número de días del mes promedio. Como se obtuvo en la tabla anterior, el valor del mismo es de 30,42 días.

Por último se impone la ecuación que relaciona los factores X, Y con la fracción solar.

$$f = 1.029Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3 \quad (1.8)$$

Se impone una fracción solar del 70% a fin de obtener el valor de la superficie de colección necesaria.

Resolviendo el sistema de ecuaciones en el programa EES con las distintas opciones de colectores, se obtiene:

Colector	Sup Colec (m ²)	Nº colectores necesario
Placa Plana	66,61	26
Alto Rendim.	72,63	37
Tubos al vacío	56,7	35

Tabla 3-3: Comparación de distintos tipos de colectores en la instalación.



En función de estos resultados, se decide la implementación de colectores solares planos modelo CPC/ML3.0 TINOX, ya que requieren de una menor inversión además de un menor número de placas.

Con este número de placas, tenemos que comprobar la fracción solar mes a mes se mantiene en unos valores correctos. Así, en el mismo programa EES obtenemos los siguientes valores:

1..12	H [J/(m ² *day)]	N [day]	q _{tot} [J]	T _{amb} [°C]	f
Run 1	1,460E+07	31	3,460E+10	19,8	0,5277
Run 2	1,720E+07	28	3,125E+10	21,2	0,6073
Run 3	2,130E+07	31	3,383E+10	21,6	0,7516
Run 4	2,380E+07	30	3,274E+10	22,2	0,8191
Run 5	2,360E+07	31	3,307E+10	23,1	0,83
Run 6	2,180E+07	30	3,125E+10	23,5	0,7907
Run 7	2,370E+07	31	3,076E+10	23,7	0,8742
Run 8	2,300E+07	31	3,076E+10	24,4	0,8555
Run 9	2,010E+07	30	2,977E+10	23,5	0,7664
Run 10	1,710E+07	31	3,230E+10	22,7	0,6467
Run 11	1,520E+07	30	3,200E+10	21,6	0,5674
Run 12	1,340E+07	31	3,383E+10	20	0,495

Tabla 3-4: Resultados del método F-Chart para los distintos meses del año.

Donde:

- H: Radiación por metro cuadrado en un día promedio del mes.
- N: Número de días del mes.
- q_{tot}: Demanda energética mensual obtenida de la ecuación (1.3)
- T_{amb}: Temperatura ambiente promedio de cada mes en La Habana.
- f: Fracción solar cada mes.

Comprobamos que los meses de diciembre y enero, por tener una menor irradiación solar, son los meses que menos energía viene cubierta por el sol, sin embargo se mantiene aproximadamente en un ahorro del 50% de energía convencional. También es importante el hecho de que en ningún periodo se da una sobredimensión del sistema, ya que no se supera un 100% en la fracción solar en ningún mes.

Cabe destacar que el motivo que provoca la estabilidad en la desviación de radiación y aprovechamiento de la energía solar es producto de la estabilidad climática a lo largo del año en Cuba.



3.2.2 Tanque de almacenamiento

Para obtener el volumen mínimo necesario para el tanque de almacenamiento, debemos asegurarnos de que éste es capaz de suministrar el consumo del edificio durante el período punta.

En primer lugar determinamos que el número de viviendas equivalentes de nuestra instalación (N_e) es de 36, con un consumo diario (Q_d) de $55[l/pers \cdot día] \cdot 3[pers/viv] = 155[l/día]$.

El consumo punta es considerado como el 75% del consumo diario, por lo que el valor del mismo para una vivienda estándar será:

$$Q_p = 0,75 \cdot Q_d = 116,25[l/día] \quad (1.9)$$

Como contamos con varias viviendas equivalentes, será necesario aplicar un coeficiente de simultaneidad (φ) obtenido como:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{N_e - 1}} = 0,339 \quad (1.10)$$

Entonces el caudal en la hora de máximo consumo será:

$$Q_{max} = Q_p \cdot N_e \cdot \varphi = 1510[l/h] \quad (1.11)$$

Y la duración de dicho período de máximo consumo la calculamos como:

$$T_p = 5 \cdot \frac{N_e^{0,905}}{15 + N_e^{0,92}} = 3,047h \quad (1.12)$$

De esta manera, podemos calcular el volumen consumido durante ese periodo:

$$V = Q_{max} \cdot T_p = 4602 l \quad (1.13)$$

A continuación, habrá que calcular el factor de mezcla (f_m) que nos dará una representación de la relación entre el volumen útil y el efectivo del depósito. Para ello hay que tener en cuenta el valor del factor de forma (f_f) que no es otra cosa que la relación entre la altura y el diámetro del depósito (H/D). En nuestro caso elegiremos un factor de forma de 2.

$$f_m = 0,63 + 0,14 \cdot f_f = 0,91 \quad (1.14)$$

Con todo esto, procedemos a calcular el volumen útil del tanque de almacenamiento:

$$V_u = \frac{Q_{max} \cdot T_p}{1 + \frac{T_p}{t_p} \cdot \frac{1}{f_f}} = 2612 l \quad (1.15)$$



Donde el tiempo de preparación (t_p) se ha elegido como 2h. Por último, el volumen del tanque de almacenamiento tendrá que ser:

$$V_{tanque} = \frac{V_u}{f_m} = 2871 \text{ l} \quad (1.16)$$

Ahora, otra vez a falta de una legislación cubana, se va a comprobar la normativa española de tal forma que el tanque cumpla con las exigencias de tamaño dadas por el CTE que imponen que:

$$50 < \frac{V_{tanque}}{A_{col}} < 180$$

Dándonos esto que el valor del volumen del tanque tiene que estar comprendido entre 3.354 litros y 12.074 litros.

Así pues desechamos el cálculo anterior por arrojar un resultado no incluido en el rango aceptado e instalaremos un volumen de acumulación que cumpla con la última exigencia.

Seleccionamos un acumulador vertical de acero negro al carbono de 4000 litros de la empresa *IBERSOLAR*.

3.2.3 Intercambiador de calor

Para calcular la potencia de intercambio en el intercambiador, nos basaremos en el CTE[1]. En el mismo se dice que la potencia del intercambiador debe ser mayor que 500 veces el área de colección. En nuestro caso:

$$P (W) > 500 \cdot A_{colec} (m^2)$$

Es decir:

$$P > 33540W$$

En base a eso, se selecciona el intercambiador M3FGH con 28 placas del fabricante Salvador Escoda. A continuación se adjunta la tabla con las propiedades técnicas del mismo.

PRODUCCIÓN DE A.C.S. CON PANEL SOLAR



Modelo	N° Placas	Paneles	(1°) Panel		(2°) A.C.S.		Pot. Kcal/h
			l/h	m.c.a.	l/h	m.c.a.	
M3FG H	8	5	400	0,77	400	1,17	6.000
M3FG H	12	10	600	1,22	600	1,52	11.400
M3FG H	20	20	1.200	1,76	1.200	1,89	22.800
M3FG H	28	30	2.400	2,06	2.400	2,08	34.200
M3FG H	35	40	3.600	2,53	3.600	2,23	45.600
M3FG H	43	50	4.800	2,64	4.800	2,33	56.400

Tabla 3-5: Propiedades técnicas del intercambiador de placas M3FGH.



Vemos que la potencia de dicho modelo es de 34.200kcal/h, lo que son 39775W, así que cumple con el criterio de selección. Además vemos que el fabricante recomienda dicho modelo para instalaciones con aproximadamente 30 paneles, por lo que el intercambiador se adecúa bien a nuestra instalación.

3.2.4 Tuberías

El material seleccionado para las tuberías será cobre[4]. Los motivos que hacen de éste el material idóneo son las siguientes:

- Tiene una alta resistencia a la corrosión.
- Cuando se oxida, produce una capa de protección interior que la protege de la corrosión y que no es reactivo ni afecta al agua.
- Sus propiedades frente al fuego la hacen muy deseable a la hora de evitar la propagación del mismo.

En esta parte se analizarán cuatro tramos. Éstos son:

- Fluido frío desde el intercambiador en la planta baja hasta un punto en la cubierta donde se distribuirá a los colectores.
- Fluido frío desde dicho punto hasta la entrada de los colectores.
- Fluido caliente desde la salida de los colectores hasta un punto común de bajada al intercambiador de la planta baja.
- Fluido caliente desde dicho punto de bajada hasta el intercambiador.

