

PRÁCTICA DOCENTE CON COLECTORES SOLARES FRESNEL PARA LA GENERACIÓN DIRECTA DE VAPOR

Antonio Cazorla-Marín^{1,2*}, Jorge Payá-Herrero^{1,2}, Alejandro López-Navarro¹, Marco Antonio David-Hernández¹

1: Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería Energética (IUIIE), Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.
e-mail: antonio.cazorla@iie.upv.es

2: Departamento de Termodinámica Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.

Resumen: *En titulaciones de ingeniería los alumnos adquieren conocimientos de energía solar térmica, incluida de concentración, pero en pocas ocasiones tienen la oportunidad de ver y analizar en detalle una instalación de este tipo, en condiciones de operación reales. En este trabajo se presenta una práctica de laboratorio basada en una instalación solar térmica de concentración con colectores lineales Fresnel para generación directa de vapor. Durante la práctica, visitarán la instalación, conociendo los componentes y su funcionamiento (orientación de los espejos en tiempo real y producción de vapor). Tras esto, analizarán datos de su operación en un aula informática. A su vez, los alumnos calcularán el rendimiento de los colectores con datos de otra instalación similar funcionando en Generación Indirecta de Vapor y entenderán la diferencia entre la generación de vapor de forma directa e indirecta. Con esta práctica se pretende que los alumnos comprendan el funcionamiento de un tipo de instalación prometedora para producir calor para procesos en lugares donde sin acceso a otros combustibles o para descarbonizar el sector industrial, cumpliendo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 1 (Fin de la pobreza), 4 (Educación de calidad), 7 (Energía asequible y no contaminante) y 9 (Industria, innovación e infraestructura).*

Palabras clave: Práctica de laboratorio, análisis instalación experimental, Objetivos de Desarrollo Sostenible, energía solar térmica de concentración.

1. INTRODUCCIÓN

El sector industrial en España es uno de los sectores con mayores emisiones de gases de efecto invernadero, representando alrededor del 21% de las emisiones totales en 2020 [1] y representando alrededor del 24% de la energía final total consumida [2]. De esta demanda energética total, sobre un 57% es en forma de calor alimentada con combustibles fósiles, siendo las calderas de gas natural el sistema predominante. En este contexto, los colectores solares de concentración son una alternativa renovable que se está extendiendo en los últimos años para producir calor para procesos industriales (sistemas SHIP, Solar Heat for Industrial Process), especialmente útil cuando se requiere calor a media temperatura ($T > 120^{\circ}\text{C}$). En España existen actualmente alrededor de 47 proyectos conocidos, siendo la tecnología lineal Fresnel la más utilizada (55% del total) [3]. Las tecnologías solares de concentración se llevan estudiando en los grados y másteres universitarios en ingeniería energética durante los últimos años, especialmente debido al auge de las centrales termosolares para producción de electricidad, siendo difícil encontrar instalaciones accesibles para que los alumnos entren en contacto con este tipo de tecnología. Gracias a la colaboración del Instituto de Ingeniería Energética (IIE) de la Universitat Politècnica de València (UPV) con la empresa SOLATOM CSP [4], desarrolladora de este tipo de sistemas SHIP con colectores Fresnel, fue posible la construcción de un sistema de este tipo a escala de laboratorio en las instalaciones del IIE, proporcionando una gran oportunidad tanto para la investigación en esta tecnología como para el uso como práctica de laboratorio en asignaturas de energía solar. Dicha colaboración se lleva a cabo desde 2019 y continúa vigente con varios proyectos de investigación. Esta instalación consta de un colector solar de concentración lineal Fresnel con 51m^2 de área reflectiva y 37 kW de potencia térmica pico y es capaz de generar vapor de forma directa en el tubo absorbedor.

En este trabajo, se presenta una práctica de laboratorio donde los alumnos visitan la instalación experimental, viendo la operación en tiempo real y los diferentes componentes que componen la instalación en detalle y su funcionamiento. También se realizarán una serie de medidas in-situ, como mediciones de reflectividad de los espejos para determinar su grado de ensuciamiento o la lectura del caudal de vapor generado. Tras la visita, se trasladará a los alumnos a un aula informática, donde analizarán datos de operación de esta instalación y de otra instalación similar funcionando en Generación Indirecta de Vapor, evaluando el rendimiento de los colectores y la cantidad de energía producida. La presente práctica se plantea para impartirla anualmente en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la UPV, específicamente en el Máster de Tecnología Energética para el Desarrollo Sostenible (MUTEDS) y el Máster Universitario en Ingeniería Industrial (MUII).

