



Received: 26-02-2017
Accepted: 06-03-2017

Generación de energía eléctrica en la edificación mediante tecnología de disco Stirling Electrical energy generation in building by means of Stirling dish technology

Carlos Morón, Daniel Ferrández, Jorge Pablo Díaz & Pablo Saiz

¹ Universidad Politécnica de Madrid(carlos.moron@upm.es; daniel.ferrandez.vega@alumnos.upm.es; pabloaizm@gmail.com, jorgepablo.diaz@alumnos.upm.es)

Resumen— La creciente demanda de energía acompañada de los elevados niveles de emisión de gases contaminantes a la atmosfera hace patente la necesidad de encontrar nuevos sistemas de producción de energía. Una de las posibles alternativas se encuentra en la energía solar de concentración, y más concretamente en la tecnología termosolar con motor Stirling que alcanza unos niveles de rendimiento muy superiores a la energía solar fotovoltaica en cuanto a producción de energía eléctrica. En este trabajo se muestra el diseño y la caracterización de un prototipo de captador paraboloïdal con motor Stirling, que permite obtener datos reales del funcionamiento de este tipo de sistemas. Esto permitirá modelizar de manera real el comportamiento esperado de equipos comerciales reales antes de abordar su implantación en edificios y viviendas unifamiliares.

Palabras clave— Energía solar de concentración; captador paraboloïdal; motor Stirling; Arduino.

Abstract- The increasing demand for energy accompanied by high level of emission of the contaminating gases into the atmosphere underscores the need to find new energy production systems. One of the possible alternatives is concentrating solar power and, more specifically, solar thermal technology with a Stirling engine that reaches higher performance levels than photovoltaic solar energy in terms of electricity generation. This paper shows the design and characterization of a prototype paraboloïdal collector with a Stirling engine that allows obtaining real data of this type of systems functioning. This will allow modelling in a real way of expected performance of real commercial devices before approaching their introduction in buildings and single-family houses.

Index Terms— Concentrating solar power, paraboloïdal collector, Stirling engine, Arduino.

I. INTRODUCCIÓN

El agotamiento de los recursos fósiles y el efecto nocivo causado por el elevado consumo energético entre otros sectores en la edificación, está provocando una creciente sensibilización medioambiental en la población que años atrás

C. Morón pertenece al Departamento de Tecnología de la Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, España.

D. Ferrández y P. Saiz son doctores que colaboran con el Departamento de Tecnología de la Edificación y con el Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control respectivamente, Universidad Politécnica de Madrid, España.

J. P. Díaz pertenece a la Institución Profesional Salesiana, Salesianos Carabanchel, Ciclo Formativo de Grado Superior de Eficiencia Energética y

Energía Solar Térmica, y es alumno de doctorado en la E.T.S.de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid).

se veía impensable. Cualquier esfuerzo por encontrar un modelo de desarrollo sostenible basado en fuentes energéticas renovables, redes de generación distribuida y edificios inteligentes, redundará de forma positiva en la lucha contra el cambio climático (Gil et al., 2001; Fan et al., 2016)

Estudios actuales cifran en 40 y 60 los años que quedan para el agotamiento de las reservas mundiales de petróleo y gas natural (Stellmes, 2013). Por otro lado, las nefastas consecuencias tanto para los ecosistemas como para toda la humanidad en su conjunto debidas al cambio climático serán irreversibles y afectarán a generaciones futuras durante centenares de años si no se actúa con premura (Robbins, 2015). Así, es necesario encontrar el camino que garantice el futuro de la producción energética, pero de forma sostenible y respetuosa con el medioambiente. Las tecnologías o sistemas termosolares de concentración tendrán un papel esencial en la producción a gran escala de energía eléctrica en un futuro.

Cada vez más, se van dando a conocer algunos de estos sistemas como resultado de los buenos rendimientos obtenidos y su condición de energía limpia y renovable (Gasparatos et al., 2017). Aun así, quedan barreras por salvar como el estudio de la integración arquitectónica de este tipo de energía en las edificaciones convencionales, con el objetivo de romper lo menos posible la estética del edificio y favorecer al máximo el autoabastecimiento de energía en la edificación creando una red de ciudades de cero emisiones de CO₂ (Yi et al., 2017).