La altura del edificio desde el suelo es de 14,30m a lo que hay que sumarle la profundidad del sótano donde estará instalado el intercambiador y el tanque de almacenamiento, siendo esta profundidad de 2,60m y dando entonces una distancia aproximada total del sótano a la cubierta de 16,90m.

Entonces tenemos que tanto el tramo de subida como de bajada tendrá aproximadamente una longitud de 17m, siendo necesaria además la instalación de dos codos en cada tramo, uno arriba y uno abajo en cada caso.

A fin de asegurar una velocidad en el interior de la tubería de 1m/s, y sabiendo que el flujo es de 100l/h en cada placa, tenemos:

$$Q = V \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (1.17)$$

Donde Q en l/h es 2.600 o, lo que es lo mismo 722,2cm³/s. Despejando de la ecuación obtenemos que el diámetro de la tubería de subida y bajada del fluido para una velocidad de 1 m/s ha de ser de 3 cm.

Para los tramos de distribución del fluido entre las placas, éste tamaño deberá ser distribuido en 4, por lo que éstos deberán tener aproximadamente un diámetro de 7,5mm.

La longitud total de estas 4 tuberías será de 52m y serán necesarios 12 codos (4 cada una).



Seleccionamos 34m de tubería de cobre cromado OUTOKOMPU de diámetro exterior 35mm y espesor 2mm y 52m de tubería de diámetro exterior 10mm y espesor 1mm.

Diámetro exterior nominal, D (mm)	Espesor nominal, S (mm)					
	0,75	1	1,2	1,5	2	2,5
6		109				
8		112				
10	78	95				
12	57	78				
14		66				
15	45	61		95		
16		57				
18	37	51		78		
22		41	50	63		
28		32	39	49		
35		25	31	38	51	
42		21	25	32	41	

Tabla 3-6: Catálogo de tuberías de cobre cromado OUTKOMPU.

3.2.5 Sistema de bombeo

Se analizará la bomba que suministre la potencia necesaria para vencer las pérdidas de carga en todo el circuito primario. Para ello será necesario en primer lugar analizar dicha pérdida de carga. Después, en función de ella y del caudal se seleccionará la bomba de un catálogo.

3.2.5.1 Pérdida de carga en colectores

Para obtener la pérdida de carga en los colectores solares nos basaremos en la gráfica que provee el fabricante para ese efecto, reflejada en la figura 3-1.

Como nuestra instalación de placas está situada en paralelo, la caída de presión total en el paso del fluido por el colector será igual que la caída de un sólo colector. Vemos que para un caudal de 100l/h dicha caída es de 200Pa, o, lo que es lo mismo, 0,021m.c.a.

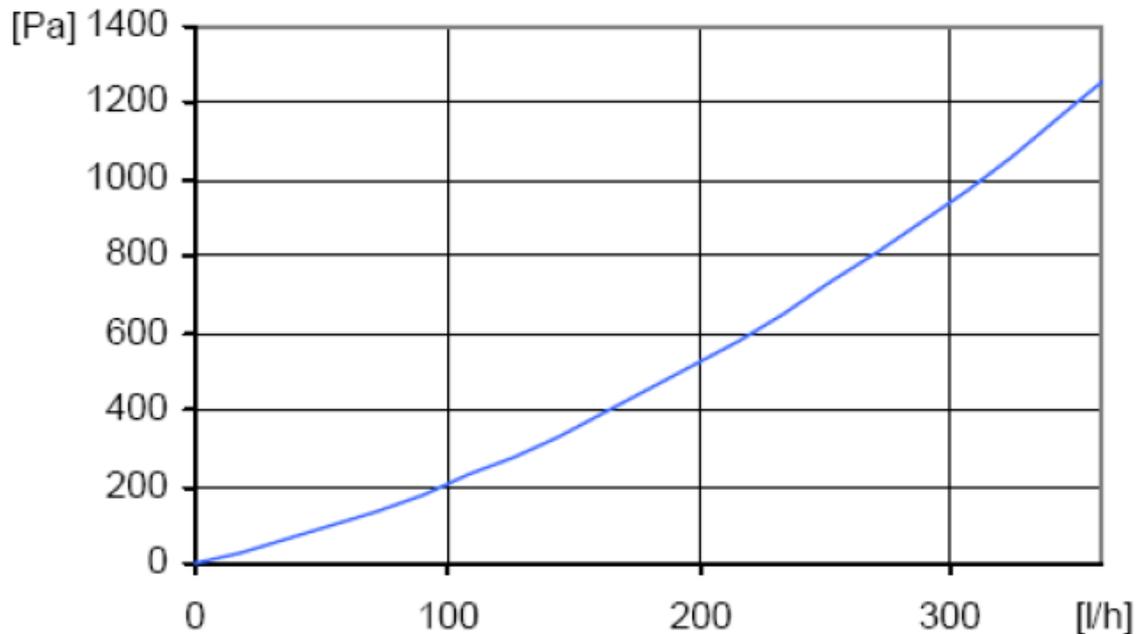


Figura 3-1: Pérdida de carga en el colector plano CPC/ML3.0 TINOX.

3.2.5.2 Pérdida de carga en tuberías

Para el cálculo de la pérdida de carga en tuberías, asumiremos los 16,9m de subida y bajada con un diámetro de 3cm y los otros 52m de tubería de 0,75cm.

Para obtener la pérdida de carga necesitamos calcular el factor de fricción f . Lo obtendremos del diagrama de Moody.

En primer lugar debemos calcular el número de Reynolds en ambos casos. La ecuación del número adimensional es:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (1.18)$$

Obteniendo para cada caso:

Lo siguiente que tenemos que obtener es la rugosidad relativa de la tubería. Se obtiene según la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{D} \quad (1.19)$$

Siendo que nuestro material es cobre, ε tiene un valor de 0,0015mm.

De esta manera, obtenemos que:

TRAMO	Reynolds	Rugosidad relativa
Tramo D=31mm	37444	0,00005
Tramo D=8mm	9361	0,0002

Tabla 3-7: Rugosidad relativa y número de Re en los distintos tramos de tubería.

Con estos datos podemos entrar en el diagrama de Moody[6] como se muestra en la figura 3-2 a calcular el coeficiente de fricción de las tuberías.

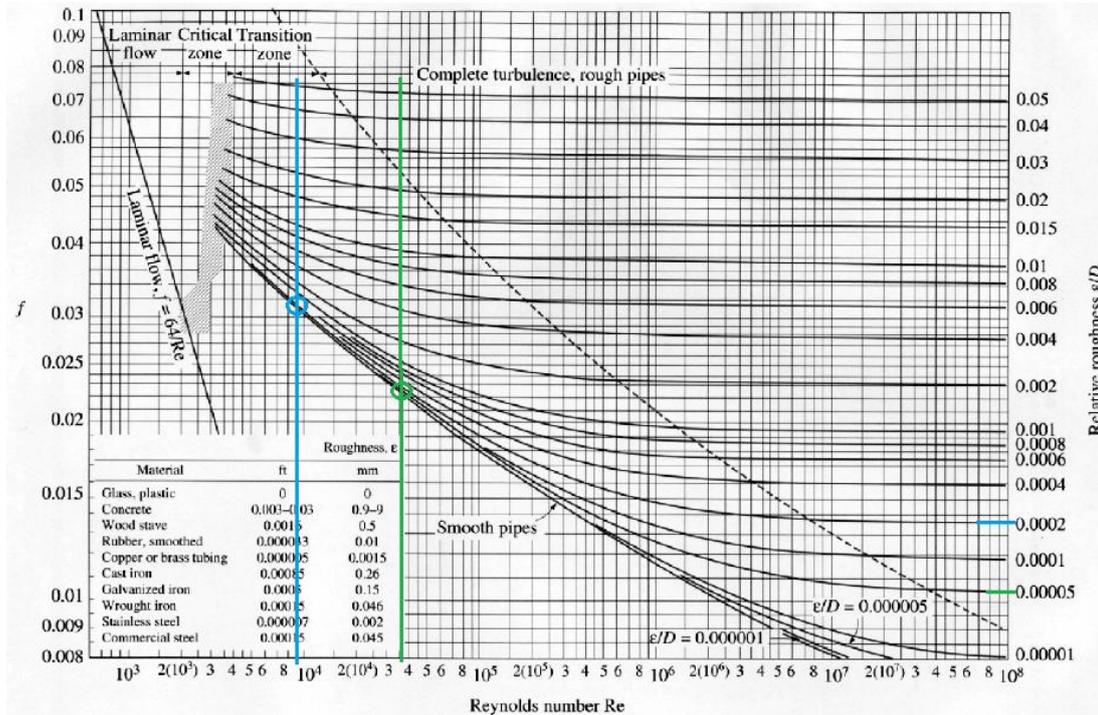


Figura 3-2: Diagrama de Moody.

