

05-024

DEVIATION OF POWER PRODUCTION IN A LOWER-TEMPERATURE SOLAR THERMAL POWER PLANT DUE TO USUAL SIMPLIFICATIONS ADOPTED IN DESIGN PARAMETERS

Garrido Padró, Jorge
Kalkener Energy Saving Solutions S.L.

Mandatory installation of lower-temperature solar thermal power plants in building projects should motivate an increasing accuracy during the design stage that should be proportional to its deployment. However, it is still common to find designers that, during the design phase, submit calculations to important simplifications that, however, undermine the real performance of the installation and thus undermine the interests of those consumers who paid the service as well. This paper summarizes the results of calculating the energy production of a solar thermal power plant using the same simulation software in two different scenarios, one in which part of its design parameters are simplified and a second scenario, identical to the previous one except for the aforementioned design parameters, which are not simplified. The difference between both outcomes evidences the need to improve design methods, using accurate and impartial simulation software, requiring stringent designers with their calculations, avoiding simplifications that distort the energy performance of the power plants and jeopardize the interests of both, project promoter and users.

Keywords: *Energy efficiency; Solar simulation software; Lower-temperature solar thermal power plant; Thermal energy production; Profitability of solar installations*

DESVIACIÓN EN LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE UNA INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA DEBIDA A SIMPLIFICACIONES ADOPTADAS EN SUS PARÁMETROS DE DISEÑO

La obligada presencia de instalaciones solares térmicas a baja temperatura en los proyectos de edificación debiera motivar un creciente rigor en su diseño, proporcional a su volumen de implantación. Sin embargo, es todavía habitual encontrar proyectistas que durante la fase de diseño someten los cálculos a una serie de simplificaciones que, sin embargo, perjudican el rendimiento real de la instalación y, por ende, los intereses de los consumidores a quienes presta servicio. La presente comunicación técnica resume los resultados de calcular la producción de energía de una instalación solar dada mediante un mismo software de simulación en dos escenarios diferentes, uno en el cual parte de sus parámetros de diseño han sido sometidos a simplificaciones y un segundo escenario, idéntico al anterior salvo en los mismos parámetros antes indicados, no simplificados. De la diferencia de ambos resultados se evidencia la necesidad de mejorar los métodos de diseño, usando software de simulación preciso e imparcial, exigiendo a los proyectistas más rigor en sus cálculos, evitando simplificaciones que falsean el comportamiento energético de la instalación y perjudican los intereses tanto del promotor de la instalación como de sus usuarios finales.

Palabras clave: *Eficiencia energética; Software de simulación solar; Instalaciones solares térmicas; Producción de energía térmica; Rentabilidad de instalaciones solares*

Correspondencia: Jorge Garrido Padró jorge.garrido@kalkener.com

Agradecimientos: Mi agradecimiento a todos los socios de Kalkener Energy Saving

Solutions S.L. que siempre confiaron incondicionalmente en un proyecto difícil y arriesgado.

1. Introducción

La entrada en vigor el 29 de marzo de 2006 del Código Técnico de la Edificación (en adelante CTE) marcó una nueva etapa en el proceso de diseño y ejecución de los edificios de obra nueva, motivada por la mejora de la calidad de la edificación, de la protección de sus usuarios finales y del desarrollo sostenible. En este último ámbito, la exigencia básica HE4 del CTE regula la contribución mínima de energía de origen solar que debe ser generada en los edificios para satisfacer su demanda de agua caliente sanitaria y el Documento Básico HE4 del CTE establece reglas y procedimientos que permiten cumplir el requisito básico de ahorro de energía antes mencionado.

El CTE ha sido por lo tanto uno de los principales impulsores en España (ASIT, 2014) del desarrollo de las tecnologías asociadas a las instalaciones solares térmicas a baja temperatura (en adelante IST), pero las características particulares de estas instalaciones, que han de incluir un sistema de apoyo que proporcione hasta el 100% de la energía demandada en caso de ausencia de radiación, lo cual dificulta el diagnóstico ante un mal funcionamiento, unido al interés de promotores y constructores de ejecutar este tipo de instalaciones de la forma más rápida y barata posible, motivados únicamente por el cumplimiento de la legislación pero sin necesidad de acreditar *a posteriori* certificados que verifiquen su correcto funcionamiento, ha degenerado finalmente en un porcentaje altísimo de instalaciones mal diseñadas y peor ejecutadas (Terra.org, 2011).