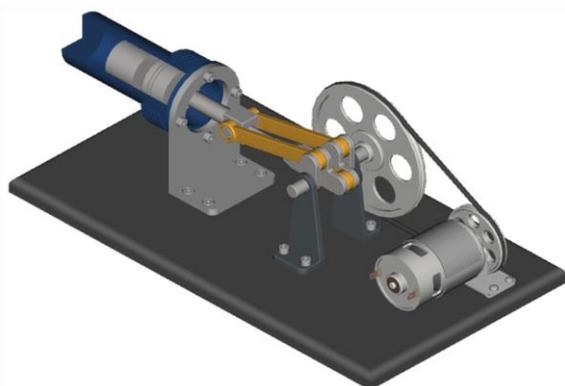
Actualmente son varias las tecnologías que la ciencia ofrece para producir energía solar termoeléctrica, distinguiéndose entre sí por el ciclo termodinámico empleado (Robense, 2015). Entre ella destaca la tecnología de disco Stirling, consistente en captadores parabólicos que permiten reflejar y concentrar la radiación solar en el foco, con el fin de que el foco caliente del motor alcance temperaturas suficientes que permitan convertir la energía térmica en mecánica y finalmente ésta en energía eléctrica (Segura, 1993). Este sistema exige de un equipo de seguimiento solar en dos ejes, que permita enfrentar la superficie del paraboloide de manera perpendicular a los rayos del sol.

Diversos autores han estudiado la tecnología de disco

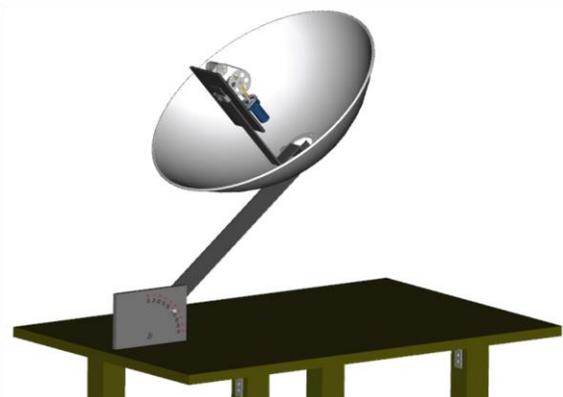
Stirling con el objetivo de evaluar estos sistemas como medio de producción de energía para abastecer viviendas generalmente en medios rurales (Kadri et al., 2016), y comparando los resultados con alguna simulación por métodos numéricos (Sauer, 2017). No obstante, esta tecnología tiene otras aplicaciones como la producción de electricidad a gran escala para inyección a red (Abbas et al., 2011) o el bombeo de agua potable o potabilización de la misma (Al-Dafie et al., 2016). Así, la mayoría de los estudios se centran en la optimización del rendimiento del ciclo termodinámico del motor Stirling que favorezca la transformación de energía térmica en energía eléctrica (Ferreira et al., 2016), en el desarrollo de nuevos materiales reflectantes que aumenten los niveles de concentración en el foco (Hafez et al, 2017) o en el desarrollo de nuevos sistemas de seguimiento solar, que permitan mejorar la eficacia de los motores ya existentes.

El desarrollo de nuevos sistemas de adquisición de datos y monitorización de dispositivos es cada vez mayor. Este desarrollo se está viendo provocado por la salida al mercado de nuevos dispositivos electrónicos como Arduino (Warren et al., 2001). Estos componentes no solo agilizan el montaje de circuitos que antes se creían complejos, sino que también aporta resultados fiables y con un amplio rango de medida, tal es así, que en algunos proyectos de investigación (Fuentes et al., 2014), ya se emplea esta tecnología para la monitorización de sus equipos con la ventaja de poder reemplazar sin problemas los componentes dañados y poder hacer modificaciones sobre el programa original una vez instalado. Además, esta tecnología ha sido probada con éxito por otros investigadores en la construcción de seguidores solares (Salome et al., 2015).

El diseño y construcción de sistemas capaces de capturar datos in situ y procesar los resultados derivados de la generación de electricidad obtenida mediante estos sistemas de concentración termosolares, además de simular el comportamiento de una instalación real, son cada vez más imprescindibles para poder extrapolar resultados que permitan implantar este tipo de energías renovables en los edificios (RD 1027/2007; CTE DB-HE, 2013).



(a)



(b)

Fig. 1. Diseño 3D del captador termosolar. (a) Motor Stirling empleado; (b) Estado final del prototipo.

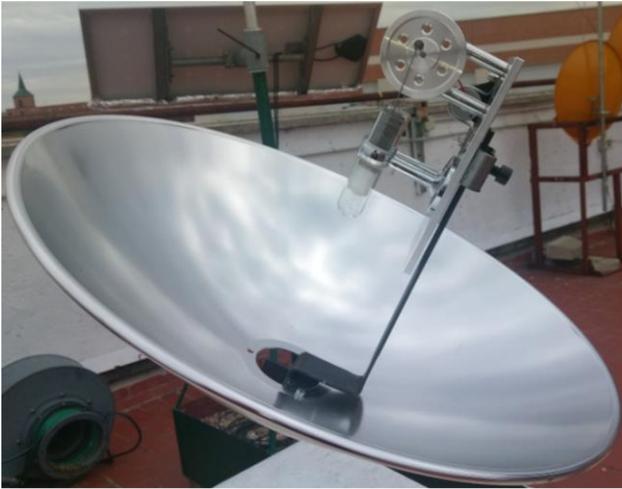


Fig. 2. Estado final del captador implementado.