2. CONTEXTO TEÓRICO

2.1. Modos de generación de vapor

En este tipo de sistemas, es posible generar vapor de forma directa en los tubos de los colectores solares o de forma indirecta, calentando primero un fluido en los colectores y transmitiendo el calor a un depósito donde se genera vapor. En ambos casos, el vapor se separa en un depósito y se extrae desde la parte superior con una válvula de extracción. La cantidad de agua extraída del circuito se repone en el circuito primario o directamente en el separador de vapor con un circuito de llenado. El esquema de funcionamiento se muestra en la Figura 1.

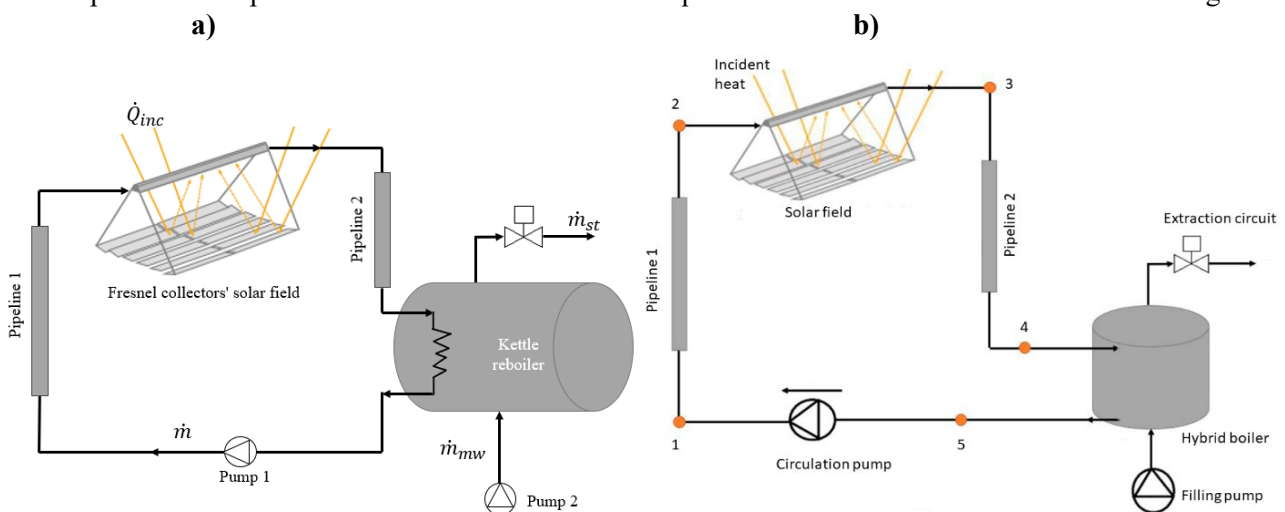


Figura 1. Sistema SHIP funcionando en GIV (a) y GDV (b)

Generación Indirecta de Vapor (GIV): Se calienta agua presurizada o aceite térmico en el campo de colectores y se transmite el calor mediante un intercambiador de carcasa y tubos (kettle reboiler) a un tanque con agua para producir vapor.

Generación Directa de Vapor (GDV): Se genera directamente vapor en el campo de colectores, obteniendo un flujo bifásico con un título de vapor bajo (normalmente inferior al 30%). En este caso es necesario un separador de vapor en lugar del kettle reboiler, evitándose el uso del intercambiador. El principal problema es trabajar en flujo bifásico, ya que conlleva una serie de inestabilidades, como la de Ledinegg, un efecto que puede llevar a disminuir la caída de presión en el tubo absorbedor al aumentar el caudal másico [5], contrariamente a lo esperado en flujo monofásico. Además, no es posible medir de forma directa el calor absorbido en los colectores debido a la complejidad para conocer el título de vapor del flujo a la salida de los colectores.

