

ENSAYOS PRELIMINARES DE UNA MICROTURBINA DE CICLO ORGÁNICO DE RANKINE ALIMENTADA POR UN CAMPO SOLAR DE CONCENTRACIÓN TIPO FRESNEL LINEAL

José Miguel Maldonado¹, Alvaro de Gracia^{1,2}, Khamid Mahkamov³, Carolina Costa³, Murat Kenisarin³, Piero Pili⁴, Roberto Manca⁴, Arthur Leroux⁵, Andre Charles Mintsas⁵, Carlo Maria Bartolini⁶, Matteo Pirro⁶, Kevin Lynn⁷, David Mullen⁷, Elvedin Halimic⁷, Luisa F. Cabeza⁷

¹ GREiA Research Group, INSPIRES Research Centre, Universitat de Lleida, Pere de Cabrera s/n, 25001, Lleida, Spain, lcabeza@diei.udl.cat

² CIRIAF - Interuniversity Research Centre, University of Perugia, Via G. Duranti 67, 06125 Perugia, Italy, alvaro.degracia@udl.cat

³ Department Mechanical Engineering and Construction, Northumbria University, Newcastle upon Tyne NE1 8ST, UK, khamid.mahkamov@northumbria.ac.uk

⁴ Elianto S.R.L., Parco Scientifico e Tecnologico della Sardegna Località Piscina Manna - Edificio 1 09010 Pula, Sardinia, Italy, piero.pili@eliantocsp.com

⁵ Enogia S.A.S, 19 Avenue Paul héroult 13015 Marseille, France, arthur.leroux@enogia.com

⁶ Società per il TRASferimento TECnologico e Guida all'Innovation Engineering, S.TRA.TE.G.I.E. srl, via Sandro Totti 1, 60131 Ancona, Italy, c.m.bartolini@strategiesrl.com

⁷ AAVID Thermacore Europe, 12 Wansbeck Business Park Ashington, Northumberland NE63 8QW, UK, k.v.lynn@thermacore.co.uk

RESUMEN

La energía solar térmica ha sido impulsada en países europeos con el objetivo de implantar sistemas activos de ahorro de energía. En el programa europeo Horizon 2020 se encuentra el proyecto Innova MicroSolar, cuyo objetivo es desarrollar e implementar un innovador sistema de cogeneración. Un campo de concentración solar tipo Fresnel lineal y una microturbina de ciclo orgánico de Rankine, suministrarán 2-kW eléctricos y 18-kW térmicos a edificios residenciales y pequeñas empresas. Este documento recoge los ensayos preliminares del campo solar junto con la turbina. El campo solar calienta el fluido caloportador hasta 90°C, a continuación, entra en el evaporador del ciclo Rankine, donde se evapora el fluido orgánico (NOVEC 649) y expande la turbina; seguidamente entra en el condensador, donde liberará energía térmica para uso de calefacción y agua caliente sanitaria.

PALABRAS CLAVE: Cogeneración, Energía termosolar de concentración (CSP), Ciclo orgánico de Rankine (ORC)

ABSTRACT

Aiming to introduce active energy saving systems, solar thermal energy has been promoted in European countries. Innova MicroSolar project is in the framework of the programme Horizon 2020. The main objective of the project is to develop and install an innovative cogeneration system. A concentration linear Fresnel solar field and an organic Rankine cycle

turbine will supply 2-kW electrical and 18-kW thermal to residential buildings and small industries. This document shows the preliminary tests of the solar field in couple with the turbine. The heat transfer fluid is heated up to almost 90°C by the solar field. Then it flows through the Rankine's cycle evaporator, where the organic fluid (NOVEC 649) is evaporated. Novec 649 at gaseous state expands the turbine, and afterwards enters the condenser providing thermal energy for space heating and domestic hot water purposes of the building.