2. Objetivo

En la fase de diseño, someter los cálculos de dimensionado de las IST a determinadas simplificaciones perjudican el rendimiento y la rentabilidad real de la instalación una vez ejecutada y, por ende, los intereses de los consumidores a quienes presta servicio. Sin embargo, el desconocimiento técnico, la consideración de los Documentos Básicos del CTE como dogmas, la dejadez profesional o la parquedad de costes eludiendo el pago de software imparcial y preciso, degenera en el uso habitual de un exceso simplificaciones durante el dimensionado de las IST. El objetivo del presente documento es mostrar, utilizando el [software de simulación solar Kalkener](#), la producción de energía de una IST en dos escenarios diferentes: Uno en el cual parte de sus parámetros de diseño han sido sometidos a simplificaciones y un segundo escenario idéntico al anterior en el que dichas simplificaciones han sido sustituidos por cálculos más rigurosos. De la diferencia entre los resultados de ambos escenarios se evidencia la necesidad de mejorar el proceso de diseño debiéndose exigir a los proyectistas de las IST el uso de software de mayor precisión en sus cálculos, evitando simplificaciones que a la postre falsean el comportamiento energético de la instalación y perjudican los intereses tanto del promotor de la instalación como de sus usuarios finales.

3. Metodología

A continuación se describen todos los condicionantes y parámetros que caracterizan el funcionamiento de una IST en dos escenarios diferentes. Con el software disponible a través de <https://kalkener.com> se ejecuta un proceso de simulación determinista, dinámico y discreto en base a eventos horarios a lo largo de un ciclo anual, obteniéndose información detallada sobre el comportamiento energético de la IST en cada uno de los escenarios y

permitiendo así comparar y analizar los efectos asociados a los diferentes parámetros de cada escenario.

3.1. Características comunes

Se simula una IST configurada con acumulación solar centralizada, la cual se conecta a un sistema tradicional de producción de ACS ya existente con caldera y acumulación centralizadas. La única acometida de agua fría es conectada por lo tanto a un depósito denominado 'acumulador solar' donde es almacenada y precalentada por un intercambiador de placas hasta su entrega al sistema previo de ACS. Dicho intercambiador de placas está a su vez conectado al circuito hidráulico –circuito primario– de un campo de captadores solares planos, que es el elemento generador de energía. Conectada la IST al sistema de ACS, la caldera y su acumulador de ACS previos pasan a ser el sistema de apoyo de la IST. Los diferentes escenarios a comparar y analizar tienen además en común las siguientes características:

3.1.1. Condiciones del entorno

3.1.1.1. Localización

Coordenadas geográficas (notación decimal)	
Latitud:	38,34
Longitud:	-0,39
Localidad:	Alicante
Provincia:	Alicante
Altitud (msnm):	30,00

Tabla 1. Situación geográfica

Mes	Radiación horizontal H_h (Wh/m ² día)	Temperatura Agua de red (°C)	Temperatura ambiente día (°C)
Ene	2.490,00	7,85	12,85
Feb	3.400,00	8,85	13,85
Mar	4.950,00	10,85	15,85
Abr	5.800,00	12,92	17,85
May	6.910,00	13,92	20,85
Jun	7.700,00	14,92	24,85
Jul	7.650,00	15,92	27,85
Ago	6.750,00	14,92	27,85
Sep	5.210,00	13,92	25,85
Oct	3.980,00	12,85	20,85
Nov	2.680,00	10,85	16,85
Dic	2.170,00	7,85	13,85

Tabla 2. Radiación solar y Temperaturas del entorno

*Los datos de radiación se han obtenido a través de [Photovoltaic Geographical Information System](#) - Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology, del Instituto de energía y Transporte de la Comisión Europea

3.1.1.2. Demanda de ACS a 60°C

En el cálculo de la demanda energética de la IST se han adoptado el siguiente consumo medio diario anual de ACS a 60°C, acorde al criterio del CTE:

Tipología de instalación:	Gimnasio
Usuarios consumidores:	350
Consumo (l/día y persona):	21,00
Consumo total (l/día):	7.350,00