Entonces obtenemos que el coeficiente de fricción es 0,023 para el tramo de diámetro 3cm y 0,032 para el tramo de 0,8cm.

Ahora, para calcular la pérdida de carga en las tuberías sólo nos queda obtener las pérdidas debidas a las singularidades.

En el tramo de tubería de diámetro de 3cm se encuentran 4 codos, que hacen un total de $K=0,6 \cdot 4=3,2$. A esto le añadiremos 5 por distintos elementos instalados en la tubería (válvulas de seguridad, válvulas de cierre, etc...) obteniendo un coeficiente $K=8,2$.

Para el otro tramo, si bien realmente está dividido en 4 diferentes tramos se va a analizar como si fuese uno seguido. De ésta manera los 12 codos que presenta arroja un valor del coeficiente de fricción de $K=0,6 \cdot 12=7,2$. De igual manera que antes, añadiremos 5 más en función de las distintas válvulas y elementos del circuito, obteniendo que el coeficiente en este caso es $K=12,2$.

De esta manera, ya se puede obtener la pérdida de carga en las tuberías. Ésta se ajusta a la siguiente ecuación:

$$\Delta P [Pa] = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \left[\frac{f \cdot L}{D} + \sum K \right] \quad (1.20)$$

Obtenemos que la pérdida de carga es 17kPa en el tramo de 3cm y 116kPa en el tramo de 0,8cm.



TRAMO	ΔP (m.c.a)
Tramo D=31mm	1,731
Tramo D=8mm	11,88

Tabla 3-8: Pérdida de carga en cada tramo de tubería.

Así, la pérdida de carga total en las tuberías es de 13,61m.c.a.

3.2.5.3 Pérdida de carga en el intercambiador

En base la información proporcionada por el fabricante del intercambiador, la pérdida de carga en el circuito primario debido a la circulación del fluido por el intercambiador es de 2,06 m.c.a.

3.2.5.4 Dimensionado de la bomba

Entonces ya tenemos tanto el caudal a circular por el circuito, que será de 2400l/h, como las pérdidas que éste ha de vencer:

ELEMENTO	ΔP (m.c.a)
Colectores	0,021
Tuberías	13,61
Intercambiador	2,06
TOTAL	15,69

Tabla 3-9: Pérdida de carga total en el circuito.

Para suministrar la energía necesaria, se conectarán dos bombas en serie, la bomba UPS Solar 25-120 180 y la bomba UPS solar 25-40 180 del fabricante JEN Solar. A continuación se exponen sus gráficas de funcionamiento, donde se ve que entre las dos aportan los 15,7m necesarios para vencer la resistencia del circuito.

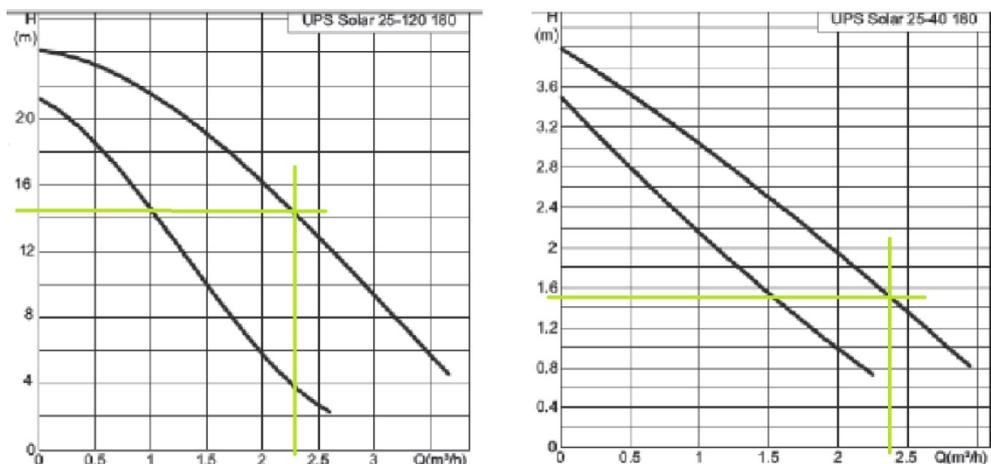


Figura 3-3: Gráficas de funcionamiento de las bombas UPS25-120 180 y UPS25-40 180.



3.2.6 Dimensionado de la caldera auxiliar

Como se ha dicho, ésta será dimensionada de tal forma que sea capaz de suministrar toda la demanda de ACS en caso de que el sistema de calentamiento solar no funcione.

Para ello, conocemos que el caudal máximo es de 1510l/h que fue calculado para el dimensionado del tanque de almacenamiento. Además, la temperatura mínima del agua de red es de 15°C. Con estos datos:

$$Pot = m \cdot Cp \cdot (T_{cons} - T_{red}) \quad (1.21)$$

Obteniendo que la potencia mínima de la caldera tiene que ser de 35,54kW.

Seleccionamos la caldera THERMOSYSTEM CONDENS F80/3 del fabricante Saunier Duval.

		F80/3	
Características generales	Unidad		
Potencia nominal	80/60°C	kW	13,6-78,2
	60/40°C	kW	14,1-80,4
	40/30°C	kW	14,7-84,1
Temperatura de gases de evacuación		°C	
Presión máx. disponible aspiración-expulsión		Pa	
Clase NOx		-	
Rendimiento nominal (fijo)	80/60	%	97,8
	60/40	%	100,5
	50/30	%	103,0
	40/30	%	105,1
Rendimiento homologado (referido al ajuste en la potencia calorífica nominal) (DIN 4702.98)	75/60	%	106,0
	40/30	%	
Rendimiento del 30% (DIN EN 483)		%	108,0
Presión de funcionamiento máxima		bar	6
Volumen de agua en caldera		L	5,74
Caudal nominal de agua en circulación	$\Delta t=20K$	m ³ /h	3,44
Pérdida de carga	$\Delta t=20K$	mbar	80,0
Cantidad de agua de condensación	40/30	L/h	13,0

Tabla 3-10: Propiedades técnicas de la caldera Thermosystems condens F80/3.

3.3 Comprobación de la instalación con método dinámico

Ahora se va a analizar el comportamiento de la instalación a partir de la utilización de un método horario, de forma que podamos analizar la cobertura de la instalación teniendo en cuenta las variaciones de energía solar del día en vez de tomar una promedio. Es de esperar que el análisis de la instalación salga igual o menos eficiente ya que si bien es cierto que la energía total



disponible en un mes cubre la fracción solar antes mencionada, podría ser que por la descompensación temporal entre oferta y demanda de energía una parte de ella no pueda ser aprovechada y por tanto se redujera la disponibilidad energética de la instalación.

Para hacer este análisis se va a partir del método Duffie-Beckman a través del uso de un documento Excel desarrollado por el Centro Integrado de FP Superior de Energías Renovables[8].

3.3.1 Procedimiento de trabajo con la hoja Excel

En primer lugar hubo que introducir los datos del colector solar seleccionado así como las características climáticas de la ciudad de La Habana. Para ello hubo que trabajar en las pestañas de Colectores y BD Climática, respectivamente. De esta manera, dichas pestañas quedaban como se ve en las tablas 3-11 y 3-12.

A partir de estos datos implementados se seleccionan los desplegables correspondientes y se rellenan los diversos valores requeridos, como se ve en la tabla 3-13.