KEYWORDS: Cogeneration, Concentrated Solar Power (CSP), Organic Rankine Cycle (ORC)

INTRODUCCIÓN

El sector de la edificación representa el mayor consumidor energético del mundo, aproximadamente un tercio del consumo de energía global final; además se espera un crecimiento de esta cifra con el aumento de los estándares de vida (International Energy Agency, Üрге-Vorsatz D et al.). Esta tendencia está definida por parámetros clave, entre los que se incluye el crecimiento poblacional (41%), el mayor número de viviendas que deberán ser atendidas (115%) y el aumento de superficie habitable/útil per cápita en 2050 (Üрге-Vorsatz D et al.). La reducción de este consumo de energía, así como las emisiones de CO₂ asociadas, es una de las principales preocupaciones medioambientales a nivel global a largo plazo (International Energy Agency). En los países desarrollados, el sector residencial llega a significar el 41% del consumo energético final y el 40% del total de las emisiones de gases efecto invernadero (Directive 2010/31/EU). Para aumentar la eficiencia energética de los edificios, se han adoptado estrategias energéticas a corto, medio y largo plazo en países europeos para fomentar la implantación de sistemas activos de ahorro de energía (Horizon 2020). Por ejemplo, la promoción de la energía solar térmica. El trabajo presentado se encuentra enmarcado en el proyecto Innova MicroSolar, el cual está subvencionado por el programa europeo de investigación e innovación Horizon 2020. El objetivo de este proyecto es desarrollar un innovador sistema de producción de energía térmica y eléctrica basado en energía solar térmica de concentración. Este sistema suministrará 2-kW eléctricos y 18-kW térmicos a edificios residenciales y pequeñas empresas. La tecnología propuesta se compone de un campo de concentración solar tipo Fresnel lineal, una microturbina de ciclo orgánico de Rankine de alto rendimiento y una unidad de almacenamiento térmico con material de cambio de fase. El campo solar Fresnel es considerablemente más sencillo y barato de producir que su homólogo parabólico; incluye un mecanismo de seguimiento solar y puede calentar el fluido caloportador hasta 295°C. La microturbina está equipada con un alternador de corriente alterno magnético de alta velocidad. Por último, el bloque de almacenamiento instala “heat pipes” reversibles capaces de transferir el calor en ambas direcciones, mejorando la conductividad dentro del tanque. El sistema en su conjunto suministrará el 60% de la energía requerida por el edificio y reducirá hasta un 20% los costes energéticos y reducirá las emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación con las mejores tecnologías renovables del mercado actual. El objeto de estudio de esta experimentación se centra en los test preliminares del sistema campo solar y turbina. El fluido caloportador (Therminol 62) se calienta hasta casi 90°C con ayuda del campo de concentración solar, posteriormente este aceite entra al intercambiador de calor con el flujo orgánico (NOVEC 649), evaporándolo. El Novec 649 en su estado gaseoso expande en la turbina. Tras el éxito de las pruebas previas se procederá a operar el sistema completo, incorporando el tanque de almacenamiento y alcanzando temperaturas de 295°C.

MATERIALES Y MÉTODO

Descripción de la Planta

Los ensayos que se llevaron a cabo durante esta experimentación, fueron realizados en la planta piloto de concentración solar de la Universidad de Lleida, situada en Almatret (Lleida, España). La planta prototipo se compone de cuatro grandes bloques (Fig. 1):

- Campo de concentración solar tipo Fresnel lineal (Fig. 2.a). La superficie total del campo es de 140 m² y puede alcanzar una potencia térmica entre de hasta 80 kW. El campo solar incorpora un mecanismo de seguimiento solar.

- Micro turbina de ciclo orgánico Rankine (ORC en sus siglas en inglés) (Fig. 2.b). La ORC consume 22 kW térmicos de potencia nominal y suministrará 2.3 kW eléctricos nominales.
- Tanque de almacenamiento térmico (TES en sus siglas en inglés). Incluye “heat pipes” reversibles para transferir el calor al tanque y desde él. Capacidad de almacenamiento de 100 kWh con una potencia térmica de 25 kW y diseñado para alimentar al sistema durante un máximo cuatro horas.
- Elementos auxiliares (Balance of Plant en inglés, cuyas siglas son BoP).