2.2. Ecuaciones análisis

Con datos reales de operación, se espera que los alumnos sean capaces de calcular el rendimiento de los colectores solares. Para ello primero es necesario entender el concepto de rendimiento de los captadores y cómo calcularlo en los diferentes modos de generación de vapor. El rendimiento en un colector solar de concentración se puede calcular en función de la potencia térmica absorbida (\dot{Q}_{abs}) y la potencia incidente (\dot{Q}_{inc}), según la ecuación (1), donde \dot{m} representa el flujo másico de fluido a través del tubo absorbedor, h_{out} y h_{in} las entalpías específicas de salida y entrada, respectivamente, DNI la irradiancia normal directa y $A_{apertura}$, el área de apertura de los colectores solares.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{abs}}{\dot{Q}_{inc}} = \frac{\dot{m} \cdot (h_{out} - h_{in})}{DNI \cdot A_{apertura}} \quad (1)$$

Todas las variables se pueden medir de forma directa en la instalación excepto las entalpías específicas en el caso en el que el fluido esté en flujo bifásico, ya que es necesario conocer el título de vapor, variable que no se puede medir directamente. Por esta razón, no es posible calcular el rendimiento instantáneo de este tipo de colectores cuando trabajan en GDV. En el caso de GIV, al tener un flujo en estado monofásico, el salto de entalpías se puede calcular asumiendo un calor específico constante (C_p) y midiendo las temperaturas de salida (T_{out}) y entrada (T_{in}), de acuerdo con la ecuación (2).

$$\eta_{GIV} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{DNI \cdot A_{apertura}} \quad (2)$$

3. METODOLOGÍA

La práctica se plantea para una sesión de 2 horas y un número de alumnos entre 15 y 20, en las que los estudiantes visitarán la instalación y analizarán datos de operación de este tipo de plantas en un aula informática. Al final de la sesión, se les evaluará mediante un examen tipo test.

3.1. Objetivos de la práctica

Los objetivos a conseguir por parte del alumnado en esta práctica de laboratorio son los siguientes:

- Entender el funcionamiento de una instalación solar para generar vapor para procesos industriales en los modos de Generación Directa de Vapor y Generación Indirecta de Vapor.
- Analizar las principales ventajas e inconveniente de cada uno de los modos de generación de vapor.
- Ver un sistema real de este tipo funcionando y realizar medidas in-situ.
- Analizar la operación de este tipo de sistemas con datos reales.
- Evaluar el rendimiento de los colectores solares y la energía generada por el sistema.

3.2. Planificación de la práctica

1. Visita a la instalación experimental Microgenvasol y realización de medidas in-situ: 45 minutos.
2. Traslado a aula informática: 15 minutos.
3. Exposición del profesor de los diferentes tipos de sistemas, su funcionamiento, introducción a los datos

- a analizar y pasos a realizar en el aula informática: 30 minutos.
4. Análisis de datos por parte de los alumnos: 15 minutos.
 5. Test final teórico de autoevaluación con 10 preguntas multirespuesta con los conceptos vistos en la práctica: 15 minutos.

3.2. Instalación experimental a visitar (Microgenvasol)

La instalación a visitar es un sistema con un colector solar tipo lineal Fresnel de 51 m² de área de apertura y una potencia pico de 37 kW, desarrollado por la empresa SOLATOM CSP. El sistema se ha diseñado para trabajar en GDV, con un pequeño separador de vapor a la salida del tubo absorbedor. En la visita a la instalación, se les explica los diferentes componentes y la operación de la planta, además se visualizará el vapor extraído y las medidas de caudal de vapor. La instalación cuenta con una serie de sensores de temperatura tipo RTD PT100, sensores de presión absoluta y caída de presión en el tubo absorbedor, sensor de nivel en el separador de vapor con medida continua del nivel, caudalímetro de vapor tipo vortex con compensación de presión y temperatura en el vapor extraído y caudalímetro en los circuitos primario y de llenado tipo Coriolis. Por otra parte, se realizarán medidas de reflectividad de varios espejos in-situ, para analizar el efecto del ensuciamiento en los colectores.



Figura 2. Instalación experimental a visitar: a) colector Fresnel, b) medidor de reflectividad portátil, c) separador de vapor y línea de extracción de vapor

3.3. Instalación experimental a analizar (SOLPINVAP)

Tras visitar la instalación Microgenvasol con GDV, en el aula informática se les proporcionará información de una planta similar trabajando con el mismo tipo de colectores, pero con un área reflectiva de 158.4 m² y 95 kW de potencia pico. La instalación para analizar se encuentra en Almazora, Castellón y trabaja en GIV, incorporando un intercambiador de carcasa y tubos (kettle reboiler) con un diámetro de 0.6 m y 2 m de longitud donde se genera el vapor gracias al calor transferido desde el campo de colectores solares, por donde circula agua a presión. Con estos datos, los alumnos podrán analizar la operación en el campo solar, calculando el rendimiento de los colectores en diferentes horas del día, así como analizar la extracción de vapor. Esta instalación cuenta con sensores de alta precisión: termorresistencias tipo PT100 para medidas de temperatura, caudalímetros tipo vortex en circuito primario y secundario, sensor de nivel en el kettle reboiler para medir nivel de líquido y caudalímetro de vapor para medir el vapor extraído. Más detalles sobre estas medidas se puede encontrar en el trabajo realizado por David-Hernández et al. [6].