Tabla 3. Demanda de ACS a 60°C

3.1.1.3. Instalación de agua caliente sanitaria (ACS)

Previamente a la ejecución de la IST la edificación cuenta con una caldera asociada al sistema de producción de ACS la cual pasa a dar el apoyo energético necesario a la IST siempre que la energía disponible de origen solar no sea suficiente para atender la demanda de ACS de los usuarios. Sus características son:

Combustible:	Gas natural
Potencia (kW):	130,00
Rendimiento (%):	94%

Tabla 4. Características caldera ACS

El sistema de distribución de ACS es el mismo que el existente previamente a la conexión de la IST, siendo su rendimiento energético:

Rendimiento (%)	85,00 %
-----------------	---------

Tabla 5. Rendimiento sistema de distribución

3.1.1.4. Características de la cubierta

Desviación*:	0°
Pendiente:	25,00%

Tabla 6. Disposición espacial cubierta inclinada

* Angulo formado entre la dirección Sur y la cumbre de la cubierta inclinada, tomando como valor positivo el sentido de las agujas del reloj desde una vista en planta (es decir, mirando hacia el suelo)

3.1.1.5. Perfil de sombras circundantes

En los alrededores del campo de captadores no se ha evidenciado la existencia de ningún obstáculo que genere sombras a lo largo del año.

3.1.2. Campo de captadores

3.1.2.1. Campo de captadores solares planos

Fabricante	Modelo
LUMELCO	ST-2500

Tabla 7. Modelo de captador solar

Ecuación de rendimiento cuadrática:

$$\mu = \eta_0 - a_1 \left(\frac{t_m - t_a}{G_\beta} \right) - a_2 \left(\frac{(t_m - t_a)^2}{G_\beta} \right)$$

Siendo:

Constantes		Variables	
η_0 (adimensional):	0,7671	t_m (°C):	Temperatura media del fluido en el captador
a_1 (W/m ² °C):	3,7479	t_a (°C):	Temperatura ambiente
a_2 (W/m ² °C ²):	0,0147	G_β (W/m ²):	Irradiancia sobre el plano del captador

Tabla 8. Ecuación cuadrática de rendimiento del captador solar

Altura (m):	2,05	Q (l/m ² h):	125,00	Sup. Útil (m ²):	2,32
Anchura (m):	1,275	$\Delta P_{cap.}$ (mm.c.a):	14,87	Uds en serie:	6

Tabla 9. Dimensiones físicas del captador solar

Tipo de integración en cubierta:	General
----------------------------------	---------

Tabla 10. Integración de captadores en la edificación

3.1.2.2. Circuito primario

$\Delta P_{accesorios.}$ (mm.c.a):	800	Longitud circuito (m):	120,00
$\Delta P_{tubería.}$ (m.c.a):	1,20	Potencia bomba (W):	0,47

Tabla 11. Características del circuito primario

3.1.3. Resto de componentes

3.1.3.1. Intercambiador de placas

Potencia (W/m^2_{cap}):	1.000	$\Delta P_{primario}$ (mm.c.a):	4.000
Eficiencia(%):	70%	$\Delta P_{secundario}$ (mm.c.a):	4.000

Tabla 12. Características del intercambiador

3.1.3.2. Circuito secundario

Longitud de circuito (m)	1.000		
$\Delta P_{primario}$ (mm.c.a):	20	Potencia bomba (W):	0,38

Tabla 13. Características del circuito secundario

3.1.3.3. Acumulador solar

Volumen de acumulación (l):	10.000	T^a máx. admisible ($^{\circ}C$):	90,00
ΔP (mm.c.a):	300		

Tabla 14. Características del acumulador solar

3.1.3.4. Sistema de apoyo

Volumen de acumulación (l):	1.834	T^a máx. admisible ($^{\circ}C$):	90,00
ΔP (mm.c.a):	300		

Tabla 15. Características del sistema de apoyo

3.1.4. Condicionantes económicos

Costes de ejecución y mantenimiento	
Coste instalación por m^2 de captación ($\text{€}/m^2$):	400,00
Mantenimiento anual por m^2 de captación ($\text{€}/m^2$):	3,00
Costes por contratación de seguros	
Valor de reposición declarado por m^2 de captación ($\text{€}/m^2$):	400,00
Coste del seguro (% del valor de reposición):	0,7%