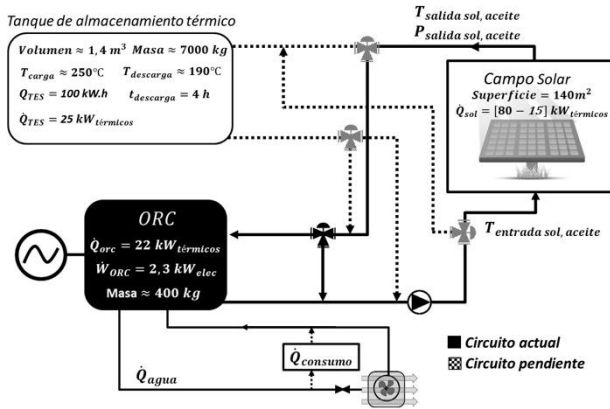


Fig. 1. Esquema de la Planta Piloto.



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Campo de Concentración Solar Lineal tipo Fresnel, (b) Micro Turbina de Ciclo Orgánico Rankine

Cabe destacar que el tanque de almacenamiento queda fuera del alcance de este estudio y será conectado al resto de bloques a posteriori. El BoP incluye todos aquellos componentes necesarios para hacer funcionar la planta, tales como la bomba, válvulas, tanque de expansión, sensores, etc. Entre las diversas válvulas, se incluye una de tres vías que permite

la derivación del fluido caloportador, aislando la ORC del resto del sistema. La instalación permite monitorizar la temperatura de salida y de entrada del campo solar ($T_{\text{salida sol}}$ y $T_{\text{entrada sol}}$) con dos sensores de temperatura tipo Pt-100 (MKS). Para controlar la presión del aceite del circuito ($P_{\text{salida sol}}$) se utiliza un sensor de presión absoluta modelo Cerabar M PMP55 (Endress + Hauser). Además se han conectado un termómetro exterior e higrómetro de humedad relativa, modelo EE210 (Elektronik), para monitorizar las condiciones ambientales. Para medir la radiación global horizontal se instala un piranómetro modelo Hukseflux SR20. Por último, para poder calcular la potencia desarrollada por el campo solar se requiere el caudal de aceite (\dot{V}_{aceite}), el cual se mide con un caudalímetro tipo Vortex modelo Prolin Prowirl F 200 (Endress + Hauser). El aceite que hace de fluido caloportador es Therminol 62.

Teoría y cálculos

Para el cálculo de la potencia desarrollada por el campo solar (\dot{Q}) se utiliza la Ec. (1). Como se puede ver en la Fig. 3, tanto la densidad (ρ_{aceite}) como el calor específico ($C_{p_{\text{aceite}}}$) del Therminol 62 varían con la temperatura. Por este motivo se calcula la regresión lineal, con ajuste adecuado para ambas, y se incorporan las Ecs. (2) y (3):

$$\dot{Q}[\text{kW}] = C_{p_{\text{aceite}}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \cdot \dot{V}_{\text{aceite}} \left[\frac{\text{l}}{\text{s}} \right] \cdot \rho_{\text{aceite}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right] \cdot (T_{\text{salida sol}} - T_{\text{entrada sol}}) [\text{K}] \quad (1)$$

$$\rho_{\text{aceite}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right] = -A \cdot \frac{T_{\text{salida sol}} + T_{\text{entrada sol}}}{2} [\text{K}] + B \quad (2)$$

siendo $A = -0.7226$ [$\text{kg}/(\text{l} \cdot \text{K})$] y $B = 969.37$ [kg/l].

$$C_{p_{\text{aceite}}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] = C \cdot \frac{T_{\text{salida sol}} + T_{\text{entrada sol}}}{2} [\text{K}] + D \quad (3)$$

siendo $C = 0.0026$ [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}^2)$] y $D = 1.893$ [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$].