El objetivo de este trabajo es abordar con éxito la modelización, construcción y validación de un prototipo de energía solar de concentración basado en la tecnología de disco Stirling, empleando para ello un motor de pequeñas dimensiones y una monitorización con Arduino para la captura de datos. Sometiendo posteriormente al prototipo a una serie de ensayos teóricos y prácticos, de los cuales se obtienen resultados satisfactorios para su aplicación en la edificación.

II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

En ese apartado se muestra el prototipo diseñado, así como los equipos de medida empleados en la recogida de datos.

A. Diseño 3D del prototipo

Previamente a la construcción física del prototipo, este ha sido diseñado mediante el software CAD de dibujo en 3D FreeCAD 0.15 (Falk et al., 2012), que no solo ha permitido obtener una representación gráfica fidedigna, sino que también es compatible con otros programas de diseño 3D siendo fácilmente exportable. En la Figura 1, se muestra el estado final del captador termosolar y el motor Stirling.

B. Estado final del prototipo

Una vez finalizada la fase de diseño se ha procedido a la construcción real del captador termosolar, el resultado definitivo se muestra en la Figura 2.

Este captador puede trabajar en condiciones reales de

irradiancia una vez expuesto a la intemperie, la única salvedad es la falta de protección del sensor de recogida de datos y de la placa de Arduino, ya que estos no poseen ninguna protección frente a la lluvia. Sí bien es cierto que podrá analizarse su comportamiento mediante ensayos controlados en laboratorio, o bien con simuladores dinámicos por ordenador que modelicen solicitaciones atmosféricas.

C. Simulación del comportamiento esperado

En primer lugar, se ha realizado una simulación del comportamiento físico esperado del paraboloide empleado en el captador, en términos de factor de concentración, así como de la energía térmica obtenida en el foco del mismo. Esto ha permitido extrapolar resultados sobre el comportamiento esperado para el motor Stirling, ya que permite conocer la temperatura que alcanzará su foco caliente. Dicho estudio se ha desarrollado con ayuda del software COMSOL Multiphysics 5.2©. Los resultados derivados de esta simulación se muestran en la Figura 3.

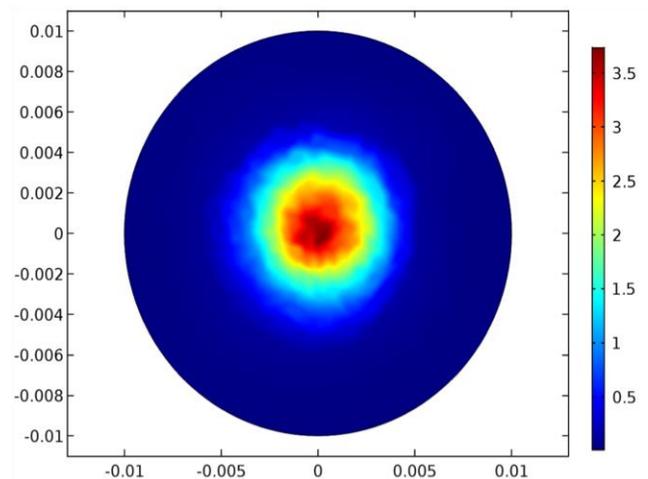


Fig. 3. Simulación del comportamiento térmico del paraboloide.

Como se puede apreciar en la Figura 3, debido a la superficie bien pulida del aluminio que conforma el captador, el nivel de concentración en el foco del paraboloide es muy elevado, esperándose alcanzar temperaturas por encima de los 350°C.

TABLA I
SIMULACIÓN DEL CICLO TERMODINÁMICO DEL MOTOR STIRLING EMPLEADO

Estado	P (bar)	V (m ³ /kg)	T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	W (kJ)	Q (kJ)
1	1	1.292	450	322.58	451.76	2.1115	-52.376	-52.376
2	1.5	0.861	450	322.58	451.76	1.99511	29.098	29.098
3	2.333	0.861	700	512.36	713.3	2.32962	81.4734	81.4734
4	1.556	1.292	700	512.36	713.3	2.44601	29.098	29.098