3. RESULTADOS

En primer lugar, se analizará la operación del sistema en GIV, analizando el campo solar por un lado y el sistema de producción de vapor por otro. En la Figura 3 se muestran las variables principales de operación: temperatura de entrada (T1) y salida (T2) de los colectores, DNI estimada para esa localidad, presión en el tanque donde se genera vapor (P tanque), caudal de vapor extraído y nivel de líquido dentro del tanque. En la Figura 3 a), se ve como el fluido se calienta en los colectores solares desde el arranque de la instalación y luego se mantiene con unas temperaturas estables, que van disminuyendo conforme baja la irradiancia. En la Figura 3 b), se observan los ciclos de extracción, donde al extraer vapor baja el nivel del tanque y se rellena con agua fría al alcanzar un valor mínimo, lo que produce una ligera caída de presión en el depósito y una disminución del caudal de vapor extraído.

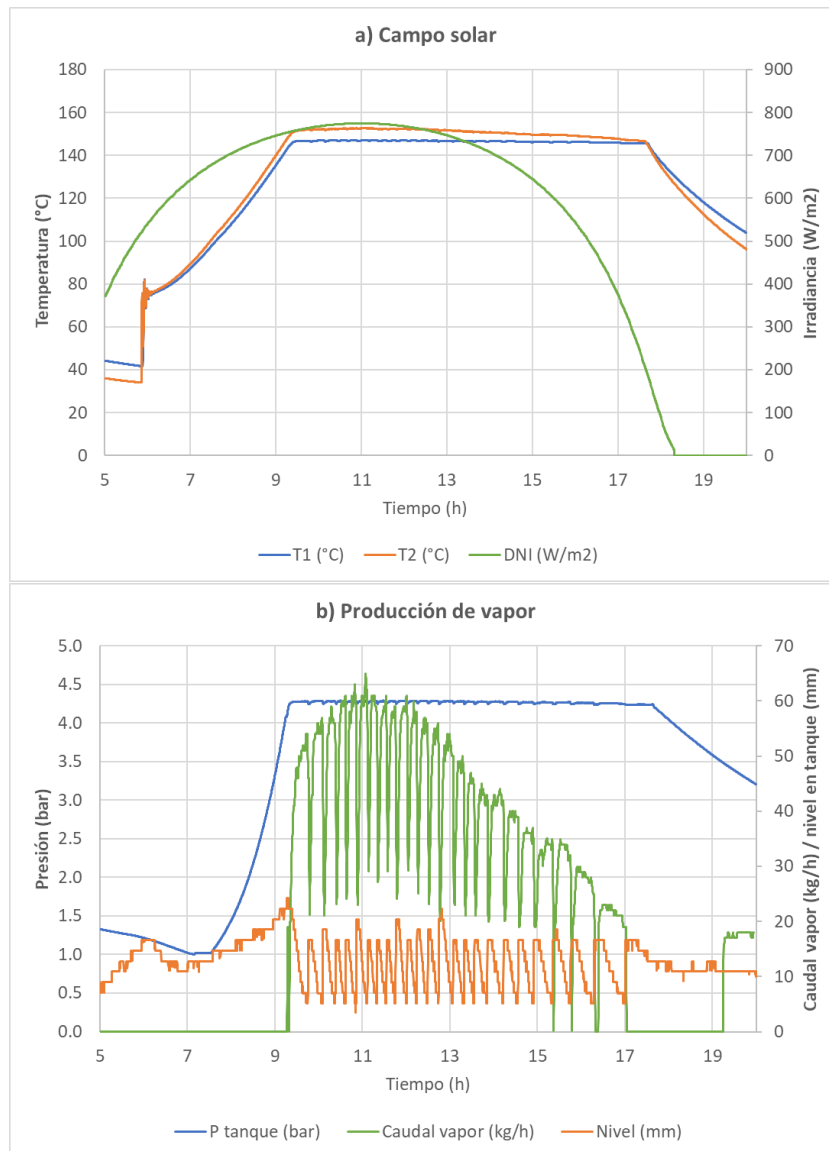


Figura 3. Operación del sistema en GIV: a) variables del campo solar, b) variables del sistema de producción de vapor

A partir de estos datos, conociendo también el caudal de agua, es posible calcular el rendimiento de los colectores en diferentes momentos del día. En la Figura 4 se puede observar este rendimiento y las variables principales necesarias para calcularlo. Se puede observar como el rendimiento de los colectores es mayor hacia el medio día solar, principalmente debido a que el sol tiene una altura mayor y el ángulo de incidencia es menor, por tanto, se producen menos pérdidas.