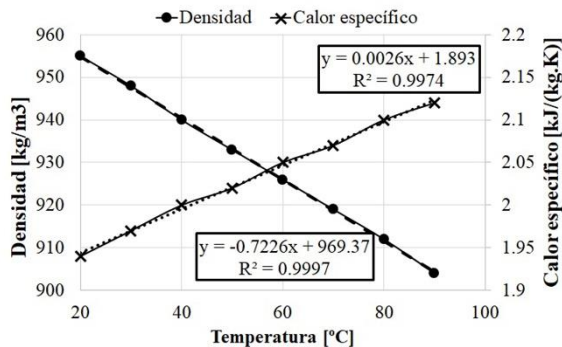


Fig. 3. Evolución de la densidad y calor específico del Therminol 62 en función de su temperatura

Descripción de los Experimentos

Se realizan dos experimentos de calentamiento del aceite, primero desde 30 a 80 °C (se alcanzan algo más de 80 °C pero el experimento se detiene por motivos de seguridad ya que la planta está en su fase inicial). El primero de ambos, solo incluye el calentamiento de la instalación y la apertura de la válvula de tres vías que conecta la ORC con el BoP. Al final del segundo experimento, tras conectar la ORC, esta se activa para iniciar el ciclo Rankine con el flujo orgánico y consecuentemente la producción eléctrica.

RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos durante los dos experimentos realizados. El experimento uno se recoge en las Fig. 4 y Fig. 5. La Fig. 4 muestra cómo evoluciona la potencia térmica del campo solar, a las 11:20 horas se completa la focalización de todas las líneas de espejos Fresnel y comienzan el seguimiento solar, se observa como la potencia se estabiliza. La Fig. 5 muestra la evolución de las temperaturas del aceite a la entrada y la salida del campo solar, se aprecia una evolución solidaria de ambas desde 30°C hasta más de 80°C, aunque estas difieren entre 2 y 4°C. También se puede ver un aumento de la presión del circuito con la temperatura del aceite.

Los resultados del experimento dos se recogen en las Fig. 6 y Fig. 7. Tanto la potencia térmica desarrollada por el campo solar como el caudal del aceite se comportan de la misma manera que durante el experimento uno, hasta que se abre la válvula de tres vías que conecta la ORC (Fig. 6). A las 11:20 horas se completa la focalización de las 18 líneas de espejos y, al igual que antes, inician el seguimiento solar para concentrar la radiación directa; en la Fig. 7 se observa un rápido incremento de la temperatura del Therminol 62 desde ese momento. A las 12:10 se conecta la ORC al circuito, provocando una caída del caudal del flujo caloportador (Fig. 6) y un aumento de la presión en el circuito (Fig. 7), debido a la caída de presión provocada por el evaporador de la ORC. Minutos después se conecta el ciclo Rankine de la turbina y al iniciar la producción eléctrica, el diferencial de seguridad se activa y desconecta el sistema eléctrico de la ORC. Esto ocurre debido a motivos de seguridad, al encontrarse en la planta en fase de construcción.