Diseño de una instalación solar térmica de agua caliente sanitaria para una residencia de estudiantes en la ciudad de La Habana.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	DENOMINACIÓN	Parámetro óptico	Coefficiente pérdidas (W/m ² K)	Coefficiente 2º pérdidas (W/m ² K ²)	Área útil (m ²)	Capacidad interior (l/captador)	Precio aprox.						
1													
2	CALPAK CA2001C	0.74	7.76		2.00	4.2							
3	CHROMAGEN CR-10DS	0.80	4.00		1.90	2.5	479,6 €						
4	CHROMAGEN CR-10S	0.80	4.00		2.17	2.5	517,5 €						
5	CHROMAGEN CR-12S	0.80	4.00		2.56	2.5	576,4 €						
6	ERUROTECAN NORDSOL 1	0.81	4.10	0.030	2.00	2.9							
7	IBERSOL AM2122X	0.79	4.28		2.61	4.5							
8	IBERSOL AM2152N	0.79	4.28		2.11	4.5							
9	IBERSOL CPC12	0.63	1.00	0.002	2.00	1.6							
10	IBERSOL CPC18	0.63	1.00	0.002	3.00	2.4							
11	IBERSOL CPC6	0.63	1.00	0.002	1.00	0.8							
12	IMMOSOLAR IS-PRO 2H	0.80	3.56	0.014	2.00	1.0							
13	ISOFOFON ISONOX	0.75	4.15		2.03	2.7	528,7 €						
14	KAYSUN CO 2000 EC	0.72	4.25		1.90	1.9	510,0 €						
15	LKN 90 L	0.79	7.90		1.70	1.1							
16	MADE 4000E	0.87	5.38		2.13	1.3	450,0 €						
17	ROCA PS	0.80	3.91	0.014	1.78	1.4							
18	ROTH PLANO	0.82	3.47	0.010	2.33	1.3							
19	ROTH VACIO	0.65	1.02	0.012	1.10	0.5							
20	TERMICOL 105	0.82	8.20		2.09	4.1							
21	TERMICOL 105 S	0.69	4.40		2.09	4.1							
22	TERMICOL 130 S	0.69	4.30		2.60	5.1							
23	VIEMANN VITOSOL 100-S1,7	0.81	3.78	0.013	1.70	1.4	500,0 €						
24	VIEMANN VITOSOL 100-W2,5	0.83	3.68	0.011	2.50	3.0	520,0 €						
25	VIEMANN VITOSOL 200-D20 (vacío)	0.85	1.71	0.009	2.14	4.0							
26	VIEMANN VITOSOL 300-H30 (vacío)	0.85	1.28	0.009	3.21	1.8							
27	Thermotecnic	0.73	4.30	0.012	2.32	2.5							
28	CPC/ML 3.0 TINOX	0.78	3.00		2.58	3.0	715,0 €						
29													
30													
31													
32													
33													
34													
35													
36													
37													
38													
39													
40													
41													
42													
43													

Tabla 3-11: Características de los colectores seleccionables



Diseño de una instalación solar térmica de agua caliente sanitaria para una residencia de estudiantes en la ciudad de La Habana.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
LOCALIDAD	RadENE(Wh/m2)	RadFeb(Wh/m2)	RadMar(Wh/m2)	RadAbr(Wh/m2)	RadMay(Wh/m2)	RadJun(Wh/m2)	RadJul(Wh/m2)	RadAgo(Wh/m2)	RadSep(Wh/m2)	RadOct(Wh/m2)	RadNov(Wh/m2)	RadDic(Wh/m2)	T°RedEne	T°RedFeb	T°RedMar	T°RedAbr	T°RedMay	T°RedJun	T°RedJul	T°RedAgo	T°RedSep	T°RedOct	T°RedNov	T°RedDic	T°MIN	T°MIN		
2	1277.8	1916.7	3111.1	3611.1	4111.1	4611.1	5027.8	4805.6	3972.2	2638.9	1527.8	1138.9	5.0	6.0	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0	12.0	11.0	10.0	8.0	5.0	1.0	14		
3	1661.1	2916.7	4166.7	5333.3	5888.9	6333.3	7416.7	6444.4	5222.2	3444.4	2333.3	1777.8	5.0	6.0	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0	12.0	11.0	10.0	8.0	5.0	-0.4	0.8		
4	2077.8	2669.4	4094.4	4905.6	6319.4	6905.6	6766.7	5608.3	4808.3	3583.3	2497.2	2030.6	5.0	6.0	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0	12.0	11.0	10.0	8.0	5.0	2.3	3.2		
5	2361.1	3333.3	4527.8	5250.0	7166.7	7666.7	6250.0	5083.3	3777.8	2722.2	2111.1	1511.1	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	6.2	7.0		
6	2472.2	3388.9	4555.6	5444.4	6416.7	6833.3	7027.8	6250.0	5138.9	3661.1	2777.8	2222.2	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	6.2	8.8		
7	1472.2	2138.9	2944.4	3388.9	4166.7	4222.2	4666.7	4111.1	3444.4	2722.2	1638.9	1138.9	6.0	7.0	9.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	9.0	6.0	5.4	5.8		
8	1666.7	2527.8	3750.0	4166.7	5388.9	6194.4	7305.6	7027.8	5222.2	3111.1	1916.7	1444.4	4.0	5.0	7.0	9.0	10.0	11.0	12.0	11.0	10.0	9.0	7.0	4.0	-1.5	-0.5		
9	1805.6	2777.8	3777.8	4166.7	5194.4	6055.6	6833.3	7194.4	6611.1	4972.2	3476.7	1722.2	6.0	7.0	9.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	9.0	6.0	3.2	4.7		
10	2000.0	2972.2	4000.0	4500.0	5833.3	6305.6	6722.2	6722.2	4555.6	3361.1	2361.1	1805.6	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	3.5	3.8		
11	1805.6	2638.9	3583.3	4472.2	5166.7	5638.9	6000.0	5027.8	4055.6	3000.0	2000.0	1611.1	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	4.4	5.3		
12	1416.7	2194.4	3444.4	4444.4	5194.4	5972.2	6388.9	5750.0	4638.9	2805.6	1805.6	1250.0	4.0	5.0	7.0	9.0	10.0	11.0	12.0	11.0	10.0	9.0	7.0	4.0	-1.2	-0.6		
13	1888.9	2777.8	4083.3	5444.4	6138.9	6972.2	7805.6	7055.6	5472.2	3527.8	2472.2	1833.3	6.0	7.0	9.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	9.0	6.0	4.0	5.2		
14	2250.0	3194.4	4361.1	5138.9	6166.7	6611.1	7194.4	6388.9	5027.8	3944.4	2777.8	2055.6	6.0	7.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	5.4	6.8	
15	1388.9	2055.6	3055.6	3611.1	4472.2	4722.2	5111.1	4305.6	3611.1	2638.9	1611.1	1250.0	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	5.6	5.9		
16	2222.2	3388.9	4305.6	4833.3	5722.2	5944.4	6638.9	5416.7	4611.1	3638.9	2388.9	2027.8	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	5.5	6.3		
17	2472.2	3638.9	5166.7	5833.3	6750.0	7416.7	7444.4	6750.0	5305.6	3944.4	3055.6	2388.9	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	12.0	11.0	8.0	8.4	8.4	
18	1944.4	2805.6	4166.7	4500.0	5388.9	6055.6	6583.3	6444.4	5222.2	3476.7	2416.7	1805.6	5.0	6.0	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	10.0	8.0	5.0	6.6	7.4
19	2000.0	2805.6	4194.4	5138.9	6055.6	7194.4	7916.7	6722.2	5527.8	3500.0	2388.9	1916.7	6.0	7.0	9.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	9.0	6.0	3.7	4.9		
20	1838.9	2444.4	3583.3	4833.3	5194.4	6111.1	7111.1	6194.4	4861.1	3111.1	2000.0	1527.8	4.0	5.0	7.0	9.0	10.0	11.0	12.0	11.0	10.0	9.0	7.0	4.0	-0.7	0.2		
21	1972.2	2916.7	3944.4	4416.7	5194.4	5277.8	6194.4	5138.9	4138.9	3250.0	2166.7	1833.3	6.0	7.0	9.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	9.0	6.0	1.0	2.0		
22	2166.7	3000.0	4222.2	5138.9	6083.3	6888.9	7416.7	6555.6	5222.2	3583.3	2666.7	1972.2	6.0	7.0	9.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	9.0	6.0	0.3	1.8		
23	1805.6	2555.6	3888.9	4972.2	5388.9	6305.6	6944.4	6444.4	4944.4	3250.0	2166.7	1555.6	6.0	7.0	9.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	9.0	6.0	-3.5	-2.7		
24	1527.8	2138.9	3138.9	3250.0	4055.6	4500.0	4472.2	3777.8	3527.8	2661.1	1722.2	1388.9	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	5.5	6.0		
25	2111.1	3138.9	4444.4	5166.7	6694.4	7111.1	7972.2	7111.1	5888.9	4027.8	2555.6	2083.3	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	6.6	7.7		
26	1919.4	2527.8	4111.1	5138.9	5472.2	6380.6	6505.6	5561.1	4833.3	3169.4	2105.6	1572.2	5.0	6.0	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0	12.0	11.0	10.0	8.0	5.0	2.3	3.2		
27	1861.1	2805.6	4000.0	5000.0	5638.9	6777.8	7416.7	6694.4	5333.3	3005.6	2250.0	1805.6	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	7.0	0.3	1.8		
28	1500.0	2222.2	3166.7	3444.4	4277.8	4500.0	4833.3	4250.0	3661.1	3027.8	2077.8	1416.7	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	7.6	8.0		
29	1555.6	2444.4	3605.6	4611.1	5333.3	5944.4	6472.2	5333.3	4500.0	3372.2	1888.9	1333.3	6.0	7.0	9.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	9.0	6.0	2.0	3.0		
30	1311.1	1944.4	2944.4	3444.4	4444.4	5444.4	6027.8	6250.0	6083.3	5500.0	4194.4	3416.7	2372.2	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	15.2	15.1	
31	1611.1	2416.7	3833.3	4777.8	5416.7	6138.9	6722.2	5805.6	4777.8	3888.9	2888.9	1944.4	4.0	5.0	7.0	9.0	10.0	11.0	12.0	11.0	10.0	9.0	7.0	4.0	-0.8	0.3		
32	1666.7	2750.0	3777.8	5222.2	5805.6	6277.8	6611.1	5916.7	4666.7	3361.1	2000.0	1333.3	5.0	6.0	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0	12.0	11.0	10.0	8.0	5.0	1.0	2.2		
33	1416.7	2111.1	3250.0	4222.2	4750.0	5416.7	5611.1	5111.1	4166.7	2750.0	1722.2	1250.0	6.0	7.0	9.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	9.0	6.0	1.5	2.2		
34	1861.1	2944.4	3777.8	5222.2	5805.6	6527.8	7222.2	6476.7	4694.4	3166.7	2083.3	1638.9	6.0	7.0	9.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	9.0	6.0	1.4	2.7		
35	2305.6	3333.3	4305.6	5138.9	6444.4	6805.6	7361.1	6444.4	5277.8	3777.8	2583.3	2222.2	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	7.3	7.9		
36	2611.1	3500.0	4777.8	5638.9	6388.9	6888.9	7416.7	6277.8	5083.3	3944.4	3027.8	2416.7	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	9.9	10.6		
37	2805.6	4111.1	5666.7	6722.2	7111.1	7694.4	8527.8	5166.7	3661.1	2722.2	2250.0	1661.1	8.0	9.0	11.0	13.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	13.0	11.0	8.0	3.9	5.2		
38	1560.6	2444.4	3555.6	4430.6	5348.9	6233.3	6595.6	5925.6	4510.0	2978.6	1865.0	1364.1	5.0	6.0	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0	12.0	11.0	10.0	8.0	5.0	1.2	1.9		
39	1319.4	2447.9	4251.8	4716.7	5577.4	6446.7	6461.3	5819.4	3396.7	2661.0	1862.0	1130.0	5.0	6.0	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0	12.0	11.0	10.0	8.0	5.0	1.2	1.9		
40	1305.6	2027.8	3138.9	3888.9	4500.0	4888.9	5083.3	4611.1	3972.2	2611.1	1555.6	1194.4	5.0	6.0	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	13.0	12.0	11.0	9.0	6.0	2.9	3.7	
41	1472.2																											