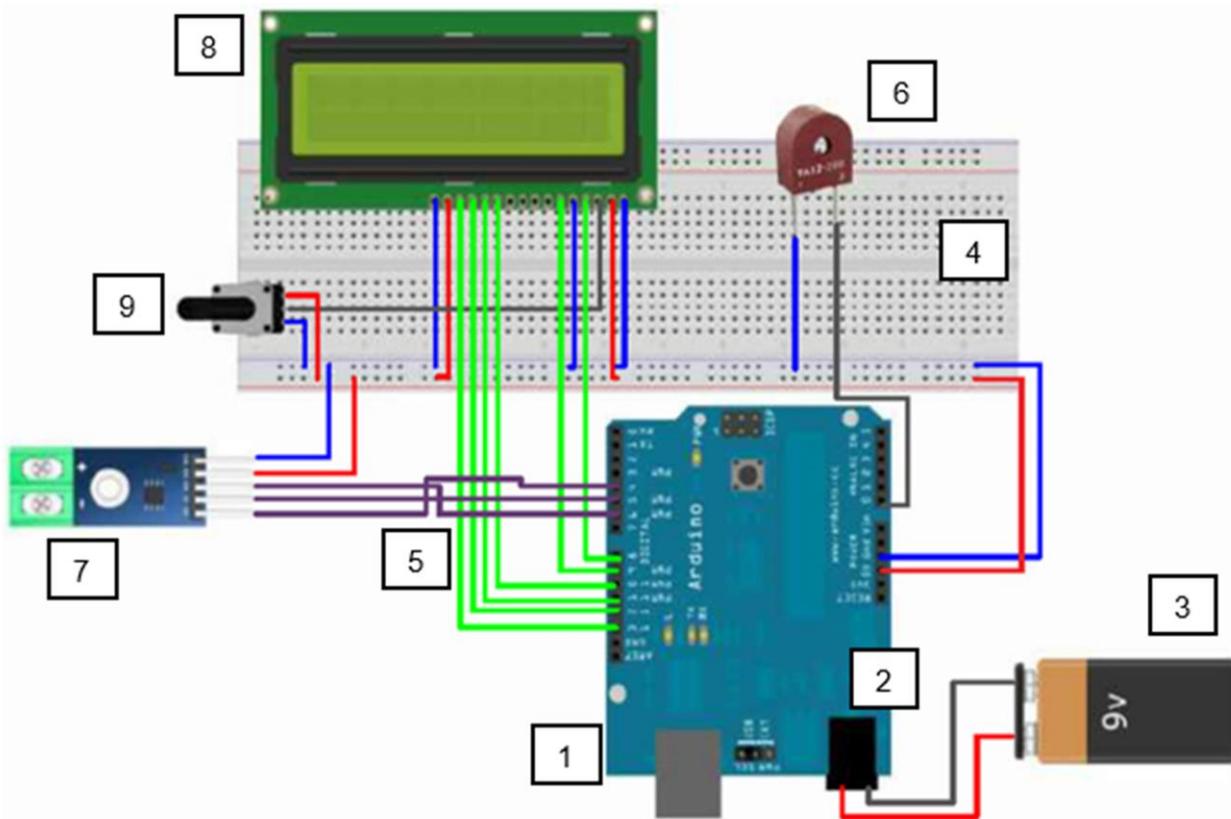


Fig. 4. Esquema de conexionado de los componentes que componen el equipo de medida

Por otro lado, también se ha realizado una simulación del comportamiento esperado para el motor Stirling empleando el software TermoGraf ©, capaz de representar cualquier ciclo termodinámico siempre y cuando se introduzcan los parámetros adecuados. Estas simulaciones de ciclos termodinámicos han sido empleadas por ciertos autores para validar el comportamiento de sus motores (Molino et al., 2013).

irradiancia obtenidos experimentalmente, además, también se requiere del volumen de los focos del motor que se obtiene de sus características técnicas.

En la Tabla 1 se muestra el resultado final obtenido para el ciclo del motor Stirling empleado en este prototipo indicando sus parámetros más importantes.

Como se puede apreciar en la Tabla 1, el ciclo se compone de una compresión isoterma 1-2 donde se cede calor al foco frío, una absorción de calor isocora 2-3 a volumen constante donde se aumenta la temperatura y la presión, una expansión isoterma 3-4 del gas a alta temperatura donde se absorbe calor del foco caliente, y una última cesión de calor isocora 4-1 que disminuye la temperatura del fluido.

D. Equipo de medida empleado

El sistema de control y adquisición de datos para el prototipo de captador solar parabólico ha sido implementado mediante la tecnología de Arduino, el esquema de montaje y componentes empleados pueden verse en la Figura 4. Donde, (1) es la placa de Arduino UNO empleada como sistema de adquisición de información, (2) es la clavija de alimentación para una pila (3) de 9V, (4) y (5) son la protoboard y los cables que permiten realizar el montaje del circuito, (6) es un sensor de electricidad medición de AC modelo TA12-200, (7) es un sensor termopar tipo K+ módulo MAX6675 con rango