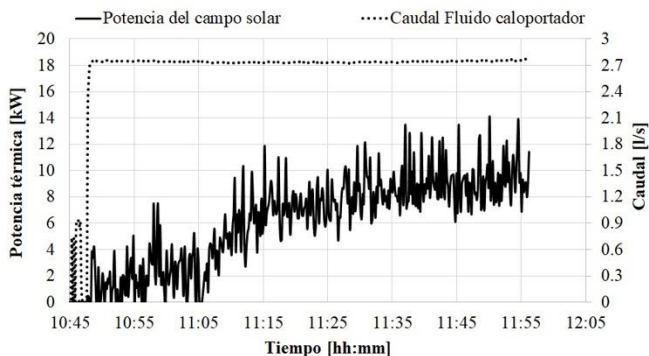
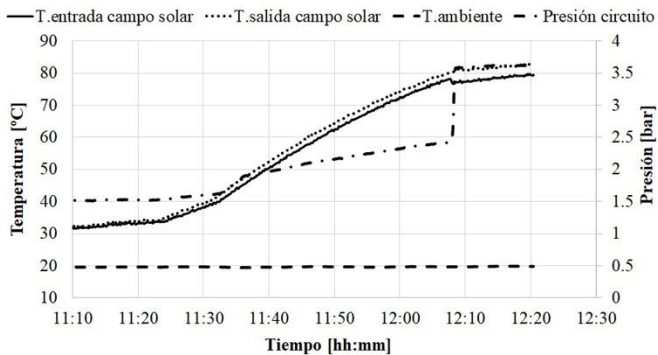
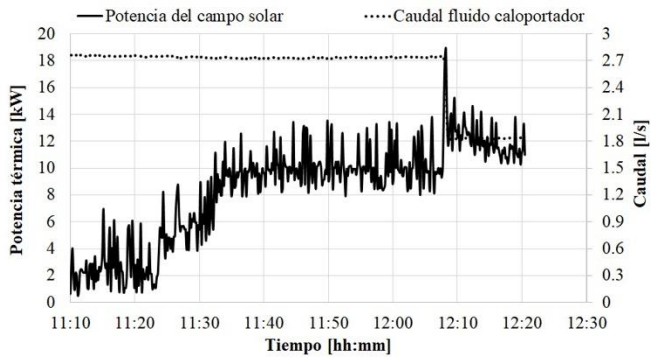
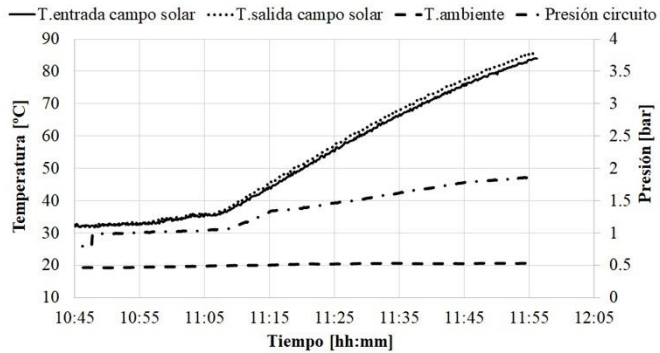


Fig. 4. Potencia térmica del campo solar y caudal del fluido caloportador. Experimento uno.



CONCLUSIONES

Se ha probado satisfactoriamente el campo solar hasta casi 90°C, limitación debida a motivos de seguridad por la situación en fase de construcción de la planta. Las 18 líneas de espejos colectores tipo Fresnel lineales se orientan y focalizan con éxito, además de realizar adecuadamente el seguimiento solar. En cuanto a la turbina orgánica de ciclo Rankine, se ha comprobado que es capaz de iniciar la producción eléctrica. El fluido, Novec 649, se evapora y es capaz de expandirse en la innovadora micro turbina. No obstante por motivos de seguridad hasta que no se complete la planta el diferencial de seguridad está limitado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado el programa de Investigación y Desarrollo H2020 de la Unión Europea, a través del Grant Agreement 723596, cuyo nombre de referencia es Innova MicroSolar. Este trabajo ha sido cofinanciado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España (ENE2015-64117-C5-1-R (MINECO/FEDER) y ENE2015-64117-C5-3-R (MINECO/FEDER)). Los autores quieren agradecer al Gobierno de Cataluña por la acreditación de calidad otorgada a su grupo de investigación (2017 SGR 1537). GREa es un agente TECNIO certificado en la categoría de desarrolladores tecnológicos por el Gobierno de Cataluña. José Miguel Maldonado agradece al Gobierno de España la concesión de la ayuda para contratos predoctorales para la formación de doctores (BES-2016-076554). Alvaro de Gracia agradece los fondos recibidos del programa de Investigación y Desarrollo H2020 de la Unión Europea, a través del Marie Skłodowska-Curie Grant Agreement No 712949.

REFERENCIAS

Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. Available from: <http://www.epbd-ca.eu> (October 2017).
Horizon 2020, The EU Framework Programme for Research and Innovation. Available from: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/> (October 2017).
International Energy Agency. Transition to sustainable buildings: Strategies and opportunities. Available from: <http://www.iea.org/etp/buildings/> (October 2017).
Urge-Vorsatz D, Cabeza L.F, Serrano S, Barreneche C, Petrichenko K. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. Renewable and Sustainable Energy reviews, 2015; 41:85-98.