Diseño de una instalación solar térmica de agua caliente sanitaria para una residencia de estudiantes en la ciudad de La Habana.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y																							
1	Cálculo dinámico de instalaciones solares térmicas																																															
2																																																
3	Localización y posicionamiento captadores																																															
4	Población	LA HABANA																																														
5	Latitud población (°)=	22,95																																														
6																																																
7	Orientación superficie (°)=	0		(0=sur, -90=este, 90= oeste)		Albedo alrededores																																										
8	Inclinación superficie (°)=	0		(0=horizontal, 90=vertical)		0,2																																										
9																																																
10	Datos edificio e instalación												Consumo ACS día (l/d)																																			
11	Nº viviendas	36		5940																																												
12	Consumo A.C.S. (l/persona día)	55																																														
13	nº personas vivienda	3																																														
14	Tº agua consumo (°C)	60																																														
15	Temp. Agua red	20																																														
16																																																
17	Datos característicos colectores												Área captadores												Modelo colector																							
18	Nº captadores solares térmicos	26		67,08		CPC/PL 3,0/TINOX																																										
19	Área de colector (m ²)	2,58																																														
20	a	0,70																																														
21	b (W/m ²)	3,00																																														
22	c (W/m ² h)	0,000																																														
23	Co secundario (l/kg °C)	4187																																														
24	Caudal secundario (l/h)	3123		(normalmente 20% superior al de primario)																																												
25	Masa total secundario (kgs)	0,87																																														
26	Co primario (l/kg °C)	3890																																														
27	Densidad primario (kg/m ³)	1014																																														
28	Caudal colectores (l/h m ²)	38,8																																														
29	Caudal primario (l/h)	2602,704																																														
30	Masa total primario (kgs)	2695																																														
31	Masa total primario (kgs)	0,73																																														
32																																																
33	Datos intercambiador																																															
34	Rendimiento intercambiador	0,95																																														
35	Eficiencia Intercambiador	0,65		(eficiencia del intercambiador) x																																												
36																																																
37	Datos depósito																																															
38	litros Acumulación/Supl. Colector	59,635																																														
39	Volumen acumulación (l)	4000																																														
40	U depósito (W/m ² K)	0,5																																														
41	Área depósito (m ²)	35,2		17,6		UA (W/K)																																										
42																																																
43	Temperaturas de control instalación																																															
44	Temp. inicial depósito (°C)	59																																														
45	Incremento temperatura de control	5																																														
46	T. máxima calentamiento depósito por seguridad	85																																														
47	T. mínima enfriamiento depósito con disipac. nocturna	55																																														
48	Temp máxima en primario con aerotermo	70																																														
49																																																
50	Potencia máxima aerotermo en caso de utilizar	0,0																																														
51	Energía máxima disipada por aerotermo	-																																														
52																																																
53													Nº depósitos												Altura												Volumen (l)											
54													1												2,5												4.000											
55													1,43												35,2												Área (m ²)											
56																																																
57	Opciones de análisis																																															
58	Mes de análisis Agosto																																															
59	Disipación nocturna SI																																															
60	Modo de intercambio Intercambiador de placas																																															
61	Perfil consumo F-chart																																															
62	Radiación solar Radiación media																																															
63																																																
64													Perfil ocupación anual												Constante																							
65																																																
66																																																
67																																																
68																																																
69																																																
70																																																
71																																																
72																																																
73																																																
74																																																
75																																																
76																																																
77																																																
78																																																
79																																																
80																																																
81																																																
82																																																
83																																																
84																																																
85																																																
86																																																
87																																																
88																																																
89																																																
90																																																
91																																																
92																																																
93																																																
94																																																
95																																																
96																																																
97																																																
98																																																
99																																																
100																																																

Tabla 3-13: Selección de valores y elementos en el documento Excel para la resolución del cálculo dinámico.