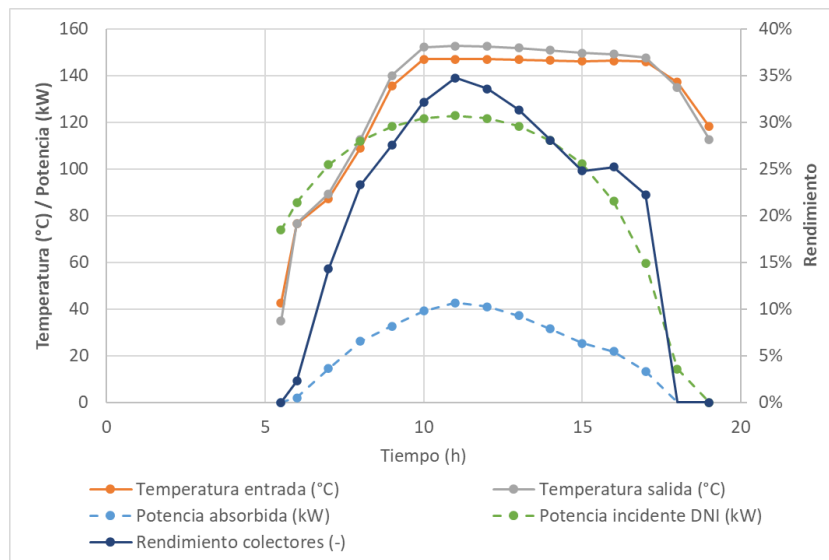


Figura 4. Cálculo del rendimiento de los colectores y las potencias implicadas

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una práctica de laboratorio de 2 horas en la que los alumnos pueden visitar una instalación solar térmica de concentración con colectores lineales Fresnel para Generación Directa de Vapor. En la visita, los alumnos verán la instalación en funcionamiento generando vapor de agua, se les explicará los diferentes componentes necesarios en este tipo de instalaciones y se realizarán una serie de medidas in-situ: reflectividad de los espejos y caudal de vapor que se está generando. Además, analizarán datos experimentales de otra instalación trabajando en Generación Indirecta de Vapor, de forma que aprendan las principales diferencias entre los dos modos de generación de vapor y sean capaces de calcular el rendimiento de los colectores en diferentes momentos del día, observando el efecto del ángulo de incidencia a lo largo del día. Al final de la práctica, se les realizará un test para evaluar los conceptos adquiridos en la sesión.

Con esta práctica se pretende que los alumnos comprendan el funcionamiento de un tipo de instalación prometedora para producir calor para procesos en lugares donde sin acceso a otros combustibles o para descarbonizar el sector industrial, cumpliendo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 1 (Fin de la pobreza), 4 (Educación de calidad), 7 (Energía asequible y no contaminante) y 9 (Industria, innovación e infraestructura).

AGRADECIMIENTOS

Esta instalación es fruto de una colaboración con la empresa SOLATOM en el proyecto “micro GENERación de VAPor SOLar (MicroGENVASOL)”, financiado por el IVACE (IMIDTA/2021/68). Además, la instalación ha sido mejorada con sensores de alta precisión en el marco del proyecto “SolarSteam4IND” (TED2021-130614A-I00), subvencionado por la Agencia Estatal de Investigación MICIN/AEI/10.13039/501100011033 y por los fondos Next Generation de la Unión Europea EU/PRTR 2021.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, Inventario nacional de emisiones a la atmósfera emisiones de gases de efecto invernadero serie 1990-2020 informe resumen.
- [2] IEA, Energy Statistics Data Browser – Data Tools - IEA. Online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=SPAIN&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFCShareBySector>
- [3] RESSSPI, Repository of Solar Simulation Sources for Industrial Processes. Online: <https://www.ressspi.com/biz/listaProyectos>
- [4] SOLATOM CSP. Online: <https://solatom.com/>
- [5] Pye, J. D., System Modelling of the Compact Linear Fresnel Reflector, PhD, University of New South Wales, 2008.
- [6] David-Hernández et al., Enhanced monitoring and dynamic analysis of a concentrated solar thermal experimental plant for steam production, Applied Thermal Engineering (249) 123418, 2024.