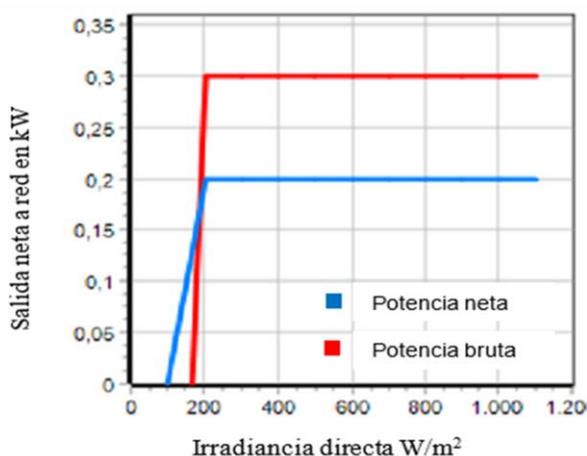


Fig. 5. Ganancia energética del prototipo.

En este caso, han sido necesarios las temperaturas del foco caliente y el foco frío del motor, así como los niveles de

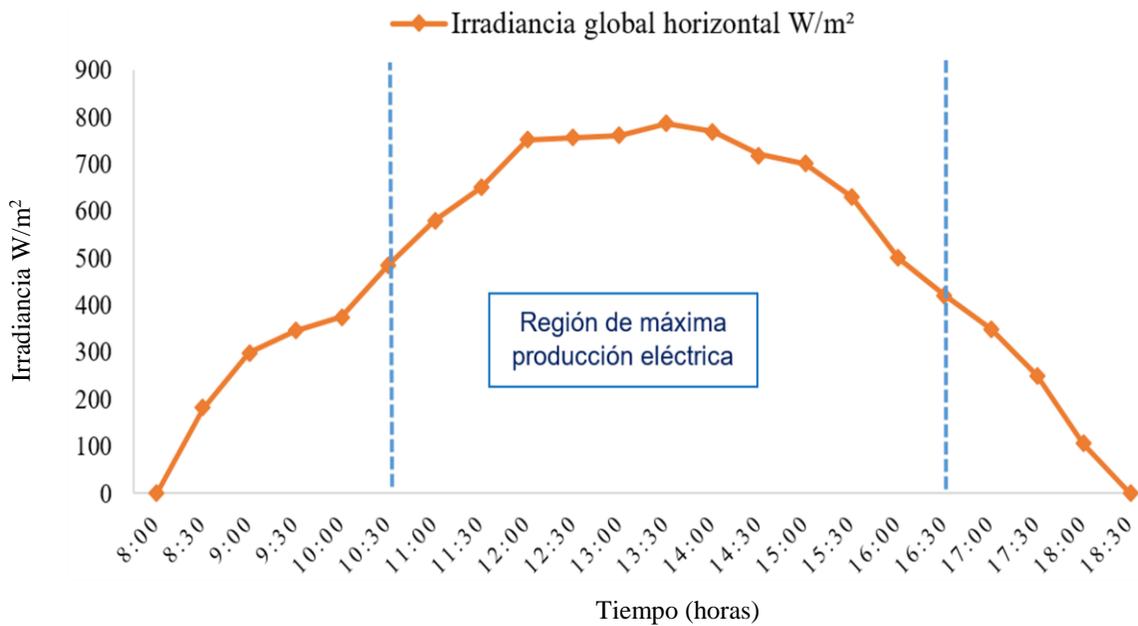


Fig. 6. Niveles de irradiancia W/m² y zona de mayor rendimiento.

de trabajo entre -200°C y 1024°C, (8) es una pantalla LCD que permite tras monitorizar el prototipo, mostrar los datos en formato texto, (9) es un regulador de potencia eléctrica o potenciómetro.

E. Caracterización energética

Para el caso de un colector parabólico, se ha empleado el software Greenius 4.1.1. y los datos meteorológicos correspondientes a los últimos años en Madrid. las ecuaciones que modelizan la potencia eléctrica producida son:

$$P_{gro} = a \cdot E_{corr} + b \Leftrightarrow E_{DNI} \geq E_{DNI,min} \tag{1}$$

$$P_{gro} = 0 \Leftrightarrow E_{DNI} < E_{DNI,min} \tag{2}$$

donde P_{gro} es la potencia eléctrica bruta producida en W, E_{corr} es la irradiancia corregida en W/m² que se obtiene de la ecuación (3), E_{DNI} es la irradiancia incidente perpendicular en W/m², $E_{DNI,min}$ es la E_{DNI} mínima para iniciar la generación en W/m², a y b son dos constantes de rendimiento del modelo en $W_e/(W/m^2)$.

$$E_{corr} = E_{DNI} \cdot f_{ref} \cdot f_{tem} \tag{3}$$

donde f_{ref} y f_{tem} son los factores de corrección de reflexión y temperatura obtenidos mediante las ecuaciones 4 y 5:

$$f_{ref} = f_{sha} \cdot f_{int} \tag{4}$$

donde f_{sha} es el factor de proyección de sombras y f_{int} es el factor de intercepción.

$$f_{tem} = \frac{\theta_{nor,amb} + 273,15^\circ C}{\theta_{amb} + f_{ref} \cdot E_{DNI} \cdot c_{coo} + 273,15^\circ C} \tag{5}$$

donde $\theta_{nor,amb}$ es la temperatura normalizada para el

rendimiento del modelo en °C, θ_{amb} es la mayor temperatura alcanzable en el ciclo Stirling en °C y c_{coo} es la constante de enfriamiento en °C/(W/m²).