3.3.2 Resultados del análisis

A continuación vamos a analizar los resultados obtenidos por los dos métodos de cálculo trabajados. En las figuras 3-4 y 3-5 se ve la comparación entre ambos métodos

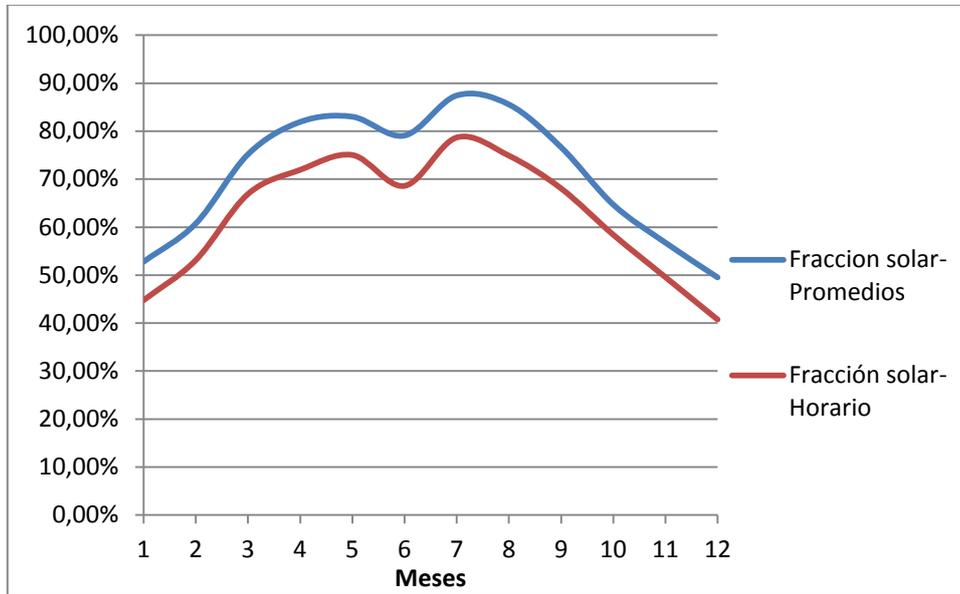


Figura 3-4: Gráfica comparativa del valor de la fracción solar mes a mes por ambos métodos.

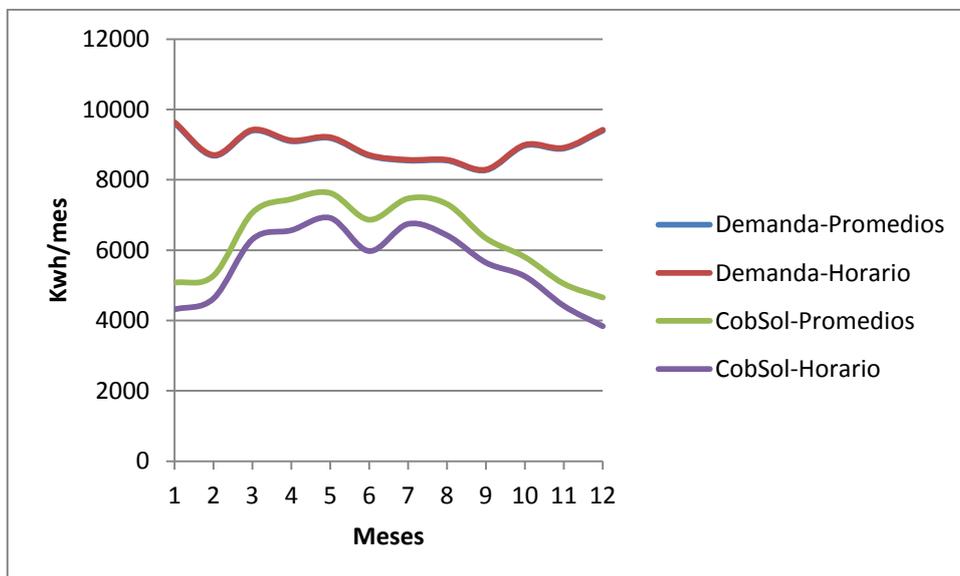


Figura 3-5: Gráfica comparativa del valor del consumo y la cobertura solar mes a mes por ambos métodos.



Diagnóstico del estado real y solución propuesta

1 Análisis medioambiental

1.1 Introducción

Una de las grandes motivaciones, a parte de la clara ventaja en cuanto a independencia energética que tiene la energía solar en un país como Cuba, es la reducción del impacto ambiental que el desarrollo lleva aparejado, sin por ello tener que renunciar a una mejora del nivel de vida de la sociedad. Este tipo de desarrollo permite la creación de bases para que no se convierta en un saqueo constante de los recursos naturales, sino que pueda tener una continuidad en el tiempo que asegure también a las generaciones venideras. Es por ello que el análisis medioambiental de toda instalación reviste de una importancia mayúscula, incluso, y aunque esto muchas veces se olvide, mayor que el análisis económico de la misma.

Para este análisis así como para el análisis económico se van a utilizar los datos obtenidos mediante el método estático.

1.2 Ahorro de energía convencional

En primer lugar vamos a obtener el ahorro energético de fuentes de energía convencional que ésta instalación supone.

	Consumo mes (kWh)	Fracción solar	Ahorro E. Conv. (kWh)	Consumo E. Conv. (kWh)
Enero	9612,11	0,5277	5072,31	4539,80
Febrero	8681,90	0,6073	5272,52	3409,38
Marzo	9398,51	0,7516	7063,92	2334,59
Abril	9095,33	0,8191	7449,98	1645,34
Mayo	9184,90	0,83	7623,47	1561,43
Junio	8681,90	0,7907	6864,78	1817,12
Julio	8544,10	0,8742	7469,25	1074,85
Agosto	8544,10	0,8555	7309,47	1234,62
Septiembre	8268,48	0,7664	6336,96	1931,52
Octubre	8971,30	0,6467	5801,74	3169,56
Noviembre	8888,62	0,5674	5043,40	3845,22
Diciembre	9398,51	0,495	4652,26	4746,25
TOTAL	107269,75		75960,10	31309,68

Tabla 1a-1: Datos de consumo y ahorro de energía convencional.



A partir de los datos de la tabla 1a-1 podemos hacer una comparativa entre el sistema de calentamiento convencional y el sistema de calentamiento solar. En las gráficas de la Figura 1a-1 se puede apreciar visualmente cuál es el ratio de energía salvada y, por consiguiente, la importancia ambiental del sistema.

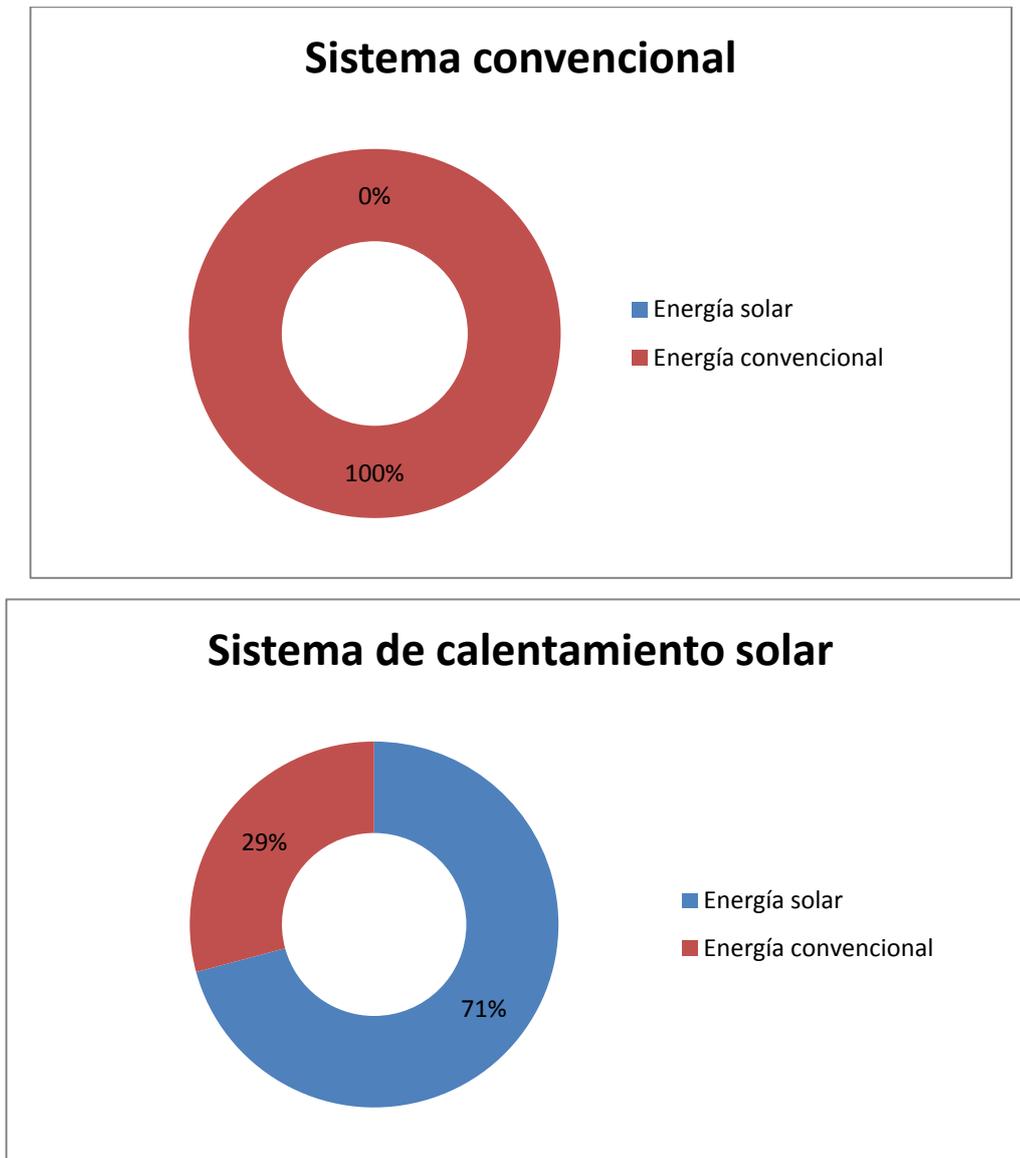


Figura 1a-1: Comparativa de consumo de energía entre sistema solar y sistema convencional.

1.3 Ahorro de emisiones de CO₂ a la atmósfera

Para poder calcular el impacto ambiental que la quema de combustibles fósiles, existen unos coeficientes que nos dan la relación entre la producción de energía térmica y la masa de CO₂ emitida a la atmósfera. Algunos coeficientes de combustibles que podrían ser utilizados para el calentamiento de agua se exponen en la siguiente tabla:



Combustible	Coefficiente $\left[\frac{kgCO_2}{kWh_t}\right]$
Gas Natural	0,22
Gasóleo	0,269
Carbón	0,472

Tabla 1a-2: Coeficiente de emisión de distintos combustibles fósiles.

En nuestro caso, como en la mayoría de calderas de uso doméstico, contamos con una caldera de gas natural. Entonces a partir de esto, vamos a obtener cuál es el ahorro de emisiones de CO₂ que la instalación del sistema de calentamiento solar supone.

$$Emisión_{CO_2} = \frac{Consumo}{\eta_{caldera}} \cdot Coef_{emisión} \quad (1.22)$$

Entonces la emisión para un sistema de calentamiento convencional con una caldera de gas natural con rendimiento del 90% será:

$$Emisión_{conv} = \frac{107269,75}{0,9} \cdot 0,22 = 26221,5 \left[\frac{kgCO_2}{año}\right] \quad (1.23)$$

Y la emisión con la misma caldera para el sistema de calentamiento por energía solar:

$$Emisión_{solar} = \frac{31309,78}{0,9} \cdot 0,22 = 7653,5 \left[\frac{kgCO_2}{año}\right] \quad (1.24)$$

Por lo tanto tenemos un ahorro de emisión de 18.568 kg de CO₂ cada año por la instalación del sistema de calentamiento solar.

2 Análisis económico

2.1 Introducción

En el análisis económico se va a analizar la rentabilidad económica de la instalación. Al ser El Hotelito un emplazamiento gestionado económicamente por el Estado, el análisis económico no se va a hacer en función del precio del combustible de consumo doméstico de las familias y comercios cubanos, sino en función del precio al que el Estado cubano adquiere dicho producto en los mercados internacionales.

También podría analizarse como una empresa independiente, pero considero que el análisis económico más relevante es ver cómo puede afectar a la economía cubana en su conjunto el hecho de instalar sistemas de captación solar en lugar de calderas de gas natural.



2.2 Presupuesto

A continuación se expone en la tabla 2a-1 los distintos elementos a instalar con sus correspondientes precios.

Producto	Precio unitario (€/ud)	Cantidad	Precio total(€)
Captador solar planoCPC/ML 3.0 TINOX	715	26	18590
Acumulador solar 4000l Ibersolar	4961,53	1	4961,53
Intercambiador de placas M3FGH con 28 placas	1230	1	1230
Tubería de cobre cromado øext35mm	6,75	34	229,5
Tubería de cobre øext10mm	3,22	52	167,44
Codo 90º para ø30mm	4,2	4	16,8
Codo 90º para ø7,5mm	3,18	12	38,16
Bomba UPS Solar 25-120 180	457	1	457
Bomba UPS solar 25-40 180	323	1	323
Caldera Thermosystem Condens F80/3	2534	1	2534
SUBTOTAL			28547,43
Mano de obra	10%subtotal		2854,74
TOTAL			31402,17

Tabla 2a-1: Desglose del presupuesto.

2.3 Valor Actual Neto de la instalación

El VAN nos dará la visión acerca de la rentabilidad de la instalación a lo largo de los años de funcionamiento de la misma. La ecuación del mismo es:

$$VAN_n = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+k)^i} \quad (1.25)$$



Donde:

- I_0 : Inversión inicial
- CF_i : Flujo de caja anual
- k : Tasa de descuento

Para el flujo de caja anual, deberemos calcular el ahorro económico que la sustitución de energía convencional por energía solar supone al estado cubano. Para ello nos basaremos en los precios del gas natural en el mercado internacional. Tomaremos el valor actual aunque este valor es variante en el tiempo.

Como referencia al precio del gas natural, se ha obtenido en función del precio que se paga en España por el mismo ya que la complejidad del mercado de abastecimiento energético cubano hace necesario tomar una referencia con la que trabajar (Tabla 2a-2).

Nivel de consumo de referencia		Término fijo T_f €/cliente/mes	Término variable T_v cent/kWh
T.1	Consumo inferior o igual 5.000 kWh/año	2,46	5,684901
T.2	Consumo superior a 5.000 kWh/año e inferior o igual a 50.000 kWh/año	5,52	4,961824
T.3	Consumo superior a 50.000 kWh/año e inferior o igual a 100.000 kWh/año	43,94	4,181407
T.4	Consumo superior a 100.000 kWh/año	65,51	3,920614

Tabla 2a-2: Precio del gas natural en España.

Como el consumo total excede los 100.000kWh/ año, nuestra tarifa se ajusta a la T.4. Si bien el consumo total de energía con un sistema convencional sería de 107270kWh, el ahorro que tenemos por la instalación del sistema de calentamiento solar es de 75960kWh. Entonces el ahorro anual económico en gas natural de la instalación será:

$$C.F. = T_f \cdot 12 + T_v \cdot 75960 = \frac{3765,79\text{€}}{\text{año}} \quad (1.26)$$

La tasa de descuento elegida es del 3,5%, por ser el valor de rendimiento del capital que se puede obtener en un fondo de inversión con rentabilidad asegurada.

Con estas características, obtenemos la gráfica del VAN (Fig. 2a-1).