Tabla 16. Costed de ejecución, mantenimiento y seguros

Indicadores económicos generales	
TAE de referencia (%):	3,95%
IPC (% del valor de reposición):	2,60%

Tabla 17. Indicadores de capitalización

3.2. Escenario 1: Escenario simplificado

3.2.1. Orientación e inclinación óptimas de los captadores

El Documento Básico HE4 del CTE establece que puede considerar el sur como orientación óptima y como inclinación óptima la latitud geográfica. Estas indicaciones dan por supuesto que los captadores están situados sobre una superficie horizontal, lo que no siempre es así, como ocurre en el presente caso de estudio, donde la cubierta inclinada que soporta los captadores, cuya cumbrera está alineada hacia el sur, tiene una pendiente negativa de 14,03°. Ante estos casos, en vez de estudiar la trigonometría espacial que orienta los captadores hacia la posición que optimiza la mayor radiación anual absorbida, es habitual orientar los captadores en base al ‘sentido común’, sin usar métodos analíticos complejos.

En este escenario es habitual entre los proyectistas el emplear el siguiente razonamiento: Puesto que la cumbrera de la cubierta inclinada está alineada hacia el sur, para orientar los captadores en esa dirección situarán sus bases perpendiculares a la cumbrera, procediendo a dar la inclinación recomendada por el Documento Básico HE4 del CTE, corregida ésta en función de la pendiente de inclinación de la cubierta inclinada. Siendo α el ángulo formado entre la cumbrera o alero y la base del captador (α es positivo en sentido horario), y β el ángulo de inclinación entre la cubierta y el captador, se procede a situar los captadores con los siguientes valores, entendiendo que así se habrá logrado su posición óptima, sin pérdidas por orientación ni inclinación por lo tanto.

α :	90°	Base del captador perpendicular a la cumbrera, por estar ésta alineada hacia el sur
β :	62°	= 38° (Criterio del CTE: Latitud) + 10° (Criterio del CTE: demanda preferente en invierno) + 14° (corrección de pendiente cubierta)

Tabla 18. Parámetros de posición del captador sobre la cubierta del edificio

3.2.2. Curvas de demanda de ACS a 60°C

Establecido el consumo diario de ACS que como media se consumirá a lo largo de un año medio, el Documento Básico HE4 del CTE establece la necesidad de definir demandas mensuales que caractericen la demanda de energía a lo largo de un año. No se menciona sin embargo la necesidad de caracterizar la demanda acorde a curvas de consumo semanales y diarias, lo cual acarrea suponer que los hábitos de consumo de todos los días de un mismo mes son idénticos y homogéneos. Por lo tanto, en este escenario simplificado, se consideran las siguientes curvas de demanda:

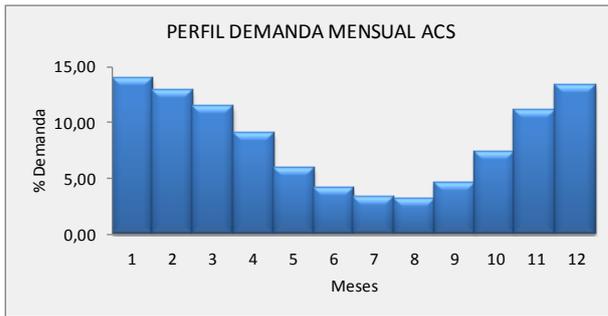


Figura1 Perfil mensual (%)



Figura2. Perfil semanal (%)

3.2.3. Coste de la energía eléctrica demandada por la IST

El escenario simplificado sólo tiene en cuenta el coste de la energía del sistema de apoyo, no teniendo en cuenta el coste del consumo eléctrico demandado por la instalación solar, imprescindible para su correcto funcionamiento.