Por otro lado, también se consideraron las potencias parasitarias mediante su influencia sobre el sistema total desarrollado, se pueden ver en las ecuaciones (6) y (7):

$$P_{par} = P_{ope} \Leftrightarrow E_{DNI} \geq E_{DNI,min} \tag{6}$$

$$P_{par} = P_{sle} \Leftrightarrow E_{DNI} < E_{DNI,min} \tag{7}$$

donde P_{par} es la potencia parasita total en W, P_{ope} es la potencia de operación en W y P_{sle} es la potencia en estado de espera en W.

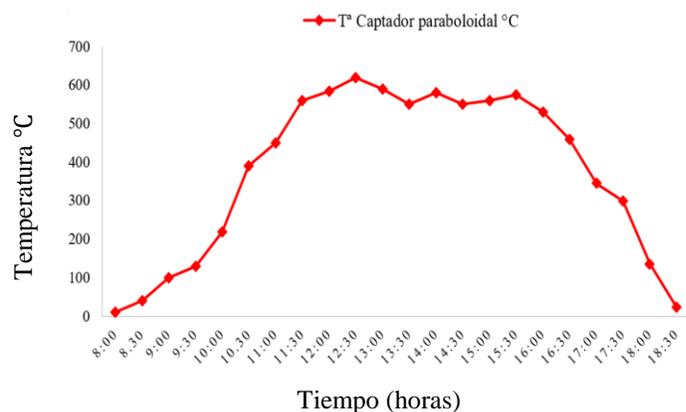


Fig. 7. Temperatura el °C del foco caliente del motor Stirling.

Para el caso de la potencia que puede ser inyectada a red se obtiene con ayuda de la ecuación (8):

$$P_{gri} = P_{gro} - P_{par} \tag{8}$$

donde P_{gri} es la potencia inyectada hacia o consumida de red en W.

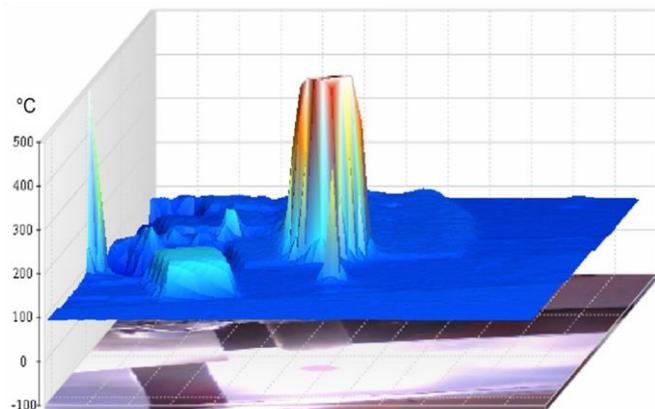


Fig. 8. Termografía tridimensional del foco caliente del motor Stirling.

La ganancia de energía obtenida para nuestro captador parabolooidal con motor Stirling empleando las ecuaciones anteriores se puede ver en la Figura 5.

III. RESULTADOS

En primer lugar, se han recogido medidas de los niveles de irradiancia a lo largo del mes de mayo y junio del año 2016. Estos datos han sido recogidos en intervalos de 30 minutos desde las 8:00 am hasta las 18:30 pm, excluyendo los días cuyas condiciones atmosféricas no permitían realizar el experimento (lluvia o nieve).

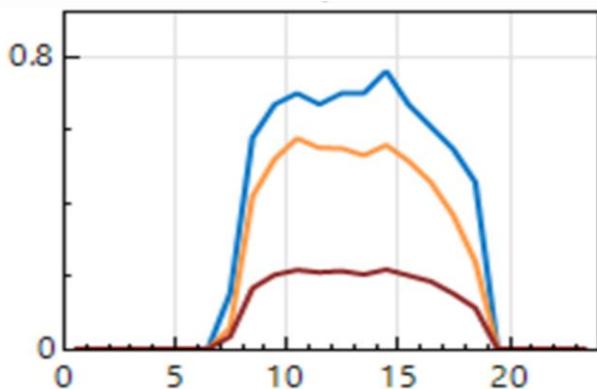


Fig. 9. Rendimiento del motor para el mes de mayo

Los valores medios de irradiancia obtenidos se muestran en la figura 6, donde también se marca la región efectiva en la cual el prototipo alcanzaba un rendimiento óptimo para producción de energía eléctrica.