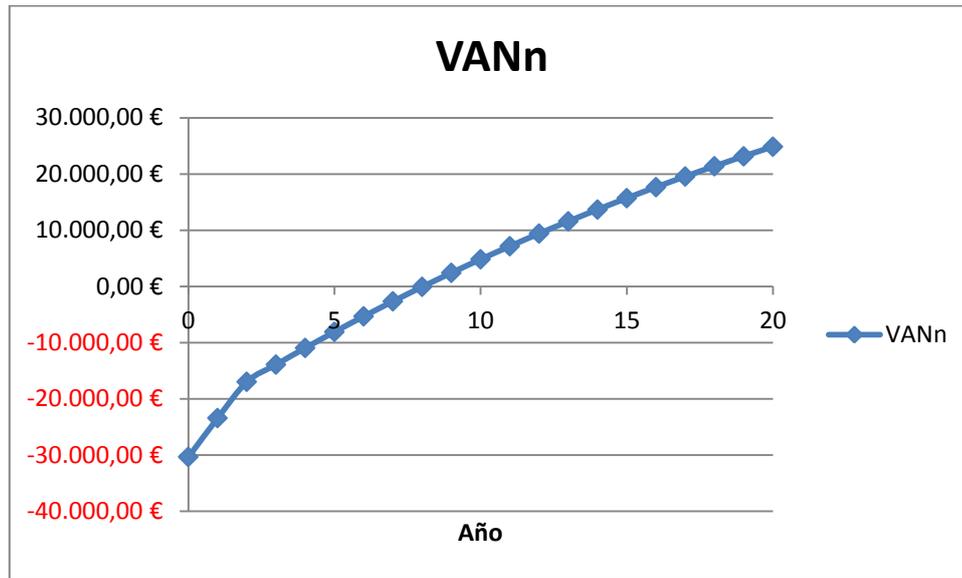


Figura 2a-1: Evolución del VAN a lo largo del tiempo.

Se ve que la inversión se hace rentable económicamente a partir del 9 año de uso, produciendo en 20 años de vida útil un ahorro económico total de 24.844,50€.



Conclusiones finales

1 Resumen de resultados

El objetivo del proyecto era diseñar la instalación solar para cubrir un 70% de la energía anual que la residencia de estudiantes “El Hotelito” necesita para la producción de agua caliente sanitaria.

Se obtuvo que la demanda energética total es la siguiente:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qtot (kWh)	9612	8681	9398	9095	9184	8681	8544	8545	8268	8971	8888	9398

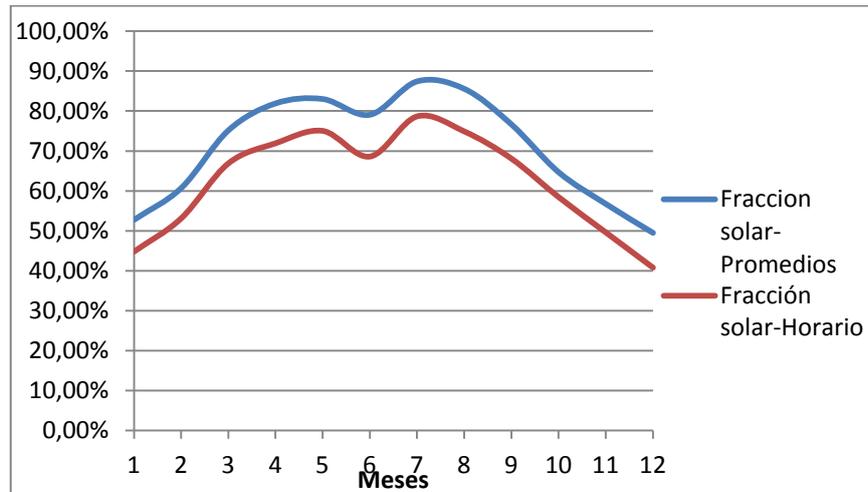
A partir de dicha demanda y mediante el método estático F-chart se determinó la instalación de 26 colectores solares de superficie útil $2,85\text{m}^2$ para poder cubrir el 70% de la energía necesaria. Con esas condiciones, la fracción solar en cada mes queda:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
F.S.	0,527	0,607	0,751	0,819	0,83	0,791	0,874	0,856	0,766	0,647	0,567	0,495

El siguiente fue es dimensionar y seleccionar los distintos elementos que componen la instalación. Éstos son:

- Tanque de almacenamiento
- Intercambiador de calor
- Sistema de tuberías
- Sistema de bombeo
- Caldera auxiliar

Con el diseño hecho a partir del método estático se analiza mediante el método dinámico de Duffie-Beckman obteniendo la siguiente gráfica comparativa:



A partir del diseño del sistema, se hace el análisis medioambiental y económico de la instalación.

Desde un punto de vista ambiental, destacar que cada año de funcionamiento del sistema de calentamiento solar, ahorra la emisión de 18,57 toneladas de CO₂ a la atmósfera frente a una instalación que funcionase con caldera de Gas Natural.

Desde el punto de vista económico, la instalación requiere de una inversión inicial de 31.402,17€ y la instalación obtiene su rentabilidad a partir del 9 año.

2 Conclusiones y trabajo futuro

A modo de conclusiones, lo más importante es destacar el hecho de que, si bien la implementación de éste tipo de instalaciones requiere de una importante inversión, se puede apreciar su rentabilidad en el medio-largo plazo desde el punto de vista económico, así como las claras ventajas medioambientales y en cuanto a independencia energética que presenta. El hecho de tener cuba un clima tan soleado y tan estable a lo largo del año hace de este tipo de instalaciones una gran oportunidad de desarrollo. El trabajo futuro en este aspecto corresponderá sobre todo a la sociedad cubana y en particular a las autoridades competentes para crear una conciencia al respecto y un marco legal que lo ampare.

En cuanto al proyecto de la residencia en particular, el trabajo futuro consistiría en seguir desarrollando este diseño preliminar hasta que cogiese la forma de un proyecto ejecutable.



3 Normas y referencias

3.1 Programas utilizados

- Microsoft Office Excel: Hoja de cálculo
- Autocad: Programa para dibujo asistido por ordenador
- Engineering Equation Solver (EES): Programa resolutorio de sistemas de ecuaciones

3.2 Bibliografía

1. Ministerio de Vivienda, *Código Técnico de la Edificación (CTE)*. 2006.
2. Duffie, John A. y Beckman, William A, *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th ed. 1980: Wiley.
3. Dr. César Cisneros, *Apuntes de la asignatura Energía solar térmica*, Centro de estudio de tecnologías energéticas renovables. 2014.
4. ATECYR, IDAE, RITE, *Guía técnica para agua caliente sanitaria central*, Ministerio de industria, turismo y comercio, Gobierno de España.
5. Dr. César Cisneros, *Comunicación personal*. 2016.
6. Incropera, F. y DeWitt, D., *Fundamentos de transferencia de calor*. 1999.
7. Massipe, Abdala, Despaigne, Cañada -[CIES], *Estudio comparativo del comportamiento térmico de colectores solares integrales y planos en el clima de Cuba*. Tecnología química.
8. Hernández, Miguel Á., *Cálculo dinámico de instalaciones solares térmicas en edificios. Método Duffie-Beckman*. 2004, Centro Integrado de FP Superior de Energías Renovables.



Anexo A: Fotos del emplazamiento



Imagen A-1: Vista exterior de las residencias en el campus



Imagen A-2: Perspectiva amplia de las residencias en el campus



Imagen A-3: Vista de las escaleras interiores que dan acceso a las distintas habitaciones.



Imagen A-4: Vista de la zona común de la residencia.



Imagen A-5: Vista de uno de los cuartos de las habitaciones compartidas



Anexo B: Valoración del trabajo por parte del tribunal docente del CETER

CETER 

Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables

A quien pueda interesar

El estudiante Eduardo Vecino ha desarrollado el trabajo titulado “Cálculo de una instalación solar térmica de agua caliente sanitaria para el hotelito de la CUJAE”. Este trabajo fue desarrollado en el período de su estancia aquí en el Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), la cual se extendió desde septiembre de 2015 a febrero de 2016.

El estudiante de referencia mostró buena capacidad e independencia en el desarrollo y toma de decisiones dentro del trabajo realizado. Mostró además buen conocimiento y habilidad en el empleo de las herramientas informáticas que le sirvieron de ayuda en la realización del trabajo.

La defensa del trabajo se realizó ante un tribunal docente del CETER y el mismo valoró que el trabajo tiene la calidad para obtener la máxima calificación.

Tribunal:

Dr. Rubén Borrajo Pérez.

Presidente

MsC. José Augusto Medrano.

Secretario

Dr. Antonio Sarmiento Sera.

Oponente

Dr. César Cisneros Ramírez

Director ps CETER