Tabla 19. Indicadores del precio de la energía

Energía	Precio (c€/kWh)	IPE* (%)
Gas natural	5,00	5,00%

*Estimación del aumento anual del precio de la energía

3.3. Escenario 2: Escenario corregido

3.3.1. Orientación e inclinación óptimas de los captadores

La orientación e inclinación óptimas se calculan en base a la metodología de cálculo de irradiación solar incidente sobre superficies inclinadas acorde a un modelo isótropo (Cañada, 2008), mediante el software de simulación desarrollado por Kalkener Energy Saving Solutions disponible a través de kalkener.com. Partiendo de datos empíricos de radiación anual sobre una superficie horizontal en una latitud concreta, definido el periodo de funcionamiento en el que la IST estará funcionando y las características geométricas (orientación y pendiente) de la superficie base sobre la que se apoyarán los captadores, este [software de simulación solar](#), calcula el diagrama solar y las horas de luz disponibles acorde a la latitud elegida y simula la radiación captada para diferentes posiciones relativas (orientaciones e inclinaciones) del captador sobre dicha superficie base, obteniendo como resultado los parámetros α y β (orientación e inclinación relativas de los captadores respecto de la superficie base) gracias a los cuales se obtiene la mayor radiación durante el periodo seleccionado. Realizada la simulación, los parámetros α y β óptimos obtenidos son:

Tabla 20. Parámetros de posición del captador sobre la cubierta del edificio

α :	115°
β :	30°

α : Ángulo formado entre la cumbrera y la base del captador (α es positivo en sentido horario)

β : Ángulo de inclinación entre la cubierta y el captador

3.3.2. Curvas de demanda de ACS a 60°C

La actividad a la cual sirve la IST es un gimnasio, cuya ocupación y por lo tanto demanda energética, no sólo está sometida a variaciones estacionales mensuales, sino que también está influida por los hábitos semanales y diarios tanto de sus usuarios como de las condiciones laborales del propio gimnasio. Es necesario por lo tanto que el diseño de la instalación tenga en cuenta las curvas de demanda semanales y horarias diarias, además de las mensuales. En el presente caso de estudio las curvas de distribución de demanda que han de ser tenidas en cuenta son las siguientes:



Figura 3. Perfil mensual (%)



Figura 4. Perfil semanal (%)

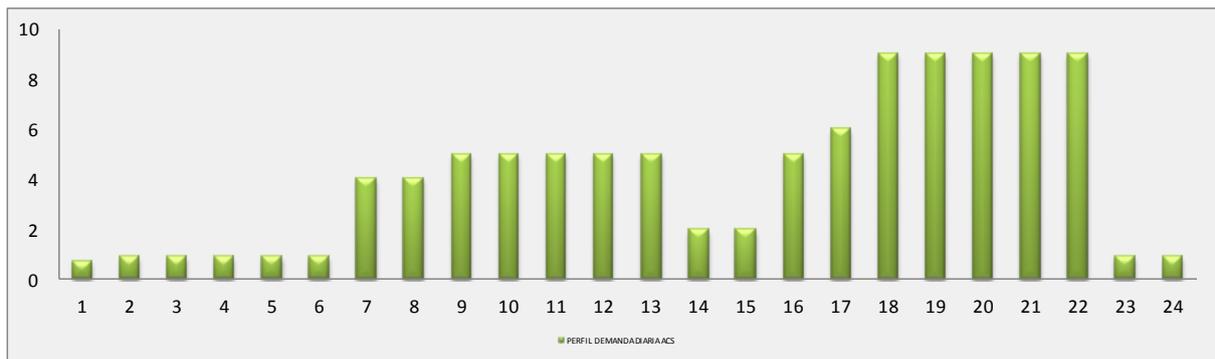


Figura 5. Perfil semanal (%)

3.3.3. Coste de la energía eléctrica demandada por la IST

Este parámetro, si bien no afecta a la producción energética de la IST sí influye en el cálculo de los indicadores de su rentabilidad.

Los precios de energía vigente, aplicables previa y posteriormente a la instalación de la IST, son:

Tabla 20. Indicadores del precio de la energía

Energía	Precio (c€/kWh)			IPE* (%)
	P1	P2	P3	
Gas natural	5,00			5,00%
Electricidad	13,04	8,05	6,32	5,00%

Estimación del aumento anual del precio de la energía

3.4. RESULTADOS

3.4.1. Resultados escenario 1: Escenario simplificado

Fracción solar simulada (%):	60,12%
Superficie de captación (m ²):	190,24
Captadores necesarios:	82