Por otro lado, también se han recogido los valores medios de las temperaturas alcanzadas por el foco caliente del motor con ayuda de la sonda de Arduino, cuyos valores se muestran en la Figura 7.

Para verificar el valor de estos resultados se ha realizado una prueba con cámara termográfica en el instante de máxima producción, obteniendo valores similares a los aportados por

el sensor, tal y como se muestra en la Figura 8.

Como se puede apreciar en las Figuras 7 y 8, los valores de temperatura tomados por la sonda y mediante cámara termográfica para el foco caliente del motor, se corresponden con las simulaciones previas de las Figuras 3 y 5. Así pues, esta tecnología alcanza su valor de máxima producción entre las 10:30 y las 16:30, donde los picos de producción de energía eléctrica pueden permitir el autoabastecimiento de una vivienda unifamiliar debidamente dimensionada.

En las Figuras 9 y 10 se muestran los rendimientos del prototipo en los meses de mayo y junio estudiados, donde se puede apreciar que la eficiencia del colector es muy superior a la del motor, tal y como era de esperar, teniendo un total de 15 días útiles de producción durante el mes, de tal forma que se cumplen las expectativas de abastecimiento para una vivienda.

En las figuras anteriores (9 y 10), en azul se representa la eficiencia del colector, en naranja la eficiencia del receptor y en rojo la eficiencia del motor.

Con los resultados obtenidos, y con ayuda del programa de simulación SAM©, se han obtenido los valores estimados de producción energética mensual para una vivienda de cuatro personas, si se empleara un captador parabolooidal comercial de 6 m de diámetro. La Figura 11 muestra los picos de producción mensuales a lo largo de todo el año 2016.

Como se puede apreciar en la figura 10, la producción energética anual sería de 10424 kWh, cumpliendo con las expectativas para alimentación de una vivienda individual y con una eficiencia del colector del 23.8%.

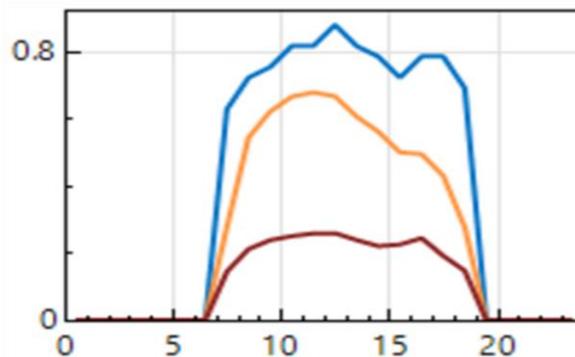


Fig. 10. Rendimiento del motor para el mes de junio.

IV. CONCLUSIONES

A pesar de que la tecnología termosolar con motor Stirling no se encuentra suficientemente desarrollada en España, la sencillez de estos equipos, su coste reducido en comparación con otras tecnologías y su modularidad hacen de este sistema una buena alternativa para la producción de energía eléctrica.

La ausencia de fluidos circulantes permite optimizar el rendimiento de este tipo de instalaciones. Para el caso del

prototipo implementado se han obtenido mayores niveles de producción de electricidad en las horas de mayor nivel de radiación incidente, tal y como era de esperar, siendo en esta franja horaria donde el foco caliente alcanza sus mayores niveles de temperatura y optimiza su rendimiento. Por otro lado, las simulaciones realizadas con un captador comercial, muestran que el rendimiento de este tipo de instalaciones es superior a los 10000 kWh de producción anual, pudiendo emplearse para viviendas de autoconsumo.

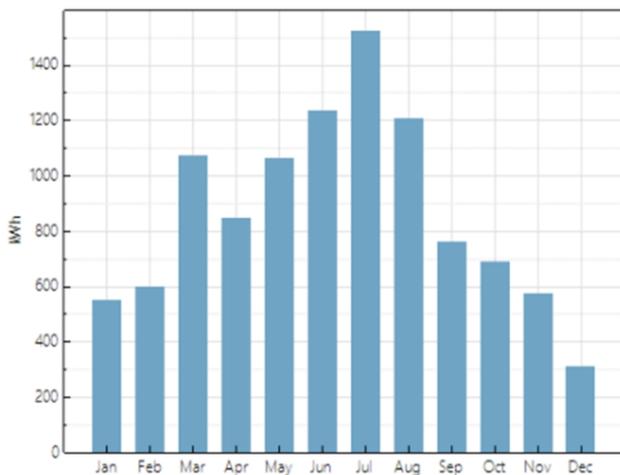


Fig. 11. Producción energética mensual para el año 2016.

