

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



INGENIERÍA INDUSTRIAL

Especialidad Materiales

Resumen de PROYECTO FIN DE CARRERA

“Análisis de sistemas de agua caliente sanitaria en viviendas unifamiliares – Comparación entre la situación finlandesa y española.”

(Analysis of solar water heating systems in single family houses - Comparison between Finnish and Spanish situation)

AUTOR: NATALIA VENCE LINARES

TUTOR TUT: TIMO KALEMA

TUTOR UC3M: MÓNICA CAMPOS GÓMEZ

UNIVERSIDAD:



TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUNIO, 2011

Resumen

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (TUT), Finlandia

Departamento de Mecánica y Diseño

VENCE LINARES, NATALIA: Análisis de sistemas de agua caliente sanitaria en viviendas unifamiliares – Comparación entre la situación finlandesa y española.

Proyecto fin de carrera, 118 páginas, 46 páginas de apéndices.

Junio 2011

Examinador: Profesor Timo Kalema

Palabras clave: energía solar, irradiación, instalación solar térmica, energía solar útil, ACS (agua caliente sanitaria), calefacción solar, regulaciones energéticas, situación de energía solar en Finlandia, situación de energía solar en España, colector solar, análisis de instalaciones de ACS, ACS en viviendas unifamiliares.

El objetivo de este proyecto es analizar la energía solar útil que puede ser obtenida en instalaciones solares enfocadas a la obtención de agua caliente sanitaria (ACS) en una vivienda unifamiliar. El análisis se ha realizado para dos países con diferentes condiciones climatológicas (España y Finlandia). Se ha implementado una casa virtual con el objetivo de tener las mismas características y especificaciones en ambos países, de modo que los resultados obtenidos tras el análisis no dependan de las características físicas, sino solamente de las climatológicas.

Primeramente, se ha realizado un amplio estudio sobre la energía solar, sus aplicaciones, tipos de instalaciones y de diferentes sistemas; para así tener una buena base teórica antes de realizar el análisis y las simulaciones.

Consiguientemente, ha sido analizada la situación climatológica y energética en ambos países. Asimismo, las regulaciones energéticas, las cuales en ambos países están basadas en las directivas europeas, han sido estudiadas para así poder llevar a cabo las simulaciones de acuerdo a éstas.

Tras el estudio teórico se procede a realizar las simulaciones. Éstas se han realizado con el software RETScreen, ampliamente usado para instalaciones basadas en energías renovables. La finalidad de estas simulaciones es obtener el efecto de varios factores sobre la energía útil total y el comportamiento de la instalación cuando se varían los siguientes parámetros: la inclinación de los colectores, el tipo de colector (colector de placa plana o de vacío, que son los tipos analizados) y la superficie total colectora. Por tanto, con estos análisis se quiere alcanzar la solución óptima para la instalación solar en cada país.

Finalmente, se ha realizado un análisis económico para obtener la inversión mínima necesaria para la instalación solar óptima en cada país; teniendo en cuenta las formas más comunes de obtención de ACS en viviendas unifamiliares.

Resumen ampliado

Este proyecto se ha llevado a cabo en la Tampere University of Technology, en la ciudad de Tampere (Finlandia), bajo la supervisión del Profesor Timo Kalema, del departamento de Mecánica y Diseño. El idioma original de este proyecto es inglés, fue aprobado el 6 de abril de 2011, y calificado el 8 de junio de 2011.

1 Introducción

España y Finlandia, como países europeos, no tienen muchas diferencias: tienen la misma moneda, son países desarrollados, democráticos, etc. Pero, climatológicamente hablando, no son tan parecidos. Esta es una de las razones por las cuales estos países son comparados en este proyecto fin de carrera, porque son representativos de los extremos climáticos en Europa.

En este proyecto se cubre toda la fundamentación teórica sobre energía solar necesaria; desde las reacciones en el núcleo solar hasta el último intercambiador de calor que hace posible tener agua caliente en el grifo de casa. Se ha realizado un amplio estudio sobre: la radiación solar recibida por una superficie horizontal, las diferentes tecnologías solares que existen hoy en día, los tipos de instalaciones que usan la energía del sol para diferentes fines, los sistemas de agua caliente sanitaria (ACS), y las instalaciones de ACS junto con sus componentes. Todo este estudio se ha realizado con el fin de tener una buena base sobre la cual fundamentarse y ser capaz de hacer los análisis que se van a llevar a cabo.

Pero antes de comenzar los análisis directamente, es importante saber y aprender las condiciones climatológicas en cada país, y cómo éstas interfieren con los rayos solares. Y no sólo las condiciones climatológicas son el factor importante, también lo es la situación energética en cada país. Además, como España y Finlandia son ambos miembros de la Unión Europea (UE), deben actualizar sus normativas y regulaciones para cumplir los requerimientos de la UE vía las directivas europeas. De hecho, los estados miembros han hecho un acuerdo en el cual se comprometen a alcanzar la “meta 20-20-20”, la cual consiste en reducir el consumo de energía primaria en un 20% para el año 2020.

Por consiguiente, España y Finlandia están buscando nuevas formas de obtener energía renovable, por lo que aquí aparece la necesidad de instalar nuevos sistemas para usar la mayor fuente de energía gratis, llamada Sol. En este proyecto se estudia una instalación solar térmica en una vivienda unifamiliar situada en España y en Finlandia. Estas casas no existen en la vida real, sino que una casa virtual será implementada para ambos países. Esta vivienda virtual tendrá exactamente las mismas características

físicas y especificaciones en ambos países. Sin embargo, la diferencia serán las condiciones climatológicas, las cuales en España y Finlandia son muy dispares.

Una vez que la vivienda virtual está definida, las simulaciones pueden ser llevadas a cabo. Estas simulaciones se realizan con un programa informático ampliamente usado en instalaciones de energía renovable, llamado *RETScreen*. Por tanto, uno de los objetivos de este proyecto es aprender y alcanzar un nivel de usuario avanzado de esta herramienta informática.

Varios análisis se realizan en este trabajo: una simulación inicial para dimensionar las viviendas virtuales y sus necesidades caloríficas, la cual es no renovable; y el resto de las simulaciones se llevan a cabo con una instalación solar térmica. En este primer estudio, se deduce la inclinación óptima de los colectores para obtener el máximo posible de energía solar útil. Además, se realiza una comparación del funcionamiento del sistema térmico entre el caso de tener instalados colectores de placa plana y el de tener colectores de tubo de vacío. Asimismo, para cada tipo de colector, se obtendrá por iteración el valor óptimo de la superficie total colectora.

A continuación, una vez alcanzada la solución óptima para cada país, se realiza un análisis económico. Éste consiste en obtener la inversión permitida para cada instalación en cada país. Para ello, es analizada la fuente de energía más comúnmente usada para calefacción en España y en Finlandia, para que el estudio sea más realista y la inversión permitida más fiable.

Finalmente, con todos los resultados obtenidos de los análisis y estudios, se deducen las conclusiones para cada caso sobre la energía solar útil, la inclinación óptima de los colectores y la mejor configuración colectora, tanto tipo como área de colectores.

2 Objetivos

Los objetivos de este proyecto de fin de carrera son:

- Adquirir conocimientos sobre el sol como fuente de energía.
- Aprender y entender cómo calcular la energía radiativa suministrada por el sol.
- Adquirir conocimientos sobre las diferentes tecnologías para captar y recoger la energía solar.
- Comprender cómo un sistema solar térmico funciona, y sus componentes.
- Aprender y estudiar las normas referentes a las instalaciones solares en Europa en general, y en España y Finlandia en particular.
- Aprender y convertirse en usuario del programa informático *RETScreen*.
- Analizar cuál es la mejor inclinación de los colectores para obtener la máxima energía solar útil posible.
- Comparar, para las mismas necesidades de una vivienda unifamiliar modelo, los beneficios y desventajas de usar diferentes tipos de colectores y diferente superficie colectora.
- Comparar y analizar la energía solar útil obtenida en cada país de una instalación solar térmica para la obtención de ACS en una vivienda unifamiliar en España y en Finlandia.

- Realizar un análisis económico para obtener el valor de la inversión permitida para cada instalación, teniendo en cuenta la situación energética de cada país.

3 Fundamentación teórica de instalaciones de energía solar y situación española y finesa

En este capítulo del proyecto fin de carrera se abarca toda la información teórica y de normativa necesaria para tener un buen fundamento para el posterior estudio. No merece la pena resumir estos apartados, ya que la información que en ellos se incluye es bastante extensa, por lo que sólo se enumera bajo estas líneas el índice de dichos apartados¹.

3.1 Fundamentación teórica de instalaciones de energía solar

Los puntos sobre los que se estudia son:

1. Definición de energía solar
2. Fundamentos teóricos
 - 2.1. El sol
 - 2.2. Dirección de la radiación directa
 - 2.3. Radiación solar
 - 2.4. Radiación solar sobre una superficie inclinada
 - 2.5. Pérdidas de radiación debido a la disposición de los colectores
3. Tecnologías de energía solar
 - 3.1. Calentamiento solar
 - 3.2. Potencia solar
 - 3.3. Hidrógeno solar y otros combustibles
 - 3.4. Otros
 - 3.5. Visión económica
4. Instalaciones solares térmicas
 - 4.1. Tipos de instalaciones solares térmicas
 - 4.2. Tipos de sistemas de obtención de agua caliente sanitaria
 - 4.3. Componentes de sistemas de calentamiento de agua

3.2 Situación española y finesa

Las situaciones de cada país, tanto geográfica, energética, económica y climática se subdividen en los siguientes apartados:

1. Introducción
 - 1.1. El efecto de la intermitencia
 - 1.2. Variación anual de la insolación solar

¹ Se recomienda consultar el documento original para información más detallada

2. Normativa europea
3. Situación finesa
 - 3.1. Energías renovables en Finlandia
 - 3.2. Energías usadas en calentamiento
 - 3.3. Datos climatológicos fineses
 - 3.4. Normativa finesa
4. Situación española
 - 4.1. Energías renovables en España
 - 4.2. Datos climatológicos españoles
 - 4.3. Normativa española

4 Análisis

El objetivo principal de este proyecto fin de carrera es comparar una vivienda unifamiliar, con idénticas características, en dos situaciones climatológicas diferentes. Para ello, la primera parte del análisis es determinar el modelo de vivienda que será estudiado en ambos países.

En segundo lugar, se dimensiona la potencia necesaria, con fuentes de energía no renovables, para calefactar esa casa virtual con el programa RETScreen, lo cual representará la situación actual en una vivienda unifamiliar. Además, al inicio de las simulaciones, antes de realizar ningún estudio, se realiza una verificación de los datos climáticos proporcionados por el software usado.

Seguidamente, se lleva a cabo un estudio sobre una instalación solar térmica, basado también en RETScreen. Para ello, primeramente se realiza un análisis para obtener cuánta energía es necesaria para calentar el ACS demandada en cada país. Después, en el análisis de la instalación solar en sí, se estudia la situación energética con diferentes tipos de colectores y con diferentes superficies colectoras, para determinar qué solución es mejor para cada país.

Finalmente, se realiza un análisis económico de la instalación solar. En él se estudiará la viabilidad, es decir la inversión permitida, de cada caso.

4.1 Situación geográfica y física

- El emplazamiento de las viviendas virtuales es:
 - Caso finlandés: en la ciudad de Tampere, cuyas coordenadas son $61^{\circ}29'53''\text{N}$ y $23^{\circ}45'39''\text{E}$. Tampere es la segunda ciudad más grande de Finlandia, y se encuentra en el norte de Helsinki, la capital de Finlandia.
 - Caso español: en la ciudad de Madrid, cuyas coordenadas son $40^{\circ}40'00''\text{N}$ y $03^{\circ}70'00''\text{O}$. Es la capital de España, y está situada en el centro del país.
- Ambos grupos de colectores estarán orientados hacia el sur, sin edificios u obstáculos (por ejemplo: árboles, edificios colindantes, etc.) que puedan producir sombras sobre la superficie colectora.

- Los colectores serán fijo y con inclinación fija también. El ángulo óptimo de inclinación, β_{opt} , para recibir la máxima cantidad de radiación solar directa depende del período de uso de la instalación solar:
 - Consumo anual constante: la inclinación deberá ser igual a la latitud, $\beta = \varphi$.
 - Consumo preferencial en invierno: la inclinación deberá ser igual a la latitud incrementada en 10° , $\beta = \varphi + 10^\circ$.
 - Consumo preferencial en verano: la inclinación deberá ser igual a la latitud reducida en 10° , $\beta = \varphi - 10^\circ$.

Por tanto, como valor inicial para el posterior cálculo, se considerará un consumo anual constante. Consecuentemente, los ángulos de inclinación de los colectores en cada país son:

- Caso finlandés: $\beta = \varphi_{Tampere} = 61^\circ$.
- Caso español: $\beta = \varphi_{Madrid} = 40^\circ$.

Sin embargo, estos como parte del análisis, se hará una variación de la inclinación de los colectores con el in de encontrar la pendiente óptima, β_{opt} , con la cual más radiación solar anual se reciba.

4.2 Modelo de vivienda

El tipo de casa objeto de estudio en este proyecto es una vivienda unifamiliar. Ésta es emplazada virtualmente en cada país, y va a tener las mismas características: mismas dimensiones, orientación y número de ocupantes.

Para que este estudio sea coherente, esta vivienda virtual que es analizada debe de ser lo más cercana a la realidad posible. Por tanto, para diseñar la casa, el número de habitantes y la superficie habitable de la casa debe de ser determinada. Para ello se usan datos europeos estadísticos, cuyas fuentes son: Eurostat (European Comissoin, 2011) y el documento *Housing Statistics in the European Union 2010* (Dol & Haffner, September 2010).

Los valores obtenidos son:

- Número de habitantes: tres. Se ha llegado a la conclusión de este valor distinguiendo entre viviendas unifamiliares y bloques de viviendas, además tratar de obtener el valor más aproximado posible para una vivienda estándar, como por ejemplo, evitando viviendas desocupadas.
- Dimensión: superficie habitable: 110 m^2 . Tanto en Finlandia como en España, este valor es muy similar.

4.3 Análisis con el software

Todos los análisis realizados, tanto el no renovable inicial como los subsecuentes de la instalación solar, se llevan a cabo con el programa RETScreen (Natural Resources Canada, 2010). Se trata de un software gratuito dirigido a análisis de proyectos basados en energías limpias, con el cual se puede evaluar: la producción de energía y ahorros, costes, reducciones de la emisión, viabilidad financiera y análisis de riesgo para varios tipos de energías renovables y tecnologías energéticamente eficientes.

4.3.1 Análisis no renovable

Primeramente, antes de empezar a estudiar la instalación solar térmica, debe de ser dimensionada el actual sistema de calentamiento de la vivienda virtual. Y por tanto, esta situación va a ser la que va a ser mejorada con la instalación de calentamiento solar.

La diferencia entre ambos sistemas es que, en Finlandia, como el clima es más frío, la potencia necesaria para calefactar la casa y para obtener la demanda de ACS va a ser mayor que en España. Esta es la razón por la cual este análisis de va a ser analizado separadamente en cada país.

Algunas de las características en ambos sistemas son las mismas en ambos análisis, pero otras no; éstas serán explicadas para cada país. Las especificaciones necesarias para la simulación en RETScreen se enumeran a continuación² (el programa se ha utilizado en inglés):

Información del proyecto (Project information)

- Proyecto de calentamiento (Heating project).
- Tecnología de caldera (Boiler technology).
- Poder calorífico inferior (Lower Heating Value, LHV)

Condiciones del lugar de referencia (Site reference conditions)

- **Finlandia**

Los datos climáticos proporcionados por RETScreen y mejorados para la ubicación específica que se usan en las simulaciones son:

Tabla 4.3.1. Datos climáticos de la ubicación del proyecto finlandés (Tampere).

	Unit	Climate data location	Project location
Latitude	°N	61,3	61,4
Longitude	°E	23,6	23,5
Elevation	m	112	112
Heating design temperature	°C	-29,0	
Cooling design temperature	°C	24,9	
Earth temperature amplitude	°C	19,9	

- **España**

Los datos actualizados para la ubicación del proyecto en España aparecen en la tabla siguiente.

² En el documento completo del proyecto fin de carrera, en inglés, se explica el por qué se han seleccionado estos valores y especificaciones.

Tabla 4.3.2. Datos climáticos de la ubicación del proyecto español (Madrid).

	Unit	Climate data location	Project location
Latitude	°N	40,4	40,4
Longitude	°E	-3,7	-3,7
Elevation	m	667	667
Heating design temperature	°C	-16,0	
Cooling design temperature	°C	34,9	
Earth temperature amplitude	°C	23,6	

Modelo energético (Energy model)

- Superficie calentada (Heated floor area for building): 110 m²
- Carga térmica (Heating load for building): Depende de la temperatura de diseño y el nivel de aislamiento. Para ambos casos, se decide un nivel de aislamiento medio
 - **Finlandia:** la carga térmica para la vivienda de Tampere es de 80 W/m².
 - **España:** la carga térmica para la vivienda de Madrid es 65 W/m².

Con esta información, el programa ya es capaz de calcular la energía total necesaria para calefacción y ACS. Los resultados son expresados en el capítulo 5.

- Demanda base de ACS (Domestic hot water heating base demand): 25%.
- Tipo de fuel (Fuel type): Electricidad. Pese a que en España es menos común el uso de este tipo de calderas, se ha decidido usar una caldera eléctrica para ambos casos. De este modo, ambas casas virtuales poseen las mismas características y por tanto su comparación será objetiva.
- Eficiencia estacional (Seasonal efficiency): 100%. Es el valor correspondiente a la eficiencia de calentamiento por Resistencia eléctrica.

Los resultados de consumo de energía se muestran en el Capítulo 5.

4.3.2 Análisis de las necesidades de calor para ACS

Una vez obtenidos los datos de consumo de energía, el estudio de la instalación solar térmica puede ser llevado a cabo.

Sin embargo, antes de anda, debe de ser determinada la potencia necesaria para calentar el ACS demandada. Éste será, por tanto, el análisis previo a realizar antes de estudiar la variación de la inclinación, el tipo y el área de los colectores.

Información del proyecto (Project information)

- Proyecto de calentamiento (Heating project).
- Tecnología calentamiento solar de agua (Solar water heater technology).
- Poder calorífico inferior (Lower Heating Value, LHV)

Condiciones del lugar de referencia (Site reference conditions)

Son los mismos que en la simulación anterior.

Modelo energético (Energy model)

Características de la carga

- Aplicación (Application): Agua caliente (Hot water).
- Tipo de carga (Load type): Casa (House).
- Número de habitantes (Number of occupants): 3.
- Ratio de ocupación (Occupancy rate): 100%, por ser una vivienda.
- Temperatura de agua caliente (Hot Water Temperature): 60 °C.

Los datos sobre el consume de agua caliente por persona y por día en cada país, de acuerdo con su respectiva normativa es:

- **Finlandia:** 50 litros/persona·día a 58°C. (Rakennetun ympäristön osasto [Built Environment Division.], 2011).
- **España:** 30 litros/persona·día a 60°C. (CTE, 2009).

Con el objetivo de realizar este estudio lo más objetivo posible, se considerará un valor de 60°C para ambos países.

- Demanda diaria de agua caliente (Daily hot water use):
 - **Finlandia:** 50 litros/persona·día.
 - **España:** 30 litros/persona·día.
- Días por semana operativos (Operating days per week): 7 días, por tratarse de una vivienda.

Estas son las necesidades y especificaciones de la vivienda modelo. La energía de calentamiento necesaria para ACS para cada casa es un resultado de la simulación, y por tanto aparece en el capítulo 5.3.

4.3.3 Análisis de la instalación solar

Al ser conocidas las necesidades de calor para producir el ACS demandada, el análisis sobre las características de la instalación solar puede ser llevado a cabo.

Se van a realizar diferentes análisis sobre las dos casas, cambiando una característica cada vez. La comparación, el estudio de diferencias y similitudes, y la mejora del sistema se pueden ver en el siguiente capítulo. Estas características o especificaciones que van a ser modificadas son:

- Pendiente, β , de los colectores
- Tipo de colector: de placa plana y de tubos de vacío.
- Área de colectores / número de colectores.

Las características comunes son explicadas a continuación.

Modelo energético (Energy model)

Evaluación de los recursos (Resource assessment)

- Modo de seguimiento solar (Solar tracking mode): fijo.
- Pendiente (Slope): es la variable del primer análisis de la simulación solar.
- Azimut: 0°, para ambos casos.

Calentador solar de agua (Solar water heater)

- Tipo de colector (Collector type): es la variable del Segundo análisis.
- Número de colectores (Number of collectors): es la variable en el tercer análisis.

- Pérdidas diversas (Miscellaneous losses): 5%.

Balance del sistema y otros (Balance of system & miscellaneous)

- Almacenamiento (Storage): sí.
- Capacidad de almacenamiento / area solar colectora (Storage capacity / solar collector area): 75 l/m².

Cuanto mayor sea el almacenamiento, el mejor el sistema se va a través de largos períodos de tiempo con poco sol, aunque esto aumentará las pérdidas en equipos y los costos iniciales. Como una primera estimación, un valor nominal podría ser de 75 l/m²; el rango de valores típicos es de 37.5 a 100 l/m². (Natural Resources Canada, 2010)

Otra restricción se encuentra en la normativa española (CTE, 2009), que dice que la ecuación 4.3-1 se deben cumplir. Donde V_s es el volumen del dispositivo de almacenamiento [l] y A_{Tc} es el área total colectora [m²]

$$50 < \frac{C_s}{A_{Tc}} < 180$$

Ecuación 4.3-1

Por tanto, para cumplir todas las condiciones, el valor de 75 l/m² será elegido.

Sin embargo, dependiendo del tipo de colector, si la capacidad de almacenamiento resultante es mucho menor / mayor que el consumo de agua caliente sanitaria estimada para cada país, este valor se incrementaría / disminuiría.

- Intercambiador de calor (Heat Exchanger): Sí.
- Eficiencia del intercambiador de calor (Heat Exchanger efficiency): 80%.
- Pérdidas diversas (Miscellaneous losses): 7%.
- Potencia de la bomba / área solar colectora (Pump power / solar collector area): 5 W/m².
- Precio de la electricidad (Electricity rate):

En el documento completo del proyecto fin de carrera se presenta una tabla en el Apéndice V.B en el aparecen las estadísticas energéticas de la UE, la cual representa los precios de electricidad de consumo doméstico en 2011.

- **Finlandia:** 0,1192 €/kWh.
- **España:** 0,1696 €/kWh.

4.3.3.1 Primer análisis: variación de la inclinación de los colectores

En la simulación inicial, la pendiente es igual a la latitud, $\beta = \varphi$. Por tanto, para cada país por separado, esta pendiente va a ser modificada hasta que se alcance el máximo de irradiación total anual recibida.

El programa proporciona como dato, para cada ángulo de inclinación, la radiación solar diaria para mes en kWh/m²·día, y después la radiación total anual.

El proceso de este análisis se hace incrementando y disminuyendo el valor del ángulo de inclinación en el rango $(\varphi - 10^\circ) < \beta < (\varphi + 10^\circ)$ con un paso de 1°. Si el valor de la radiación solar anual no decrece, esto supondría que el máximo no ha sido alcanzado aún. En ese caso, una segunda iteración debe de ser realizada, con un rango más amplio de valores: $(\varphi - 20^\circ) < \beta$ y / o $\beta < (\varphi + 20^\circ)$, hasta que se alcance el máximo. Y si aún así, no se alcanza, otra tercera iteración debe de ser llevada a cabo hasta que obtenga el resultado esperado.

Para los subsiguientes análisis realizados, la pendiente para la cual la mayor cantidad de energía es recibida, β_{opt} , será el valor usado.

4.3.3.2 Segundo y tercer análisis: Tipo de colector y variación del área

El segundo análisis consiste en variar el tipo de colector. Dos tipos de colectores serán analizados: de placa plana y de vacío. La razón por la cual los colectores sin cubierta no se van a tener en cuenta es porque no están indicados para este tipo de instalación (se explica ampliamente en el documento original), pues están hechos para aplicaciones de baja temperatura y para ACS se necesitan 60°C .

Sobre el tercer análisis, la variación de la superficie colectora, se realiza dentro de cada segundo análisis para ambos tipos de colectores. Es decir: en primer lugar, el colector plano es estudiado, y entonces su área colectora es modificada; en segundo lugar, el colector de vacío es simulado, y después su área es modificada.

Sin embargo, hay muchos proveedores y diferentes modelos de colectores solares térmicos, y cada uno de ellos tiene su propia área colectora. Esto significa que en el software sólo se puede modificar el número de colectores, no la superficie colectora en sí. Por tanto, la variación de la superficie colectora se llevará a cabo incrementando y disminuyendo el número de colectores en la instalación.

El criterio de selección para elegir un colector entre la base de datos de todos los proveedores proporcionada por RETScreen será el mismo explicado en el capítulo 2.4.3.1 del documento original. Para cada colector, la base de datos de RETScreen proporciona el valor de los parámetros " $F_R(\tau\alpha)$ " y " U_L ". Cuanto mayor es $F_R(\tau\alpha)$, más eficiente será el colector captando energía de la radiación solar. Y cuanto menor es $F_R U_L$, mejor retiene la energía captada en vez de perderla por convección al ambiente.

Para colectores planos, de acuerdo con la finalidad de la instalación solar que se va a estudiar, ACS en climas fríos, el grupo indicado es "Grupos III y IV". Sus valores de referencia se enumeran a continuación:

- Grupo III: Colectores de placa plana, aislados, una cubierta transparente y superficie absorbente selectiva.
 - $0,75 < F_R(\tau\alpha) < 0,85$
 - $5 < F_R U_L < 6 \text{ [W}^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\text{]}$
- Grupo IV: Colectores de placa plana, aislados y con dos cubiertas transparentes.
 - $0,7 < F_R(\tau\alpha) < 0,8$
 - $4 < F_R U_L < 6 \text{ [W}^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\text{]}$

(Colectores de placa plana [Flat plate collectors], 2009)

Por consiguiente, los rangos de valores que son válidos para ambos grupos al mismo tiempo, para estar en el lado conservativo (de seguridad), son:

- $0,75 < F_R(\tau\alpha) < 0,8$
- $5 < F_R U_L < 6 \text{ [W}^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\text{]}$

Por esta razón, los colectores que serán empleados en las simulaciones, y sus características, son:

- Colector de placa plana:

El colector que cumple todas las especificaciones es representado en la Tabla 4.3.3. es conveniente nombrar que se trata de un colector de alta calidad.

Tabla 4.3.3. Colector de placa plana elegido y sus características.

Type	Glazed	
Manufacturer	Edwards Hot Water	
Model	SV Maxorb	
Gross area per solar collector	m ²	1,97
Aperture area per solar collector	m ²	1,81
Fr (tau alpha) coefficient		0,76
Fr UL coefficient	(W/m ²)/°C	5,45

- Colector de tubos de vacío:

Sin embargo, los rangos mencionados anteriormente no son válidos para tubos de vacío. Por tanto, el criterio para la elección de un buen colector de tubos de vacío es como se ha explicado antes: tratando de buscar al mismo tiempo, el mayor valor de $F_R(\tau\alpha)$, y el menor $F_R U_L$.

El colector que aúna ambas características, de entre la base de datos de RETScreen, está representado en la Tabla 4.3.4.

Tabla 4.3.4. Colector de tubos de vacío elegido y sus características.

Type	Evacuated	
Manufacturer	AMK-Solak Systems	
Model	OPC 15 S	
Gross area per solar collector	m ²	2,13
Aperture area per solar collector	m ²	1,71
Fr (tau alpha) coefficient		0,61
Fr UL coefficient	(W/m ²)/°C	1,23

El análisis se llevará a cabo aumentando del número de colectores solares, desde un colector solar a cuatro. Esos valores han sido elegidos porque si están instalados más de 4 colectores, el calor proporcionado no aumenta significativamente, pero sí los costes. En otras palabras, la energía recibida no compensa en comparación con los costes de la instalación que conlleva una gran cantidad de colectores, para una casa en la cual viven un promedio de tres personas.

Relacionado con el número de colectores, lo que significa el área, la capacidad del sistema en comparación con el calor proporcionado, será estudiado y analizado con la fracción de energía solar obtenida.

4.4 Análisis económico

Una vez determinado el número óptimo de colectores y el tipo de colector solar para cada país, se puede conocer el calor total proporcionado para ACS por la instalación solar térmica. Por tanto, esta es la energía primaria ahorrada.

Por consiguiente, se realiza un análisis económico para estudiar la inversión permitida para cada instalación. Para ello, se usa la Ecuación 4.4-1.

$$CRF \cdot I_{allowed} = Q_{saving} \cdot h_{energy}$$

Ecuación 4.4-1

Donde cada componente:

- CRF es el factor de recuperación de capital (Capital Recovery Factor)
- $I_{allowed}$ es la inversión permitida [€]
- Q_{saving} es la energía ahorrada por la instalación de energía renovable [kWh]
- h_{energy} es el precio de la fuente primaria de energía usada en cada caso [€/kWh]

El factor CRF es expresado como:

$$CRF = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

Ecuación 4.4-2

Donde:

- i es el ratio de interés [%]. El valor 0,04 es elegido para ambos países.
- n es el número de años. Se considera que la inversión estará cubierta en 20 años.

Por tanto, sustituyendo estos valores en la ecuación 4.4-2, se obtiene que el factor de recuperación de capital es: $CRF = 0,07$.

5 Resultados

En este capítulo se explica el resumen de los resultados y análisis de las diferentes simulaciones realizadas sobre la instalación solar térmica en las viviendas virtuales.

5.1 Verificación de los datos climáticos

Para ambos países, los datos proporcionados por RETScreen sobre radiación solar se han considerado reales y válidos para realizar los análisis; incluso para en caso de Madrid, en el cual los valores variaban ligeramente.

5.2 Resultados del análisis no renovable

Para la primera simulación de la vivienda virtual, sin instalación solar alguna, se ha analizado el consumo del sistema de calentamiento. Los valores obtenidos sobre las necesidades totales de calentamiento, que van a ser usados en los análisis siguientes sobre la instalación solar térmica son:

- **Finlandia:** 22 MWh/año.
- **España:** 10 MWh/año.

Si se tuviera más información sobre el consumo de electricidad destinado a la iluminación doméstica, de acuerdo con la normativa finlandesa, el consumo máximo permitido de energía primaria debe de ser analizado. De acuerdo a esta normativa (ver capítulo 3.3.4 del documento original) el valor de 204 kWh/m² por año para este tipo de vivienda, para una única fuente primaria de energía, no puede ser sobrepasado.

Concluyendo, como era de esperar, para la casa en Finlandia se necesita más energía para calentar la vivienda, más del doble de lo necesario para la casa española. Esto es

debido a las condiciones climáticas, ya que todas las características físicas y de funcionamiento son idénticas para ambos casos.

5.3 Resultados de las necesidades caloríficas para ACS

La carga térmica de ACS depende de los habitantes de la vivienda, su ratio de ocupación, su consumo diario de ACS, la temperatura a la cual el agua es calentada, los días a la semana en funcionamiento, y por último pero no menos importante la temperatura de suministro de la red general de agua (información también proporcionada por el software RETScreen).

Tras la simulación con el programa informático, se obtienen los resultados de carga térmica que se enumeran a continuación:

- **Finlandia:** 3,5 MWh/año.
- **España:** 1,7 MWh/año.

Como se puede apreciar, la carga térmica en Finlandia es casi el doble que en el caso español. Esto es principalmente debido a que los valores de consumo de ACS de referencia proporcionados por la normativa de cada país difieren: en Finlandia la media de consumo de ACS es de 50 l/persona·día mientras que en España la media es menor, teniendo un valor de 30 l/persona·día.

Además, incluso si en España el consumo medio de ACS fuera el mismo que en Finlandia, el valor de carga térmica obtenido sería de 2,9 MWh/año, que sigue siendo inferior a la carga de 3,5 MWh/año del caso finés. Esto es debido, de nuevo, a las condiciones climáticas.

Por un lado, la temperatura de suministro de la red general de agua en Finlandia es inferior a la española, como se puede apreciar en la Tabla 5.3.1., por lo tanto es necesaria más energía para calentar el agua hasta los 60°C requeridos.

Tabla 5.3.1. Temperatura de suministro de la red general de agua en Tampere y Madrid.

Temperatura del agua (°C)	Tampere	Madrid
Mínimo	1,0	11,5
Máximo	8,8	17,9

Y por otra parte, la temperatura exterior es menor en Finlandia, por lo que la superficie de los colectores está más fría, y por supuesto la radiación solar recibida en Tampere es mucho menor que la que se recibe en Madrid; debido al clima, la situación geográfica y las condiciones meteorológicas (por ejemplo nieve, viento, etc.)

5.4 Resultados del análisis de la instalación solar

5.4.1 Resultados del primer análisis: variación de la inclinación de los colectores

Como se explicó en el apartado de análisis, cada casa ha sido analizada por separado. La pendiente ha sido modificada iterando, incrementando y disminuyendo el ángulo de inclinación de los colectores en un rango de: $(\varphi - 10^\circ) < \beta < (\varphi + 10^\circ)$ con paso 1°.

Los resultados de la inclinación óptima obtenidos se muestran a continuación.

- **Finlandia:** $\beta_{\text{optT}} = 48^\circ = \varphi - 13^\circ$.
- **España:** $\beta_{\text{optM}} = 32^\circ = \varphi - 8^\circ$.

Como se puede apreciar, en ambos casos el ángulo de inclinación óptimo ha resultado ser inferior al del caso inicial, en el que la inclinación era igual a la latitud. Esto indica que, como se indicó en el capítulo anterior, esta instalación con esta inclinación estaría diseñada para tener consumo preferencial en verano.

Para el caso de Finlandia, esta situación llama la atención porque la inclinación es mayor que $\beta = \varphi - 10^\circ$; lo cual es entendible debido a que en Finlandia el sol en verano está mucho más alto que en España. Además, el hecho de diseñar la instalación para Finlandia con consumo preferencial en invierno no tiene sentido, ya que la energía recibida en diciembre, enero y febrero es casi despreciable; añadiendo el hecho de que la nieve debería de ser retirada regularmente de modo que los colectores no estén cubiertos.

En conclusión, para el caso finés, es una buena elección dejar el ángulo de inclinación en esta inclinación óptima. En cambio, para el caso español, aunque el ángulo óptimo haya dado como resultado consumo preferencial en verano, los colectores en España se suelen diseñar para consumo anual; de esta forma se recibe más energía en los meses más fríos, que es cuando más se necesita, disminuyendo así la radiación solar total anual para un mejor aprovechamiento de la instalación.

5.4.2 Resultados del Segundo y tercer análisis

Para cada simulación hay varias restricciones que deben de ser cumplidas. Éstas están descritas en los capítulos 3.3.3 y 3.4.3 referidas a la normativa finesa y española respectivamente (consultar el documento original para más información). En concreto, las que conciernen para estos análisis son las de la restricción de área total de colectores (total collector area) y la de la fracción solar (solar fraction).

Antes de llegar a ninguna conclusión, hay que tener en cuenta que ambos modelos de colectores elegidos, tanto el de placa plana como el de vacío, son ambos colectores de alta calidad. Esto significa que son más caros que otros colectores promedio disponibles en el mercado, y que su rendimiento es claramente superior a estos últimos nombrados.

Caso finés

Para ambos tipos de colectores, el número óptimo de colectores es dos. Sin embargo, se debe considerar que la superficie colectora de cada tipo de colector es diferente, aunque es bastante similar.

Sobre qué tipo de colector usar, analizando las características que nos proporciona RETScreen (para más información ver el documento original), se aprecia que el área colectora de los de vacío es un 8% mayor que la de los de placa plana, por lo que esto es una de las razones, no la más importante, por la cual el rendimiento de estos colectores de vacío resulta mayor que los de placa.

Sin embargo, se realiza una comparación sobre la fracción solar y la demanda de ACS cubierta por ambos tipos de colectores, como se muestra en la Figura 5.4.1 (en inglés).

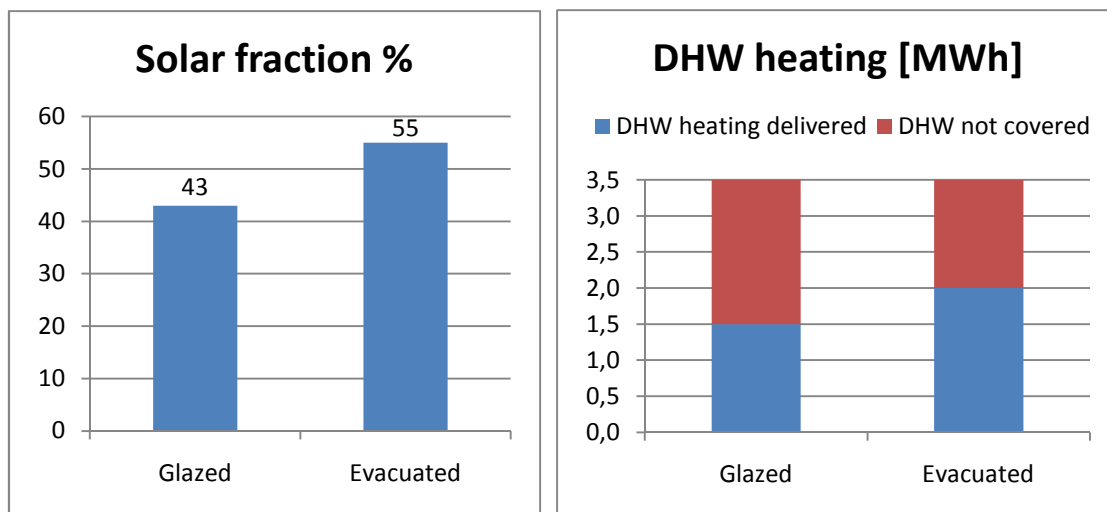


Figura 5.4.1. Comparación de la fracción solar y ACS suministrada para los diferentes tipos de colectores para el caso finés.

Como se puede apreciar, los colectores de vacío aportan 0,5 MWh más que los de placa plana sobre la demanda de ACS, además de que la fuente de energía solar está mejor aprovechada con los colectores de vacío por lo que se puede ver en el gráfico de la fracción solar. Por tanto, incluso siendo el área de los colectores de placa plana menor que los de vacío, el rendimiento de estos últimos es mejor.

Sin embargo, antes de decidir qué colector adquirir para la instalación, se deben de analizar los aspectos económicos por si es viable, ya que los colectores de vacío son mucho más costosos que los de placa plana, y las ventajas energéticas son similares.

Por tanto, concluyendo, dos colectores de placa plana es la mejor opción para la vivienda localizada en Tampere. En cambio, si el presupuesto no es una restricción para el proyecto, la mejor opción sería la de adquirir dos colectores de tubos de vacío.

Caso español

Después de los resultados obtenidos en el análisis de la vivienda localizada en Madrid, se llega a tres posibles soluciones: un colector de placa plana, dos colectores de placa, o bien un colector de vacío. Por lo tanto, se realiza una comparación sobre el rendimiento de estos casos. Para ello la Figura 5.4.2 representa la comparación sobre la fracción solar y la demanda de ACS cubierta por las diferentes posibilidades (en inglés).

Como se puede apreciar, la fracción solar obtenida por los dos colectores de placa plana y el de vacío es bastante similar; lo mismo sucede con el ACS suministrada por la instalación solar. Sin embargo, para los dos colectores de placa plana, como la superficie colectora total es mayor, mayor será el dispositivo de almacenamiento necesario.

Por lo tanto, si para obtener el mismo rendimiento se deben adquirir dos colectores planos en vez de uno de vacío, y se necesita un dispositivo de almacenamiento mayor, los colectores planos son menos recomendables que el de vacío, ya que es la solución más costosa. Para concluir, la mejor opción para la situación española es la de adquirir un único colector de vacío.

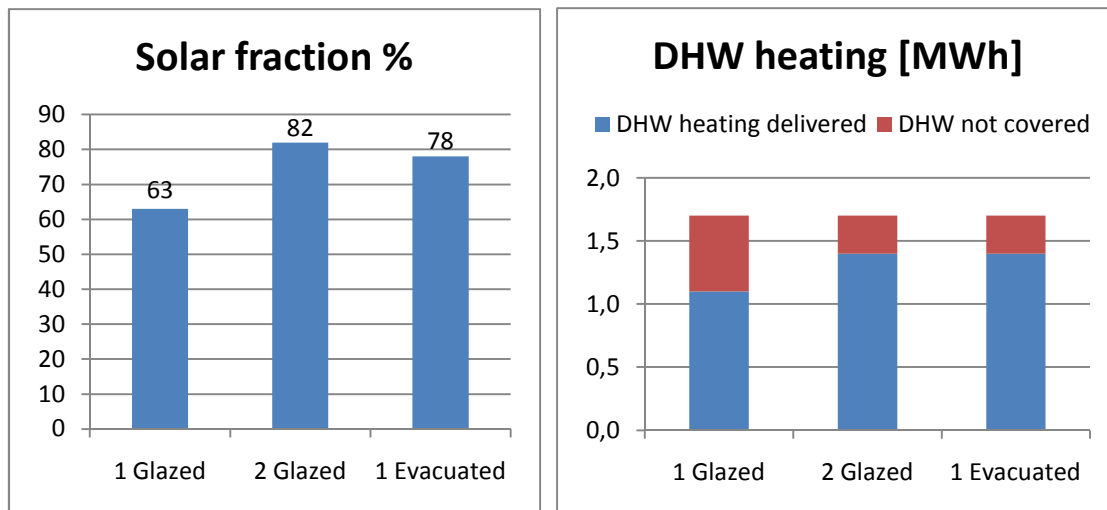


Figure 5.4.2. Comparación de la fracción solar y ACS suministrada para las diferentes soluciones para el caso de Madrid.

Otra conclusión que se puede deducir de este análisis es que la inclinación del colector para la ubicación española debería de ser diseñado para preferencia de consumo anual ($\beta = \varphi$) o incluso preferencia de invierno ($\beta = \varphi + 10^\circ$). Porque de este modo se evitarían las situaciones de sobrecalentamiento en los días más soleados, y se aprovecharía mejor la energía solar para los meses en los que la demanda es mayor, esto es, en invierno.

5.5 Resultados del análisis económico

En este apartado se obtiene la inversión permitida para la instalación solar térmica para obtención de ACS en cada país. Como se explica en el capítulo anterior, la Ecuación 4.4-1 será la utilizada, con un factor CRF de 0,07.

5.5.1 Análisis económico para el caso finés

Para la vivienda de Tampere, la solución solar térmica ha sido adquirir dos colectores de placa plana. Y con esta instalación 1,5 MWh de los 3,5 MWh demandados para ACS es cubierta.

Por lo tanto, la inversión permitida para la instalación solar térmica en Finlandia se expresa con la Ecuación 5.5-1.

$$CRF \cdot I_{allowedF} = Q_{savingF} \cdot h_{energyF} \quad \text{Ecuación 5.5-1}$$

Donde cada componente significa:

- $I_{allowedF}$ es la inversión permitida para el caso finés. Este es el valor que va a ser despejado.
- $Q_{savingF}$ es la energía ahorrada por la instalación renovable en Finlandia [kWh]. La cual para dos colectores de placa plana es: $Q_{savingF} = 1,5 \cdot 10^3$ kWh.
- $h_{energyF}$ es el precio de la fuente primaria de energía usada en Finlandia [€/kWh]. Siendo el precio de la electricidad en Finlandia de: $h_{energyF} = 0,1192$ €/kWh.

Por tanto, sustituyendo estos valores en la ecuación anterior, se obtiene la expresión:

$$I_{allowedF} = \frac{Q_{savingF} \cdot h_{energyF}}{CRF} = \frac{1,5 \cdot 10^3 \cdot 0,1192}{0,07} = 2.554,29\text{€}$$

Ecuación 5.5-2

En resumen, la inversión permitida en Finlandia es: $I_{allowedF} = 2.554,29\text{€}$.

5.5.2 Análisis económico para el caso español

Para la vivienda de Madrid, la solución solar térmica ha sido adquirir dos colectores de placa plana. Y con esta instalación 1,4 MWh de los 1,7 MWh demandados para ACS es cubierta.

Por lo tanto, la inversión permitida para la instalación solar térmica en Finlandia se expresa con la Ecuación 5.5-3.

$$CRF \cdot I_{allowedS} = Q_{savings} \cdot h_{energyS}$$

Ecuación 5.5-3

Donde cada componente significa:

- $I_{allowedS}$ es la inversión permitida para el caso español. Este es el valor que va a ser despejado.
- $Q_{savings}$ es la energía ahorrada por la instalación renovable en España [kWh]. La cual para dos colectores de placa plana es: $Q_{savings} = 1,4 \cdot 10^3$ kWh
- $h_{energyF}$ es el precio de la fuente primaria de energía usada en España [€/kWh].

Sobre esto, se realizan dos análisis con fuentes de energía diferentes. Uno para el caso de las simulaciones, usando una caldera eléctrica, donde el precio por kWh de electricidad se considerará. Y el otro análisis se llevará a cabo usando una caldera de Gas Natural, ya que es la fuente de energía más usada para calefacción en España; para este análisis se considerará el precio por kWh de Gas Natural en España.

Caldera eléctrica

El precio de la electricidad en España es $h_{energyS}(Electr) = 0,1696$ €/kWh, por lo que sustituyendo en la Ecuación 5.5-3:

$$I_{allowedS}(Electr) = \frac{Q_{savings} \cdot h_{energyS}(Electr)}{CRF} = \frac{1,4 \cdot 10^3 \cdot 0,1696}{0,07} = 3.392\text{€}$$

Ecuación 5.5-4

Caldera de Gas Natural

El precio del Gas Natural en España es: $h_{energyS}(NatGas) = 0,0506$ €/kWh, por lo que sustituyendo en la Ecuación 5.5-3:

$$I_{allowedS}(NatGas) = \frac{Q_{savings} \cdot h_{energyS}(NatGas)}{CRF} = \frac{1,4 \cdot 10^3 \cdot 0,0506}{0,07} = 1.012\text{€}$$

Ecuación 5.5-5

Resumiendo, la inversión permitida en España es:

- Para una caldera eléctrica: $I_{allowedS} = 3.392\text{€}$.
- Para una caldera de Gas Natural: $I_{allowedF} = 1.012\text{€}$.

5.5.3 Conclusiones del análisis económico

Para la misma caldera eléctrica, la inversión permitida en Finlandia (2.554,29€) es menor que en España (3.392€); lo que supone que sea más rentable instalarla en Madrid que en Tampere. Esto es debido al precio elevado de la electricidad en España. Lo que supone una desventaja para el caso finés, ya que la instalación de Tampere necesita dos colectores y la de Madrid sólo uno, incluso siendo más caro por ser de vacío.

Sin embargo, siendo más realista, la inversión permitida para la caldera de Gas Natural (1.012€) en España es mucho menor que para la eléctrica (3.392€). Por tanto, la decisión sobre si instalar un colector de tubos de vacío debe de ser reconsiderada debido a razones económicas, ya que 1.012€ no es una cantidad grande de dinero.

Concluyendo, se deriva a que si en la vivienda española hubiera una caldera eléctrica, sería más interesante instalar el sistema solar térmico que en el caso de si la vivienda tuviera una caldera de Gas Natural. Por otro lado, para el caso finés, sólo habría que considerar la inversión en colectores de tubos de vacío o de placa plana.

6 Conclusiones

Tras todos los resultados obtenidos y las diferentes situaciones analizadas, este proyecto ha dado lugar a varias conclusiones que se enumeran a continuación.

Previsiblemente, la potencia necesaria para calentar el ACS para la misma vivienda, con las mismas condiciones, en Finlandia es mayor que en España. Esto es debido a la situación climática en cada país, debido a la temperatura de la red general de agua y por el valor de referencia de consumo de ACS, que es diferente para cada país.

El programa informático RETScreen es fiable para análisis de instalaciones solares térmicas, y además una datos climáticos reales (proporcionados por la NASA).

La inclinación de los colectores con la cual más energía solar es captada es un valor menor que la latitud, que era considerado el óptimo previamente; esto es debido a la altura solar en los días más soleados (durante el verano). Este valor es mucho menor en Finlandia que en España por la declinación solar, por lo que el sol está más para el mismo día en verano en Finlandia que en España.

Además, la inclinación de colectores en el caso de Finlandia debe de realizarse para consumo preferente en verano; porque si se dimensiona para consumo anual, como en diciembre, enero y febrero la radiación es insignificante, más cantidad de energía solar no está siendo usada óptimamente.

Sin embargo, la inclinación para el caso en España debe de ser dispuesta de tal forma que sea un consumo anual preferencial ($\beta = \varphi$) o incluso consumo preferente en invierno ($\beta = \varphi + 10^\circ$). Porque de este modo se evitan las posibles situaciones de sobrecalentamiento en los meses más soleados, a la par de obtener más provecho de la fuente de energía solar en los meses en los cuales la demanda de ACS y calefacción es mayor, esto es en invierno.

Resulta interesante resaltar que para la misma casa en ambos países, para las mismas necesidades, en Finlandia se necesita el doble de colectores que en España. Claro está, esto es debido a las condiciones climatológicas en cada país.

Asimismo, se ha deducido que es preferible usar colectores de placa plana debido a razones económicas. Pues el rendimiento de colectores de placa plana y de tubos de vacío en Finlandia no es tan diferente, y el precio de los colectores de tubo de vacío es claramente superior. Además, se necesitan al menos dos colectores para cubrir la demanda de ACS en Finlandia, por lo que el coste de la instalación incrementa considerablemente.

Por otro lado, en España, el rendimiento de un solo colector de tubo de vacío es comparable a dos colectores de placa plana, por lo que es recomendable instalar el colector de tubo de vacío para una instalación óptima, en lo que a razón tanto económica como energética se refiere.

En cuanto a razones económicas, para la misma caldera eléctrica usada en ambos países, la inversión permitida en Finlandia (2.554,29€) es menor que en España (3.392€). Esto es debido al alto precio del kWh de electricidad en España.

Sin embargo, en un caso más realista, la inversión permitida para una caldera de Gas Natural en España es mucho menor que una eléctrica. Entonces, debe de ser considerada la decisión sobre instalar un tubo de colector de vacío debido a razones económicas (como se comentaba anteriormente), puesto que 1.012€ no es una cantidad de dinero muy elevada, por tanto no es rentable.

Resumiendo, se deriva en que si en el caso de la vivienda español se usara una caldera eléctrica, sería más interesante instalar este sistema solar térmico con tubo de vacío; en cambio, si en la casa hubiera una caldera de Gas Natural no es tan ventajoso instalar el sistema solar térmico para ACS. Por otro lado, en el caso finlandés, sólo se consideraría la inversión de adquirir colectores de tubo de vacío o de placa plana, pero la instalación solar es recomendable. Sin embargo, para ambos casos, aparte de por razones económicas, se debería considerar proceder a la instalación por la directiva europea vigente, y por tanto las correspondientes normas nacionales, en la que se debe obtener de fuentes renovables un 20% de la energía total producida.

7 Futuros desarrollos

Unas sugerencias sobre los futuros proyectos o análisis que se pueden llevar a cabo tras este proyecto fin de carrera podrían ser:

- Diseñar y dimensionar una instalación solar térmica en un edificio real para ACS en España, o en Finlandia. Este estudio se puede realizar para diferentes tipos de edificios.
- Diseñar y dimensionar una instalación solar térmica para ACS y calefacción en España, o en Finlandia.
- Análisis de una instalación solar térmica para calefacción y ACS en conjunto.
- Comparar una instalación de ACS usando los mismos valores de demanda para ambos países (por ejemplo, en España es 30 l/día·persona, mientras que en Finlandia es de 50 l/día·persona).
- Comparación de diferentes sistemas de ACS para edificios de viviendas, u otro tipo de edificio, en España y en Finlandia.
- Analizar instalaciones solares térmicas con otro programa informático. Como por ejemplo, uno basado en el modelo *f-chart*, más dirigido a la normativa española.