Tabla 21. Resultados principales IST Escenario 1

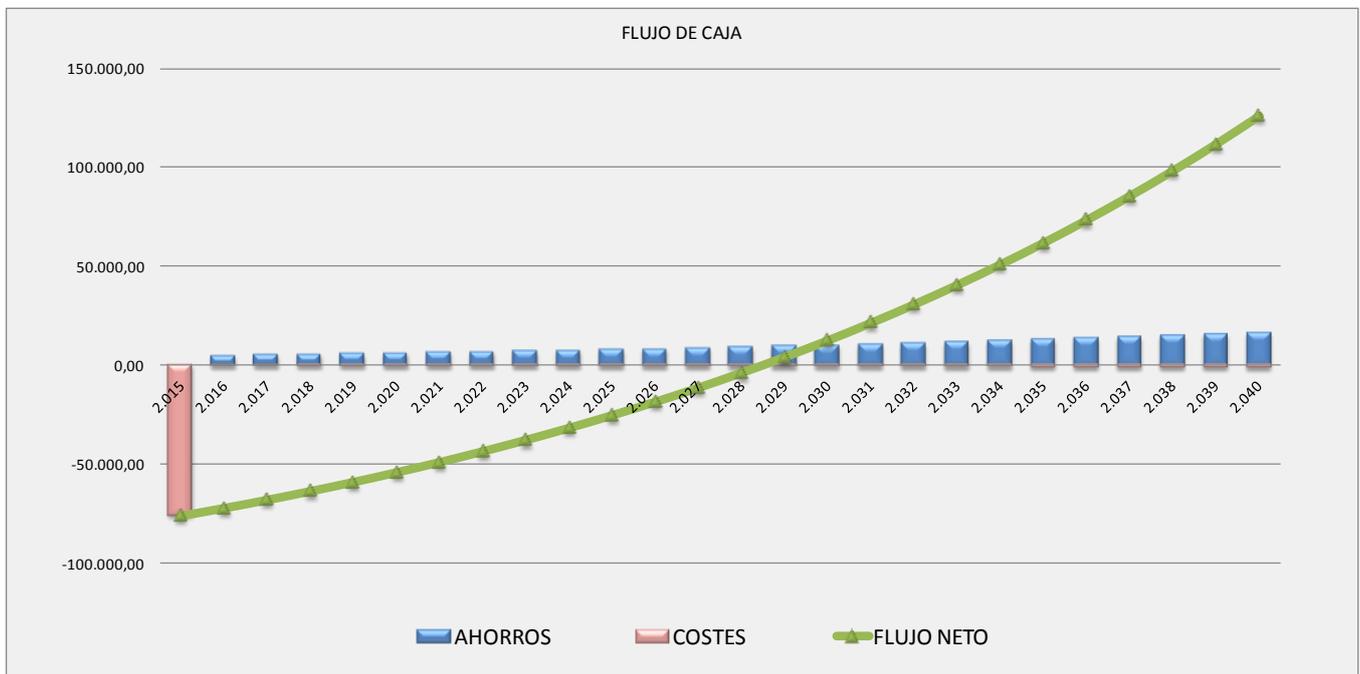


Figura 6. Flujo de caja Escenario 1.

TIR (%):	7,26%
VAN (€):	38.153,42
Retorno flujo de caja (años):	14

Tabla 22. Resultados indicadores de rentabilidad Escenario 1

3.4.2. Resultados escenario 2: Escenario corregido

Fracción solar simulada (%):	60,00%
Superficie de captación (m ²):	132,24
Captadores necesarios:	57