Como desventajas de esta tecnología indicar que precisa de un sistema de seguimiento solar a dos ejes, puesto que para la energía termosolar de concentración se hace necesario una radiación directa y perpendicular al captador.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración de los estudiantes del Ciclo Formativo de Grado Superior de Eficiencia Energética y Energía Solar Térmica del centro Salesianos Carabanchel de Madrid.

REFERENCIAS

Abbas, M. Boumeddane, B. Said, N. Chikouche, A. (2011). Dish Stirling technology: A 100 MW solar power plant using hydrogen for Algeria. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, Issue 7, Abril 2011, pp. 4305-4314.

Al-Dafie, A. M. Dahdolan, M. Al-Nimr, M. (2016). Utilizing the heat rejected from a solar dish Stirling engine in potable water production. *Solar Energy*, Vol. 136, 15 Octubre 2016, pp. 317-326.

Documento Básico DB-HE, "Ahorro de Energía", Código Técnico de la Edificación. BOE, nº219, pp. 67137-67209

Falck, D. y Colle'e, B. (2012). *Freecad [How-To]*, 1o ed.; Packt Publishing: United Kingdom; 2012; pp. 1-70.

Fan, j. Wu, L. Zhang, F. Xiang, Y. Zheng, J. (2016). Climate change effects on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of China during 1956-2015. *Journal of Hydrology*, vol. 542, pp. 923-937.

Ferreira, A. Nunes, M. Teixeira, J. Martins, L. Teixeira, F. (2016). Thermodynamic and economic optimization of a solar-powered Stirling engine for micro-cogeneration purposes. *Energy*, Vol. 111, 15 Septiembre 2016, pp. 1-17.

Fuentes, M. Vivar, M. Burgos, J.M. Aguilera, J. Vacas, J. A. (2014). Design of an accurate low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standards. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 130, Noviembre 2014, pp. 529-543.

Gasparatos, A. Doll, C.N. Estaban, N. Ahmed, A. Olang, T.A. (2017). Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 70, Abril 2017, pp. 161-184.

Gil, C.M.; Gil, M.-A.C.; Castro, M.; Santos, C.A. e Ibañez, C.J. (2001). *Energía solar térmica de media y alta temperatura. Monografías técnicas de energías renovables*, 1rd Ed.; PROGENSA-Promotora General de Estudios: Sevilla, España, pp. 1-68.

Hafez, A.Z. Soliman, A. El-Metwally, K. A. Ismail, I.M. (2017). Design analysis factor and specifications of solar dish technologies for different systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, Enero 2017, pp. 1019-1036.

Kadri, Y. Hadj Abdallah, H. (2016). Performance evaluation of a stand-alone solar dish Stirling system for power generation suitable for off-grid rural electrification. *Energy Conversion and Management*, Vol. 129, 1 Diciembre 2016, pp. 140-156.

Molino, A. Giordano, G. Motola, V. Fiorenza, G. Nanna, F. Braccio, G. (2013). Electricity production by biomass steam gasification using a high efficiency technology and low environmental impact. *Fuel*, vol. 103, pp. 179-192.

Real Decreto 1027/2007, de 20 de Julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE). BOE, nº207, pp. 35931-35984.

Robbins, A. (2015). Health consequences of climate change interventions. *The Lancet*, 2015, Volume 386, Issue 10006, Noviembre, pp. 1819

Rovense, F. (2015). A case of study of a concentrating solar power plant with Unfired Joule-Brayton cycle. *Energy Procedia*, 2015, Volume 82, December, pp. 978 – 985.

Salamone, F.; Belussi, L.; Danza, L.; Ghellere, M. y Meroni, I. (2015). An open source low-cost wireless control system for a forced circulation solar plant, *Sensors* 2015, 15(11).

Sauer, J. Kuehl, H. (2017). Numerical model for Stirling cycle machines including a differential simulation of the

- appendix gap. Applied Thermal Engineering, Vol. 111, 25 Enero 2017, pp. 819-833.
- Segura, J. (1993). Termodinámica técnica. Ed. REVERTÉ, S.A. Barcelona, España, ISBN: 84-291-4352-1.
- Stellmes, M. Roder, A. Udelhoven, T. Hill, J. (2013). Mapping syndromes of land change in Spain with remote sensing time series demographic and climatic data. Land Use Policy, Vol. 30, Issue 1, Enero 2013, pp. 685-702.
- Warren, J.-D.; Adams, J. y Molle, H. (2001). Arduino robotics, 1o ed.; Apress; New York, NY, USA, 2001; pp.1-180.
- Yi, H. Srinivasan, R. Willian, W. Tilley, D.R. (2017). An ecological understanding of net-zero energy building: Evaluation of sustainability based on emergy theory. Journal of Cleaner Production, vol. 143, pp. 654-671.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.