Tabla 23. Resultados principales IST Escenario 2

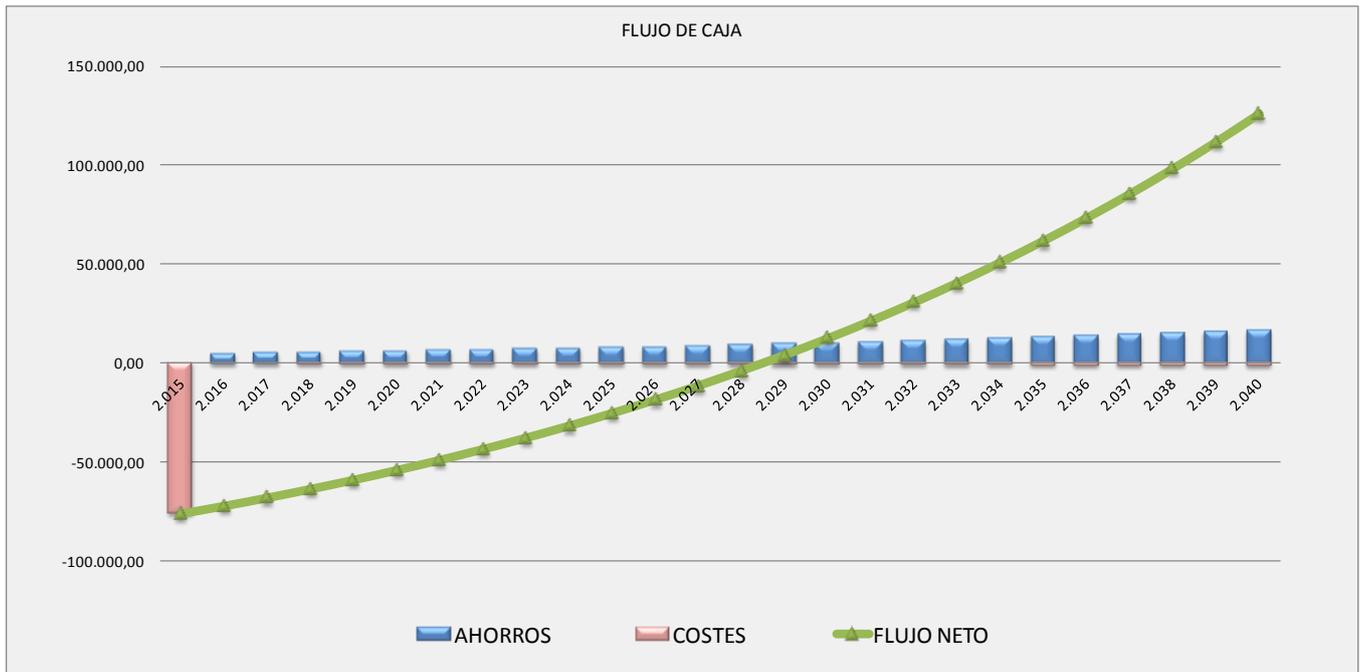


Figura 7. Flujo de caja Escenario 2.

TIR (%):	10,10%
VAN (€):	53.881,00
Retorno flujo de caja (años):	11

Tabla 24. Resultados indicadores de rentabilidad Escenario 2

4. Conclusiones

De la comparación de los componentes de dos IST, dimensionados en base a unas mismas condiciones de contorno y utilizando un mismo software de simulación, pero calculando una de ellas con los criterios simplificados ya expuestos (escenario1) y la otra con los criterios sin simplificar (escenario2), se observa una diferencia porcentual, respecto del escenario 2, del 44% en la superficie de captación necesaria para obtener la misma fracción solar (indicador que mide el porcentaje de energía total generada por la instalación solar respecto de la energía total necesaria para satisfacer la demanda de agua caliente sanitaria) y una diferencia del 29% en el indicador de rentabilidad correspondiente al Valor Actual Neto. Se concluye por lo tanto que el promotor de la instalación calculada en base a criterios

simplificados recibe una instalación sobredimensionada y soportando una inversión económica mayor innecesariamente, puesto que para obtener la misma aportación de energía solar es suficiente una instalación con menor superficie de captación. Queda en evidencia por lo tanto la necesidad de emplear métodos de cálculo rigurosos durante la fase de diseño utilizando software de simulación, preciso e imparcial, que evite simplificaciones y que calcule correctamente el comportamiento energético de la instalación, protegiendo así los intereses tanto del promotor de la instalación como de sus usuarios finales.

5. Referencias

- Encuesta de mercado ASIT 2013 (Abril 2014) *ASIT Informa*. ASIT Asociación Solar de la Industria Térmica p. 3
- Terra.org (2011) *Instalaciones solares bajo sospecha* Obtenido desde: <http://www.terra.org/categorias/articulos/instalaciones-solares-bajo-sospecha>
- Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology (2015) *Photovoltaic Geographical Information System*. Instituto de energía y Transporte de la Comisión Europea. Obtenido de: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- España. Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. Documento Básico HE4 del CTE. *Boletín Oficial del Estado*, 12 de septiembre de 2013, núm. 219, pp. 67137-67209
- IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2009) *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura (PET-REV - enero 2009)* Madrid: Ministerio de Industria, Energía y turismo
- Cañada, J. (2008) *Manual de energía solar térmica. Diseño y cálculo de instalaciones*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia