



## Trabajo Fin de Grado

Análisis experimental de un reconcentrador de  
rayos para un disco stirling

Experimental analysis of a ray concentrator on dish  
stirling

Autor

Daniel Pedrós Elvira

Director

Carlos Monné Bailo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2016/2017





**DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. \_\_\_\_\_,

con nº de DNI \_\_\_\_\_ en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, \_\_\_\_\_

Fdo: ~~Daniel Podros~~

# Índice

Índice .....	2
Índice de figuras .....	3
Índice de gráficas.....	5
Índice de tablas .....	6
1. Introducción.....	8
1.1. Situación actual de la energía en España.....	8
1.2. Energía solar .....	8
1.3. Disco Stirling.....	12
1.3.1. Estructura de soporte .....	12
1.3.2. Concentrador parabólico.....	13
1.3.3. Motor Stirling .....	14
1.3.4. Alternador.....	15
1.3.5. Sistema de control y seguimiento solar .....	16
1.3.6. Conjunto Cavidad-Receptor .....	16
1.3.7. Reconcentradores.....	18
2. Estado del arte de los discos Stirling.....	21
3. Descripción y características del sistema analizado .....	28
4. Metodología.....	30
4.1. Funcionamiento nominal del disco Stirling.....	33
4.2. Comparativa de funcionamiento.....	42
5. Conclusiones.....	53
Anexo A.....	55
Referencias .....	57
Bibliografía.....	59

# Índice de figuras

Fig. 1 Despiece de un muro Trombe .....	8
Fig. 2 Panel solar modelo OPTITEC P245/H .....	9
Fig. 3 Captador solar plano modelo T20PS.....	9
Fig. 4 Central termo-solar lineal Fresnel Puerto Errado 2 de 30 MW en Murcia .....	10
Fig. 5 Horno solar ubicado en Odeillo, en los Pirineos Orientales de Francia.....	10
Fig. 6 Planta solar de captadores cilindro-parabólicos, Valle 1 y 2 situada en Cádiz, España.....	11
Fig. 7 Central Torre, Gemasolar, de 19,9 MW situada en Sevilla, España .....	11
Fig. 8 Instalación de discos Stirling en Arizona con una potencia de 1,5 MW.....	11
Fig. 9 Sistema EURODISH con una potencia nominal de 10kW .....	12
Fig. 10 Estructura tubular de un disco Stirling de 10 kW .....	13
Fig. 11 Disco Stirling formado por facetas con forma parabólica.....	13
Fig. 12 Disco Stirling compuesto de pequeñas facetas de vidrio .....	14
Fig. 13 Distal II, construido con membrana tensionada .....	14
Fig. 14 Representación real del motor Stirling.....	15
Fig. 15 Esquema de funcionamiento del motor Stirling mostrado en la Fig. 14 .....	15
Fig. 16 Esquema del alternador asociado al motor Stirling.....	15
Fig. 17 Esquema de un receptor head pipe asociado a un motor Stirling.....	16
Fig. 18 Esquema e imagen real de un receptor híbrido Head-pipe.....	17
Fig. 19 Esquema de un receptor volumétrico .....	17
Fig. 20 Los tres tipos de reconcentradores y el plato del disco Stirling .....	18
Fig. 21 Datos iniciales de cada uno de los reconcentradores .....	18
Fig. 22 Efecto de la absorbividad de las paredes y distribución del flujo para la forma cónica.....	19
Fig. 23 El efecto de la posición del receptor y la distribución del flujo .....	19
Fig. 24 Energía absorbida y eficiencia optima por los diferentes reconcentradores .....	20
Fig. 25 Sistema SAIC, fabricado por la compañía Salt River Project cerca Phoenix, Arizona .....	21
Fig. 26 Curva característica, del sistema SunDish, radiación directa frente a potencia	23
Fig. 27 Eurodish de 10kW, situado en la Plataforma Solar de Almería.....	23
Fig. 28 Motor, del sistema eurodish, modelo SOLO 161 y su receptor .....	24
Fig. 29 Curva característica del modelo Eurodish.....	24
Fig. 30 Sistemas SES localizados en Huntington Beach, California.....	25
Fig. 31 Curva característica del sistema SES. Radiación directa frente a potencia .....	25
Fig. 32 Sistema ADD propiedad de la empresa Sandia.....	26
Fig. 33 Curva característica del sistema ADD .....	26
Fig. 34 Sistema SUNCATCHER situado en Albuquerque, Nuevo México .....	27
Fig. 35 Disco Stirling, modelo Trinium instalado.....	28
Fig. 36 Detalle del disco parabólico y el receptor. ....	28
Fig. 37 Estudio de la trayectoria de los rayos solares.....	29
Fig. 38 Aro del receptor.....	29
Fig. 39 Reconcentrador situado en el receptor. ....	29
Fig. 40 Aro montado en el receptor.....	32

Fig. 41 Montaje del reconcentrador en el receptor.....	32
Fig. 42 Aro deformado por el desenfoque del disco.....	33
Fig. 43 Aro dañado por desenfoque del disco .....	33
Fig. 44 Reconcentrador después de la prueba de desenfoque. ....	35
Fig. 45 A la izquierda se observa sistema desenfocado y sucio con aro. Mientras, a la derecha se muestra el sistema enfocado y limpio con aro.....	50
Fig. 46 Planos de construcción del reconcentrador. ....	55
Fig. 47 Planos constructivos del aro.....	56

# Índice de gráficas

Gráfica 1 Ilustración de las características más notorias del sistema con la configuración de aro desenfocado a lo largo del día.....	34
Gráfica 2 Representación de los parámetros del disco a lo largo de un día de trabajo para la configuración de reconcentrador desenfocado.....	35
Gráfica 3 Efecto de la limpieza del disco Stirling.....	36
Gráfica 4 Seguimiento horario del trabajo realizado por el disco con la configuración del reconcentrador enfocado.....	37
Gráfica 5 Eficiencia eléctrica, térmica y total del sistema con la configuración nº 3 ...	37
Gráfica 6 Parámetros característicos del disco a lo largo de un día de trabajo con el aro enfocado como configuración principal.....	38
Gráfica 7 Representación de la eficiencia y potencia térmica de la configuración 4....	38
Gráfica 8 Seguimiento de la temperatura del receptor con la configuración 3.....	39
Gráfica 9 Representación de las temperaturas del refrigerante durante la semana de estudio de la configuración 3.....	40
Gráfica 10 Configuración 3 con su curva característica.....	41
Gráfica 11 Curva característica del sistema proporcionada por el fabricante .....	41
Gráfica 12 Rendimiento eléctrico frente a la temperatura del sistema, para reconcentrador y aro enfocados.....	42
Gráfica 13 Rendimiento eléctrico frente a la radiación global del sistema, para reconcentrador y aro enfocados.....	43
Gráfica 14 Potencia eléctrica frente a la temperatura del sistema, para reconcentrador y aro enfocados.....	44
Gráfica 15 Rendimiento eléctrico frente a la temperatura del sistema, para la configuración de concentrador enfocado y desenfocado.....	45
Gráfica 16 Potencia eléctrica frente a la temperatura del sistema, para la configuración de concentrador enfocado y desenfocado.....	46
Gráfica 17 Curva característica del sistema con ambas configuraciones, reconcentrador enfocado y desenfocado.....	47
Gráfica 18 Rendimiento eléctrico frente a la temperatura del sistema, realizada para el aro enfocado y desenfocado. ....	48
Gráfica 19 Curva característica del sistema, realizada para el aro enfocado y desenfocado .....	48
Gráfica 20 Potencia eléctrica frente a la temperatura del sistema, realizada para el aro enfocado y desenfocado.....	49
Gráfica 21 Comparativa del rendimiento eléctrico para las configuraciones 1 y 3.....	50
Gráfica 22 Representación de la potencia en las configuraciones 1 y 3.....	51
Gráfica 23 Ilustración de la curva característica de las configuraciones 1 y 3.....	51

# Índice de tablas

Tabla 1 Tabla de datos técnicos de los diferentes modelos.....	22
Tabla 2 Datos característicos del disco Stirling, modelo Trinium .....	31
Tabla 3 Equipos y parámetros medidos.....	32
Tabla 4 Datos adicionales del aro y el reconcentrador enfocados.....	44
Tabla 5 Valores principales para la comparación de ambas configuraciones. ....	47
Tabla 6 Valores notables tanto para aro enfocado como desenfocado.....	49
Tabla 7 Datos significativos para las configuraciones 1 y 3. ....	52

# Análisis experimental de un reconcentrador de rayos para un disco stirling

## Resumen

El estudio mostrado a continuación pretende analizar el comportamiento de un reconcentrador aplicado a un disco Stirling. Se comenzara explicando brevemente la situación de las energías renovables en España, así como los tipos y de energía solar que existen.

Posteriormente, se definirán las partes del disco Stirling y el funcionamiento de cada una de ellas. Los equipos han evolucionado a lo largo de la historia, por lo cual, se ha considerado oportuno realizar una recopilación de los equipos más importantes.

Para analizar el reconcentrador se ha considerado necesario realizar una serie de ensayos experimentales durante tres meses, con cuatro configuraciones: Aro enfocado, aro desenfocado, reconcentrador enfocado y reconcentrador desenfocado. Se ha querido analizar una situación realista y se ha decidido introducir dos efectos comunes en estos sistemas: la suciedad en el plato del disco y un ligero desenfoque.

Una vez obtenidos los datos se ha elaborado un análisis de las diferentes configuraciones. Inicialmente se ha observado el comportamiento nominal diario en cada configuración estudiando diversos factores como: la potencia, rendimiento, radiación... A continuación, se han cotejado las cuatro configuraciones. Para su realización se han tomado los días más característicos y se han elaborado una serie de graficas donde contrastar los datos.

Se puede afirmar que el reconcentrador, con un bajo nivel de radiación ( $550\text{W/m}^2$ ), obtiene unos resultados muy superiores a los del aro, aunque conforme la radiación aumenta estos se vuelven más parejos.

Respecto al efecto del desenfoque el reconcentrador obtiene un aumento en el rendimiento medio de un 5,5% respecto del aro. Además la suciedad del plato afecta a ambas configuraciones (aro y reconcentrador) por igual reduciendo la producción de energía eléctrica en un 120%.

Todos los datos llevan a la conclusión de instalar el reconcentrador, así como realizar algunas modificaciones para su mejora como por ejemplo: la construcción de un nuevo reconcentrador realizado de inconel para evitar los efectos dañinos de la temperatura sobre el sistema, y diseñar e implementar un sistema automático de limpieza del plato para aprovechar todo el potencial que los discos Stirling proporcionan.

# 1. Introducción

El objetivo de este proyecto es analizar como el uso de reconcentradores en discos Stirling puede suponer una mejora importante en su rendimiento. La misión del reconcentrador es conseguir redirigir hacia la cavidad donde se encuentra el receptor los rayos reflejados por la parábola del disco Stirling durante el tiempo que se encuentra parcialmente desfocalizado (spillage o desbordamiento).

Dicho estudio se ha realizado utilizando un disco Stirling Trinum propiedad de la Universidad de Zaragoza, y un reconcentrador diseñado por el grupo de investigación.

## 1.1. Situación actual de la energía en España

Es un hecho inherente que las energías renovables están creciendo a un ritmo importante en España. Actualmente, hay 105.302 MW de potencia instalada, de la cual 51.103 MW corresponde a energías renovables, es decir el 48,5% de toda la potencia. De esta, 6.968 MW corresponden a energía solar (1). Esto sugiere que es el momento idóneo de invertir en la investigación y en el desarrollo de los sistemas de producción que España tiene instalados.

Estos hechos han contribuido a la motivación para llevar a cabo este estudio, el cual puede aportar una mejora a un sistema bastante prometedor como es el Disco Stirling.

## 1.2. Energía solar

La energía solar se obtiene aprovechando la radiación que emite el sol hacia la tierra. La energía solar se puede dividir en dos grandes grupos:

- **Energía solar pasiva:** Consiste en aprovechar la energía del sol sin necesidad de un actuador intermedio. En la Fig. 1 se muestra un sistema muy utilizado.



Fig. 1 Despiece de un muro Trombe. (2)

- **Energía solar activa:** Su funcionamiento se fundamenta en transformar la energía del sol en otro tipo de energía, ya sea mecánica, eléctrica... mediante un equipo o actuador instalado. Esta se divide en dos grandes subgrupos:

- **Sistemas solares fotovoltaicos:** Utilizan la radiación solar generada por el sol para producir energía eléctrica, a través de un material semiconductor llamado célula fotovoltaica. En la Fig. 2 se muestra un equipo de este tipo.



Fig. 2 Panel solar modelo OPTITEC P245/H. (2)

- **Sistemas solares térmicos:** Emplean la radiación solar generada por el sol para producir energía térmica. Estos sistemas se pueden clasificar, dependiendo de la temperatura que alcancen los equipos, en tres categorías:
  - **Energía solar térmica de baja temperatura:** Son las instalaciones que adquieren temperaturas menores a 100°C. Su principal función es la producción de ACS (Agua Caliente Sanitaria). En la Fig. 3 se observa un equipo de colector de baja temperatura.



Fig. 3 Captador solar plano modelo T20PS. (3)

- **Energía solar térmica de media temperatura:** Son las instalaciones que alcanzan en su funcionamiento nominal temperaturas entre 100°C y 400°C. Su función básica es la producción de energía eléctrica. En la Fig. 4 se encuentra ilustrada una instalación de este tipo.



Fig. 4 Central termo-solar lineal Fresnel Puerto Errado 2 de 30 MW en Murcia. (5)

- **Energía solar térmica de alta temperatura:** Son instalaciones las cuales alcanzan temperaturas superiores a 400°C. Su función es la producción de energía eléctrica y, debido a sus altas temperaturas, se pueden emplear para el tratamiento térmico de materiales. En la Fig. 5 encontramos un dispositivo característico, el horno solar.



Fig. 5 Horno solar ubicado en Odeillo, en los Pirineos Orientales de Francia. (3)

Para incrementar la temperatura de funcionamiento de los diferentes sistemas comentados se utiliza la concentración de los rayos solares en un determinado foco.

Clasificando los sistemas solares térmicos según el tipo de concentración utilizado para su captación, se pueden distinguir los siguientes tipos:

1. **Concentración en línea:** Son equipos que enfocan la radiación a un receptor lineal (generalmente un tubo receptor). En las Fig. 4 y Fig. 6 se pueden ver dos ejemplos típicos de estos sistemas.



Fig. 6 Planta solar de captadores cilindro-parabólicos, Valle 1 y 2 situada en Cádiz, España. (6)

2. **Concentración en un punto:** Equipos basados en la redirección de la radiación solar hacia en un pequeño receptor. Los dos sistemas más importantes son :

- a) **Central Torre (con campo de heliostatos):** Tienen una concentración solar de unos 800 soles, alcanzan unas temperaturas de funcionamiento de 500°C y poseen un rendimiento de un 15 % aproximadamente (4). En la Fig. 7 se muestra una central de este tipo.



Fig. 7 Central Torre, Gemasolar, de 19,9 MW situada en Sevilla, España (8)

- b) **Disco Stirling:** Estos sistemas pueden llegar a alcanzar una concentración solar de unos 3000 soles, unas temperaturas nominales de 750°C y un rendimiento del 23% (4). En la Fig. 8 se contempla una instalación de este equipo.



Fig. 8 Instalación de discos Stirling en Arizona con una potencia de 1,5 MW. (9)

Una vez vista que es la energía solar, como se puede clasificar y que equipos se utilizan, no se puede pasar por alto que la utilización de equipos sin concentración, como pueden ser los captadores solares planos, puede ser útil en ciertas aplicaciones y momentos, pero su producción de energía es demasiado baja como para ser usados como fuente de energía eléctrica. Todo esto influye en que este estudio profundice en los sistemas de concentración en un punto, más concretamente en los discos Stirling, ya que aunque es el sistema menos desarrollado de todos, es el que más potencial tiene.

### 1.3. Disco Stirling

Los discos Stirling son sistemas que aprovechan la radiación solar, gracias a su concentrador parabólico, para la obtención de energía eléctrica. Su funcionamiento se basa en redireccionar la radiación solar mediante su disco parabólico, hacia un pequeño receptor, donde será concentrada toda su energía. Esta será transmitida a un motor Stirling, asociado a este receptor, y producirá la energía eléctrica buscada. Con este equipo se puede producir energía eléctrica del orden de kW, según el tipo y el modelo del disco que se disponga.

En la Fig. 9 se puede observar un esquema de un Disco Stirling con todos sus componentes, los cuales serán descritos a continuación.

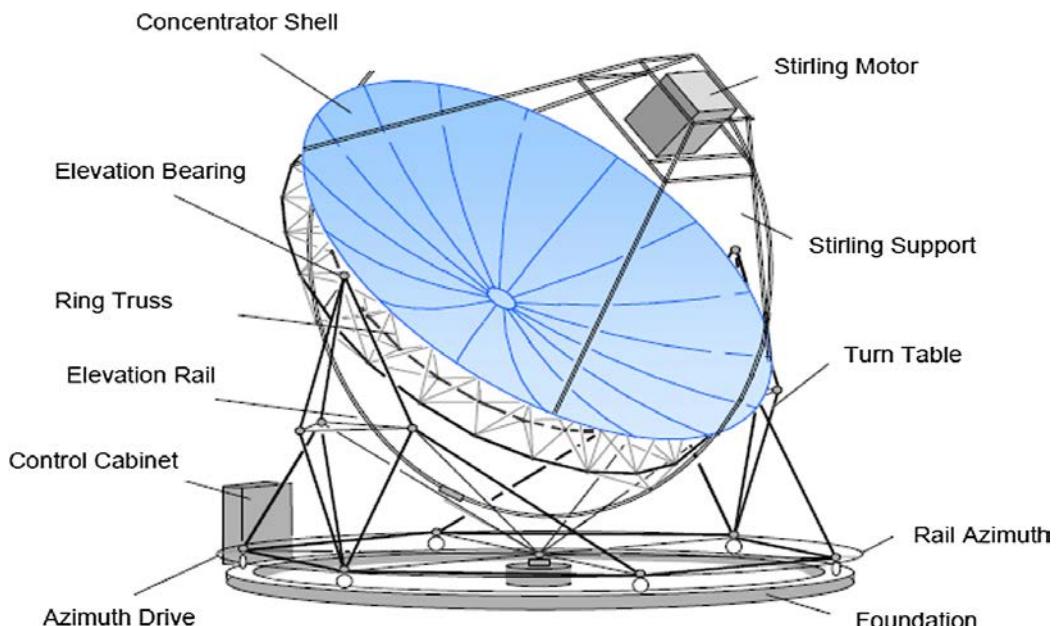


Fig. 9 Sistema EURODISH con una potencia nominal de 10kW. (5)

#### 1.3.1. Estructura de soporte

La estructura se encarga de soportar tanto al disco como al receptor. Está constituida por una celosía, que le proporciona cierta ligereza. (6) La Fig. 10 muestra una estructura propia de los discos Stirling.



Fig. 10 Estructura tubular de un disco Stirling de 10 kW. (7)

### 1.3.2. Concentrador parabólico

Se encarga de redireccionar los rayos hacia el receptor. Hay 3 tipos de discos dependiendo del tipo de construcción empleada y de sus materiales:

- Facetas de vidrio.
- Superficie parabólica.
- Membrana tensionada.

En las Fig. 11, Fig. 12 y Fig. 13 se exponen los diferentes tipos de concentradores



Fig. 11 Disco Stirling formado por facetas con forma parabólica. (8)



Fig. 12 Disco Stirling compuesto de pequeñas facetas de vidrio. (9)



Fig. 13 Distal II, construido con membrana tensionada. (10)

### 1.3.3. Motor Stirling

Un motor Stirling es un motor de combustión externa, lo que significa que el proceso de aporte de calor se realiza en la parte externa del motor, por lo que es perfecto para emplearlo en sistemas solares de concentración. Su funcionamiento se basa en la expansión del gas que se aloja en el interior del motor, mediante el calor proporcionado por la radiación solar en su foco caliente, lo que produce un movimiento en el pistón. Cuando el gas pierde su calor en el foco frío del motor, el pistón retrocederá generando un movimiento de vaivén, lo cual producirá electricidad gracias al alternador que tiene asociado en su eje. El gas que estos motores utilizan suelen ser para aplicaciones solares H<sub>2</sub> o He. Las Fig. 14 y Fig. 15 presentan un motor real y su esquema de funcionamiento.

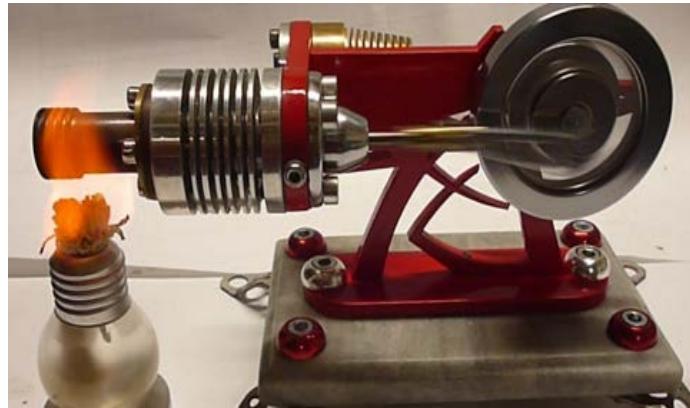


Fig. 14 Representación real del motor Stirling. (11)

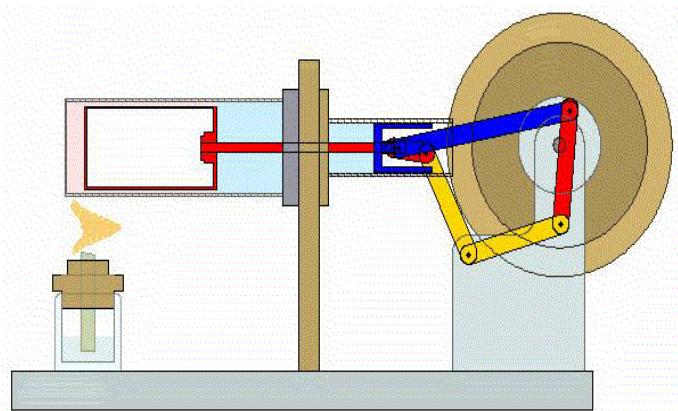


Fig. 15 Esquema de funcionamiento del motor Stirling mostrado en la Fig. 14. (12)

#### 1.3.4. Alternador

Es el encargado de generar corriente eléctrica a partir de campos magnéticos. En la Fig. 16 aparece un esquema de funcionamiento del alternador.

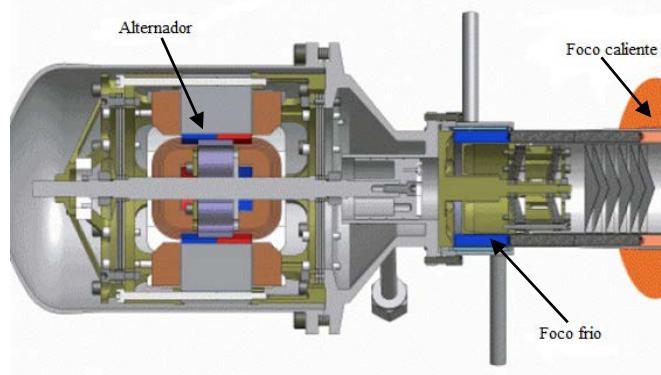


Fig. 16 Esquema del alternador asociado al motor Stirling. (13)

### 1.3.5. Sistema de control y seguimiento solar

La acción del motor se controla por medio de un sistema electrónico, que básicamente vigila la presión del gas de trabajo, en función de la radiación solar, de forma que la temperatura del receptor se mantenga constante y no alcance niveles que puedan llegar a ser peligrosos para la integridad del sistema. (6). Por otra parte, el sistema informático se encarga del seguimiento de la trayectoria solar para el posicionamiento del disco.

### 1.3.6. Conjunto Cavidad-Receptor

El conjunto cavidad-receptor del Disco Stirling es el encargado de recoger toda la radiación focalizada por el concentrador. Éste está formado por una cavidad, por la que se introduce la radiación y un receptor que transforma la radiación solar en energía térmica. Los receptores se pueden clasificar en tres tipos:

- **Receptores directamente iluminados:** Son receptores en los que incide la radiación solar sobre elementos, generalmente en forma de haz de tubos, los cuales tienen en su interior el gas del ciclo Stirling.
- **Head-pipe:** Son receptores que poseen en su interior un fluido, que puede ser sodio, potasio y cesio (14) que cambian de fase durante el proceso de captación. Su funcionamiento se fundamenta en que el fluido absorba la radiación solar, se evapore y ceda su energía al motor. Una vez cedida su energía, el gas se condensa y volverá al receptor por efecto de la gravedad. Es importante tener en cuenta el material del receptor porque es el que limita la temperatura del gas (4). Se puede encontrar en la Fig. 17 un esquema de este receptor.

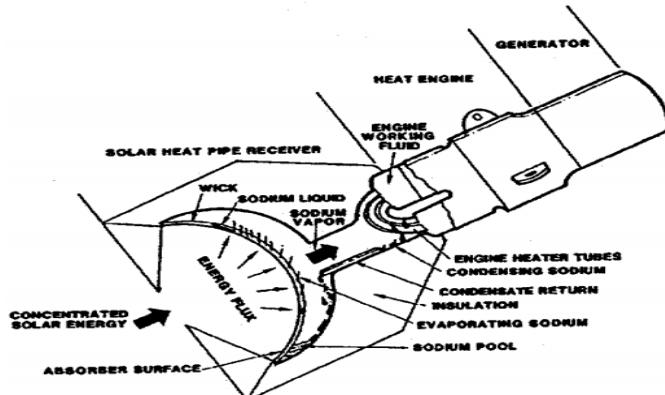


Fig. 17 Esquema de un receptor head pipe asociado a un motor Stirling. (15)

Un subgrupo de estos receptores son los **Receptores head-pipe híbridos**. Son receptores head pipe a los cuales se les han asociado un circuito en paralelo que funciona a partir de la combustión de fuel, haciendo que si no hay radiación solar, o esta es pequeña, pueda seguir en régimen nominal mediante un aporte de calor al receptor (16). Con estos sistemas se ha podido observar que la eficiencia eléctrica es la misma que en los receptores head-pipe, pero además cuentan con

una eficiencia térmica entre 68%-75% (17). En la Fig. 18 se observa el receptor y su esquema de funcionamiento.

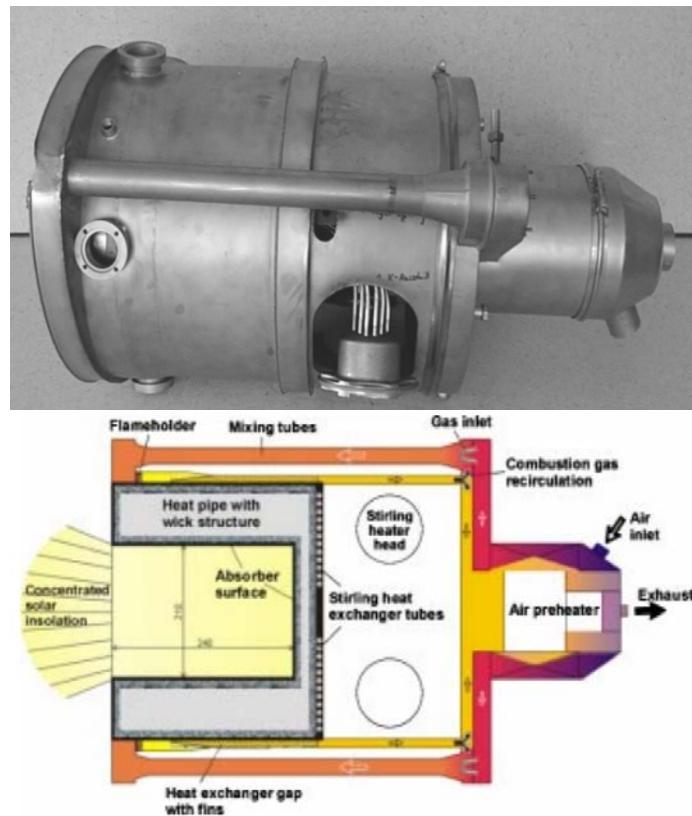


Fig. 18 Esquema e imagen real de un receptor híbrido Head-pipe. (18)

- **Receptor volumétrico:** Es un sistema constituido por una ventana de cuarzo que es atravesada por la radiación solar. En el interior se encuentra un fluido, normalmente aire que alimenta a una turbina de gas. Si el aire no tiene suficiente energía podría acoplarse un sistema de combustión para calentarlo. Este sistema es usado por su bajo coste y su fácil hibridación. La eficiencia de estas turbinas se encuentra entre un 27-30% por lo que es menor que la de los motores Stirling (4). En la Fig. 19 se muestra un esquema de este sistema.

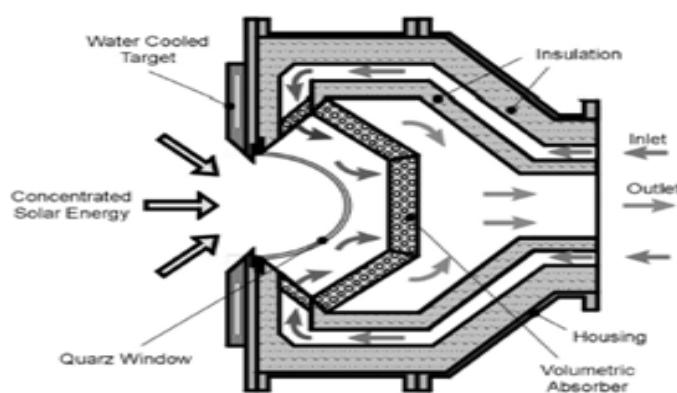


Fig. 19 Esquema de un receptor volumétrico. (4)

### 1.3.7. Reconcentradores

Los receptores habitualmente se encuentran en el interior de cavidades que los protegen de las pérdidas externas. Para incrementar la radiación incidente en los receptores, a las cavidades se les puede incorporar un elemento que es el reconcentrador de rayos con el objetivo de intentar reducir las pérdidas por spillage o desbordamiento, causadas por desenfoque parcial del sistema de captación.

Un estudio realizado en el 2016 por Ahmed M. Daabo (19) muestra la influencia que tiene la geometría del reconcentrador en el rendimiento del Disco Stirling. Para ello, se ha estudiado como varía la eficiencia óptica en tres tipos de geometrías: cilíndrico, parabólico y esférico. La Fig. 20 muestra los reconcentradores.

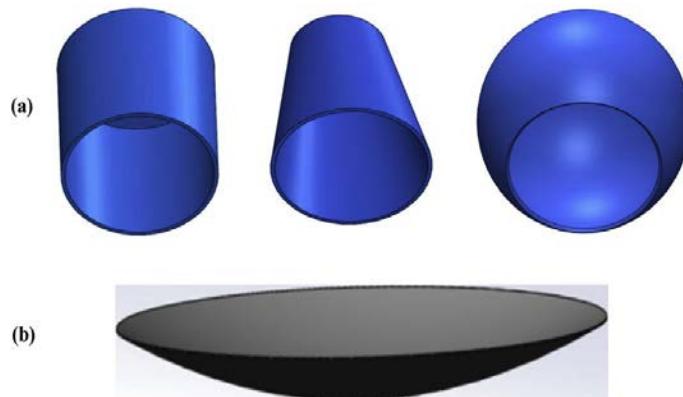


Fig. 20 Los tres tipos de reconcentradores y el plato del disco Stirling. (19)

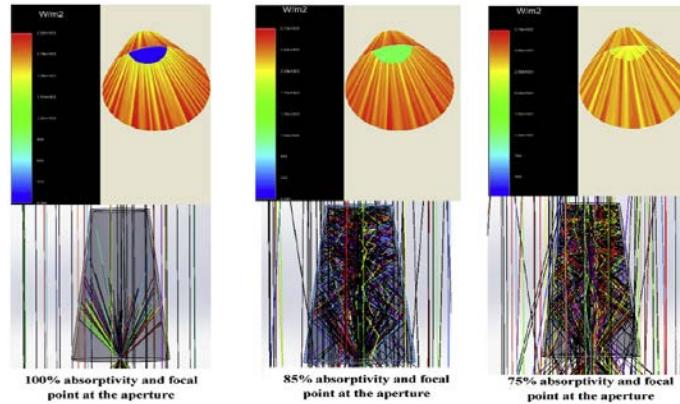
Los datos que se han tomado son mostrados en la Fig. 21

Parameter	Parabolic concentrator	Cylindrical	Conical	Spherical
ED (m)	1	0.20	0.20	0.20
T (m)	0.01	0.005	0.005	0.005
H (m)	0.1041	0.2499	0.3543	0.218

Fig. 21 Datos iniciales de cada uno de los reconcentradores. (19)

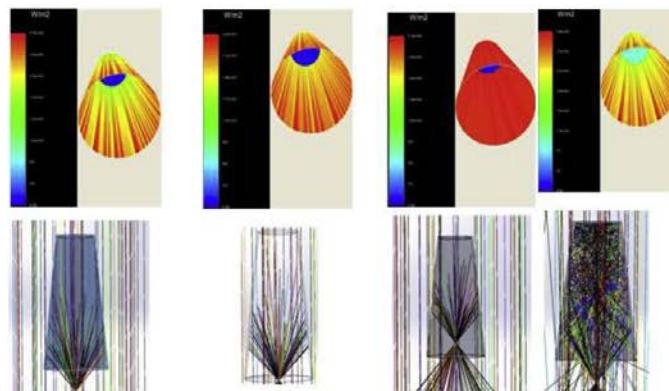
Donde ED es el diámetro externo, T es el espesor y H es la altura.

Inicialmente, para las tres geometrías, se estudia a partir de una serie de simulaciones, cómo afecta la absorvidad de la superficie a la pérdida del flujo, y a su vez, como afecta la geometría a todo ello. Se observa que para una absorvidad del 100% la forma del reconcentrador no afecta, pero para una absorvidad del 85% y 75% la geometría esférica es el que más pérdidas obtiene. En la Fig. 22 se expone la simulación realizada para el reconcentrador cónico.



*Fig. 22 Efecto de la absorbitividad de las paredes y distribución del flujo para la forma cónica. (19)*

Estudiando el efecto de la posición del receptor, respecto al punto donde todos los rayos se cruzan, Daabo advierte que para la geometría esférica se obtiene la peor distribución de los rayos, independientemente de la absorbitividad, y para la geometría cónica la mejor. En la Fig. 23 tenemos la simulación realizada para la geometría cónica.



*Fig. 23 El efecto de la posición del receptor y la distribución del flujo. (19)*

En la Fig. 24 se muestra el efecto que tiene la forma del receptor sobre la energía absorbida y la eficiencia óptica.

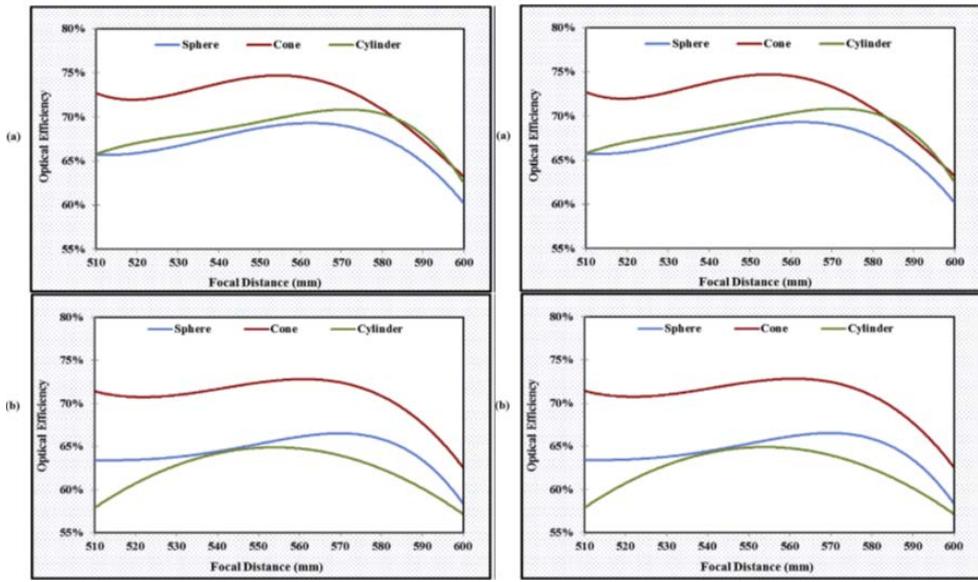


Fig. 24 Energía absorbida y eficiencia optima por los diferentes reconcentradores. (19)

Como conclusión, las simulaciones realizadas por Daabo señalan una mejora del rendimiento del sistema solar al incorporar un reconcentrador con una geometría tronco conoidal.

Esta simulación y otras investigaciones realizadas han sido los primeros pasos. Lo que se quiere realizar y exponer con este estudio es, si construyendo y ensayando un reconcentrador, que no es más que un componente que se inserta en la cavidad de receptor y hace que varíe su geometría, podremos obtener los mismos resultados que en las simulaciones.

## 2. Estado del arte de los discos Stirling

En esta sección se va a hacer un pequeño recorrido por la historia de estos equipos, y se van a destacar los sistemas más importantes que se han desarrollado hasta la actualidad.

- **SUNDISH:** Su desarrollo comenzó en 1993 a manos de SAIC y STM. Este proyecto fue dividido en cuatro fases (4).
  - Fase 1: Se realizaron una serie de pruebas a los componentes y se diseñó un primer prototipo (1<sup>a</sup> generación). Fue realizada entre 1993 y 1995.
  - Fase 2: Se diseñaron cuatro sistemas de la segunda generación, entre 1995 y 1999, los cuales contaban con las siguientes características (20):
    - Protectores para mantener limpias las lentes.
    - Estabilizadores para reducir la carga del viento.
    - Aumento del área del espejo.
    - Una actualización del sistema de seguimiento.
    - Un sistema híbrido.
  - Fase 3: Se construyó un disco Stirling de 1MW en Nevada, en 1999.
  - Fase 4: Finalmente en septiembre de 1999, se fabricó un sistema el cual usaba energía solar por el día y gas por la noche, es decir, un Disco Stirling híbrido.

El equipo ilustrado en la Fig. 25 corresponde a la segunda fase del proyecto, el cual ya no está en funcionamiento. El resto de los datos técnicos de este equipo, y del resto de equipos a describir, se ubican en la Tabla 1. Adicionalmente, en la Fig. 26 se puede encontrar la curva característica del sistema.



Fig. 25 Sistema SAIC, fabricado por la compañía Salt River Project cerca Phoenix, Arizona (4)

<b>Modelo</b>	<b>Sundish</b>	<b>Eurodish</b>	<b>SES</b>	<b>WGA</b>	<b>Trinium</b>
<i>Tipo</i>	Aproximado	Parabólico	Aproximado	Parabólico	Parabólico
<i>Nº Facetas</i>	16	12	82	32	11
<i>Área disco bruto(m<sup>2</sup>)</i>	117,2	60	91	42,9	11,23
<i>Área de captación (m<sup>2</sup>)</i>	113,5	56,7	87,7	41,2	9,58
<i>Reflexividad</i>	95%	94%	91%	94%	
<i>Altura (m)</i>	15	10,1	11,9	8,8	4,3
<i>Anchura (m)</i>	14,8	10,4	11,3	8,8	5
<i>Peso (Tm)</i>	8,17	3,98	6,76	2,86	6
<i>Control</i>	Lazo Abierto/cerrado	Lazo abierto	Lazo abierto	Lazo Abierto/cerrado	
<i>Longitud focal (m)</i>	12	4,5	7,45	5,45	
<i>Factor de intercepción</i>	0,9	0,93	0,97	0,99+	
<i>Soles equivalentes</i>	2500	12730	7500	>11000	
<i>Apertura del receptor (cm)</i>	38	15	20	14	19,8
<i>Motor</i>	STM 4-120 con doble acción cinética	SOLO 161 Cinético	Kockums/SES 4-95	SOLO 161 Cinético	Infinia
<i>Nº Cilindros</i>	4	2	4	2	1
<i>Cilindrada (cc)</i>	480	160	380	160	
<i>Velocidad (rpm)</i>	2200	1500	1800	1800	
<i>Fluido</i>	Hidrogeno	Helio	Hidrogeno	Hidrogeno	Gas
<i>Control de potencia</i>	Carrera variable	Presión variable	Presión variable	Presión variable	Presión variable
<i>Generador (V)</i>	480	480	480	480	230
<i>Nº de sistemas construidos</i>	5	11	5	1	
<i>Nº horas solares reales</i>	6360	40000	25050	4000	
<i>Potencia Eléctrica nominal (kW)</i>	22	10	25	9,5	1
<i>Potencia térmica nominal (kW)</i>	0	0	0	0	3
<i>Eficiencia Eléctrica máxima</i>	20%	19% <sup>1</sup>	29,40%	24,50%	
<i>Eficiencia Eléctrica media</i>	14,50%	15,70%	24,60%	18,90%	13,80%

<sup>1</sup>La eficiencia máxima en este equipo ha sido calculada con 800 W/m2. En el resto de los equipos se calculó con 1000 W/m2.

Tabla 1 Tabla de datos técnicos de los diferentes modelos. (4) (28)

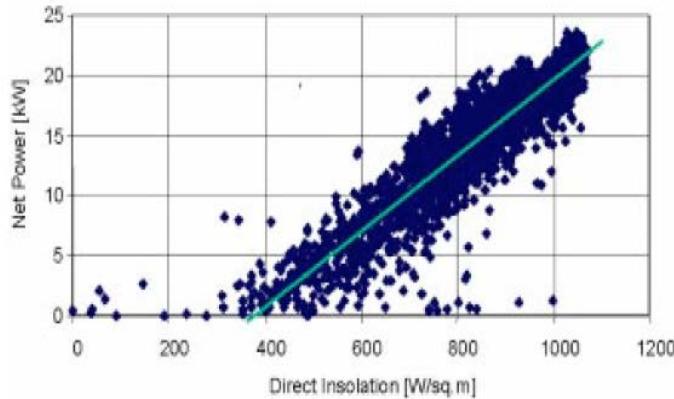


Fig. 26 Curva característica, del sistema SunDish, radiación directa frente a potencia. (4)

- **EURODISH:** Este es un proyecto comenzó en el 2001 y fue realizado con la colaboración de varios países de la U.E. entre los que se encuentra España (4). Anteriormente, se realizaron dos proyectos que fueron los antecesores de este sistema, el Distal I/II. Estos sistemas tenían un precio muy elevado por el uso de la tecnología de membrana tensionada, lo cual llevo al desarrollo de este modelo, que buscaba reducir el coste con el propósito de hacerlo más comercial (10). El Eurodish sustituyo la membrana tensionada por una fina capa de fibra de vidrio retenida por un anillo, haciendo que el precio fuera mucho más competitivo al emplear una tecnología más sencilla (21). La curva característica de este modelo es mostrada en la Fig. 29.

En las Fig. 27 y Fig. 28 podemos encontrar un ejemplo del Eurodish y su motor SOLO-161.

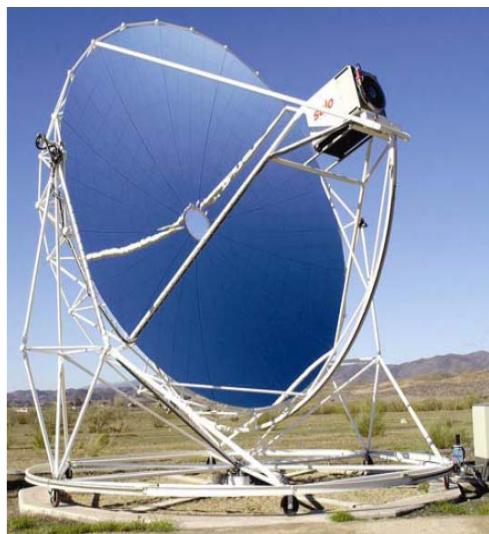


Fig. 27 Eurodish de 10kW, situado en la Plataforma Solar de Almería. (21)



Fig. 28 Motor, del sistema eurodish, modelo SOLO 161 y su receptor. (4)

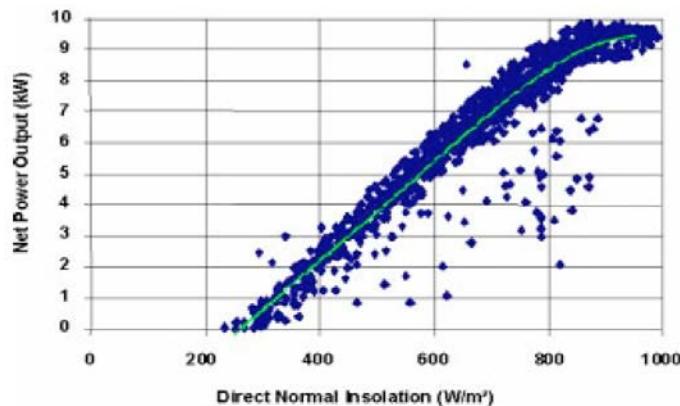


Fig. 29 Curva característica del modelo Euroditch. (4)

- **Stirling Energy System (SES):** Fueron creados por la empresa SES con la misma necesidad que el modelo anterior, implementar una disminución en su precio de venta. Estos sistemas se desarrollaron en 2002 con varios años de estudio previo.

Las características de este sistema son:

- Diseño equilibrado entre el peso de los espejos y el receptor.
- Mejora en el mantenimiento a partir de una ranura en el plato.
- Fácil fabricación al estar dividido en pequeños módulos.
- Compuesto por un gran número de pequeñas facetas unidas entre sí, de fácil fabricación.
- Más barato por el tipo de facetas.

Se adjunta en las Fig. 30 y Fig. 31 la curva característica y una ilustración del equipo.



Fig. 30 Sistemas SES localizados en Huntington Beach, California. (4).

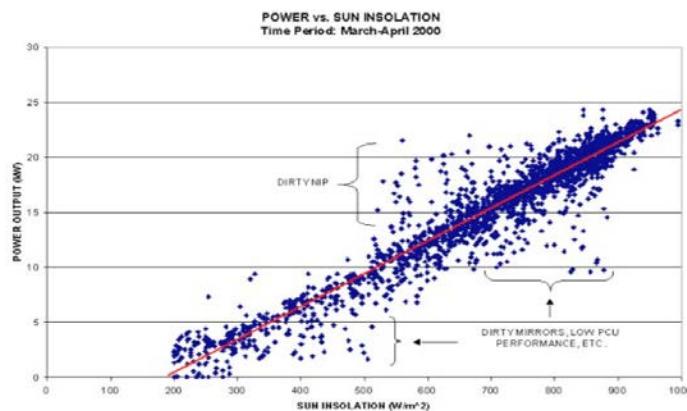


Fig. 31 Curva característica del sistema SES. Radiación directa frente a potencia. (4)

- **ADVANCED DISH DEVELOPMENT SYSTEM (ADDS):** Fue desarrollado por Cummins Dish-Stirling y Joint Venture los cuales se centraron en mejorar la fiabilidad del equipo, mejoras estructurales, mejoras en los sistemas de control... Las características de este sistema son:

- Nivel de mantenimiento bajo.
- Mejora del control para hacerlo más independiente.
- Reducción del coste del equipo.
- Incorporación de facetas de vidrio/metal estructurales.
- Consta de facetas en forma parabólica las cuales aporta más fiabilidad.

En las Fig. 32 y Fig. 33 se descubre un equipo y su curva característica.



Fig. 32 Sistema ADD propiedad de la empresa Sandia. (4)

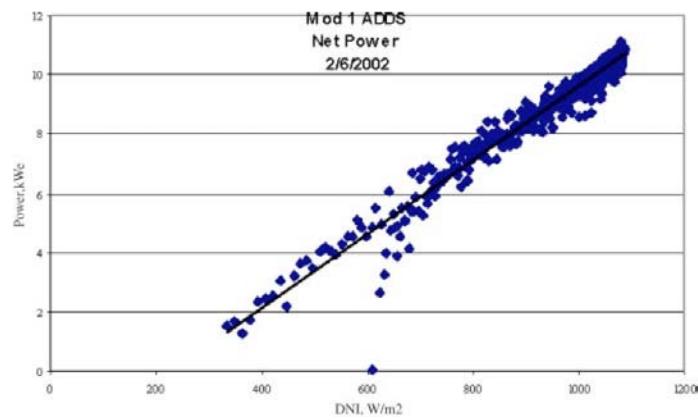


Fig. 33 Curva característica del sistema ADD. (4)

- **SUNCATCHER**: En el año 2008, Stirling Energy Systems Solar Two comenzó un proyecto que constaría de 60 equipos, denominados SunCatcher y una potencia de 750 MW (22). Estos equipos se caracterizan por:

- El motor utiliza hidrógeno.
- Mejora óptica frente a sus predecesores.
- Más ligero.
- Las facetas están fabricadas a partir de estampación de chapa metálica (23).

Este proyecto terminó su construcción en 2010 tal y como se representa en la Fig. 34 .



Fig. 34 Sistema SUNCATCHER situado en Albuquerque, Nuevo México. (25)

- **TRINUM:** La empresa Innova comenzó en 2005 el desarrollo y la investigación sobre este modelo (26). Tras 5 años, saco al mercado el modelo Trinium que cuenta con una serie de características como:

- Se trata de un modelo con cogeneración, que produce al mismo tiempo 1 kW de energía eléctrica y 3kW de energía térmica.
- Es 100% recicitable.
- Tiene un sistema de control que le permite protegerse en condiciones meteorológicas desfavorables.
- Para una misma potencia instalada, este modelo general un 40% más que un panel fotovoltaico.

En la Fig. 35 se encuentra este modelo, el cual será usado para este estudio.

### 3. Descripción y características del sistema analizado

El estudio se va centrar sobre el disco Stirling, modelo Trinium, el cual se encuentra localizado en el campus Rio Ebro. Las características concretas proporcionadas por el fabricante de este equipo se encuentran recogidas en la Tabla 2.



Fig. 35 Disco Stirling, modelo Trinium instalado.



Fig. 36 Detalle del disco parabólico y el receptor.

Para este estudio se han construido un aro y un reconcentrador específicos para el receptor ilustrado en la Fig. 36. Para el diseño de este reconcentrador se hizo una simulación previa tal y como se contempla en la Fig. 37.

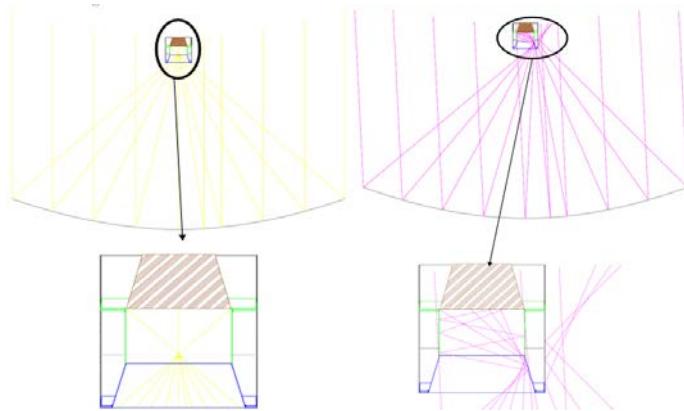


Fig. 37 Estudio de la trayectoria de los rayos solares.

Una vez realizado dicho estudio, el reconcentrador fue construido con las características recogidas en la Fig. 46. La construcción del aro se realizó posteriormente a partir de los planos de la Fig. 47. El resultado obtenido es presentado en las Fig. 38 y Fig. 39.



Fig. 38 Aro del receptor.



Fig. 39 Reconcentrador situado en el receptor.

## 4. Metodología

En este apartado se va a proceder a explicar el estudio llevado a cabo y a analizar los resultados obtenidos.

Para el estudio se ha realizado la toma de datos en cuatro periodos de tiempo, entre los meses de febrero y abril de 2017. El procedimiento llevado acabo ha sido el siguiente:

- El primer paso fue la calibración y comprobación del equipo.
- Posteriormente, se procedió a la primera toma de datos que se realizó entre el 22-2-2017 y el 7-3-2017, con el montaje del aro como se aprecia en la Fig. 40. En esta primera toma de datos las condiciones del disco fueron, un pequeño desenfoque y suciedad acumulada en el plato parabólico.  
Denominación: *Configuración 1 Aro desenfocado*.
- La segunda toma de datos se realizó entre el 7-3-2017 y el 20-3-2017. Se procedió al retiró del aro y se colocó el reconcentrador tal y como se observa en la Fig. 41, en las mismas condiciones que en la primera recogida de datos.  
Denominación: *Configuración 2 Concentrador desenfocado*.
- La tercera toma de datos se realizó entre el 20-3-2017 y el 6-4-2017. En esta ocasión se realizó una limpieza del plato del disco y se enfocó, manteniendo el reconcentrador.  
Denominación: *Configuración 3 Concentrador enfocado*.
- La última toma de datos se realizó entre el 6-4-2017 y el 19-4-2017. Se volvió a limpiar el plato del disco, se comprobó que estuviera enfocado y se sustituyó el reconcentrador por el aro.  
Denominación: *Configuración 4 Aro enfocado*.

Durante este estudio, se han tomado una serie de datos, recogidos en la Tabla 3, así como los equipos utilizados.

Al finalizar la última toma de datos, se procedió a la extracción de todos los datos de los equipos de medida. Al ser un estudio experimental, en condiciones reales, hubo que realizar un tratamiento de los datos para evitar falseamientos dados por los equipos de medida. Una vez realizado este tratamiento se ha procedido al análisis de los datos.

Aunque el objetivo de este estudio es investigar si el uso de reconcentradores en discos Stirling puede suponer una mejora en su rendimiento, con todos los datos obtenidos se ha querido realizar una serie de comparaciones y comprobaciones adicionales que se revelaran en los próximos apartados.

Características	Unidades	Valores
DIMENSIONES		
Diámetro del reflector	mm	3750
Altura en posición de seguridad	mm	3000
Volumen máximo en maniobra	mm	D 5000 x H 4600
Superficie captante bruta	m <sup>2</sup>	11,23
Superficie captante neta	m <sup>2</sup>	9,58
Peso sin fluido	kg	600
Velocidad máxima del viento en funcionamiento	Km/h	50
Velocidad máxima del viento en posición de seguridad	Km/h	150
Temperatura mínima	°C	-10
Ruido	dbA	60
POTENCIA		
Potencia eléctrica	kW	1
Potencia térmica	kW	3
Producción de agua caliente sanitaria a T=30°C	l/h	80
Producción de agua caliente sanitaria a T=40°C	l/h	70
Producción de agua caliente sanitaria a T=50°C	l/h	60
Potencia eléctrica con DNI = 750 W/m <sup>2</sup>	kW	1
Potencia eléctrica con DNI = 650 W/m <sup>2</sup>	kW	0,65
Potencia eléctrica con DNI = 600 W/m <sup>2</sup>	kW	0,3
ALIMENTACIÓN		
Potencia eléctrica máxima	W	400
Alimentación		230V – 50Hz(+/- 0,5Hz)
Circuito sanitario		
Conexiones de agua	pulgadas	3/4
Vaso expansor	l	5
Temperatura de control(min/max)	°C	6/60
Fluido refrigerante		Agua /Agua + glicol (max 30%)
Caudal(min/max)	l/min	7/19
Presión máxima	Bar	6

Tabla 2 Datos característicos del disco Stirling, modelo Trinium. (28)

Equipo	Parámetros medidos						
Disco Stirling	Fecha	Hora	Energía acumulada	Velocidad de viento	Temperatura SetPoint motor	Temperatura del motor	Límite de temperatura
	Temperatura de entrada del refrigerante	Temperatura de salida del refrigerante	Caudal refrigerante	Temperatura ambiente	Temperatura boiler	Voltaje	Intensidad
	Potencia	Frecuencia	Angulo	Código de error	Azimut	Elevación	
WeatherLink	Radiación Global						
MacSolar	Radiación Directa						

Tabla 3 Equipos y parámetros medidos.



Fig. 40 Aro montado en el receptor.



Fig. 41 Montaje del reconcentrador en el receptor.

## 4.1. Funcionamiento nominal del disco Stirling

Los cuatro modos de funcionamiento analizados muestran comportamientos diferentes del disco. Para mostrarlo se han seleccionado 4 días típicos, uno con cada configuración, y se han representado las variables más representativas.

### - Configuración 1: Aro desenfocado

En este experimento, la mancha solar no incide completamente sobre el receptor durante todo el periodo de captación solar, existe un pequeño spillage o desbordamiento. En la Fig. 42 puede verse los efectos producidos en el aro debido al desenfoque y el impacto solar sobre la periferia. Un caso extremo, con fundición del material se muestra en la Fig. 43.

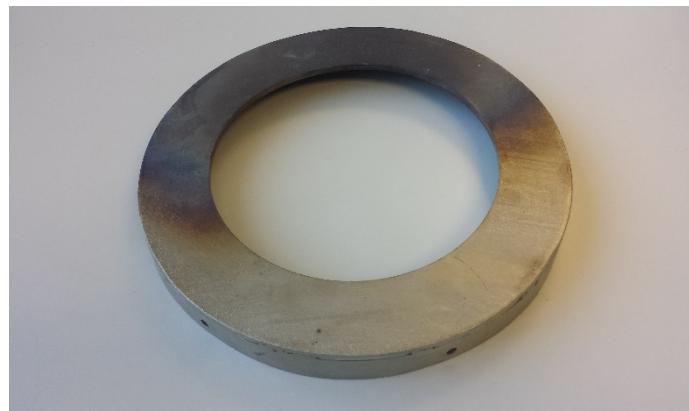


Fig. 42 Aro deformado por el desenfoque del disco



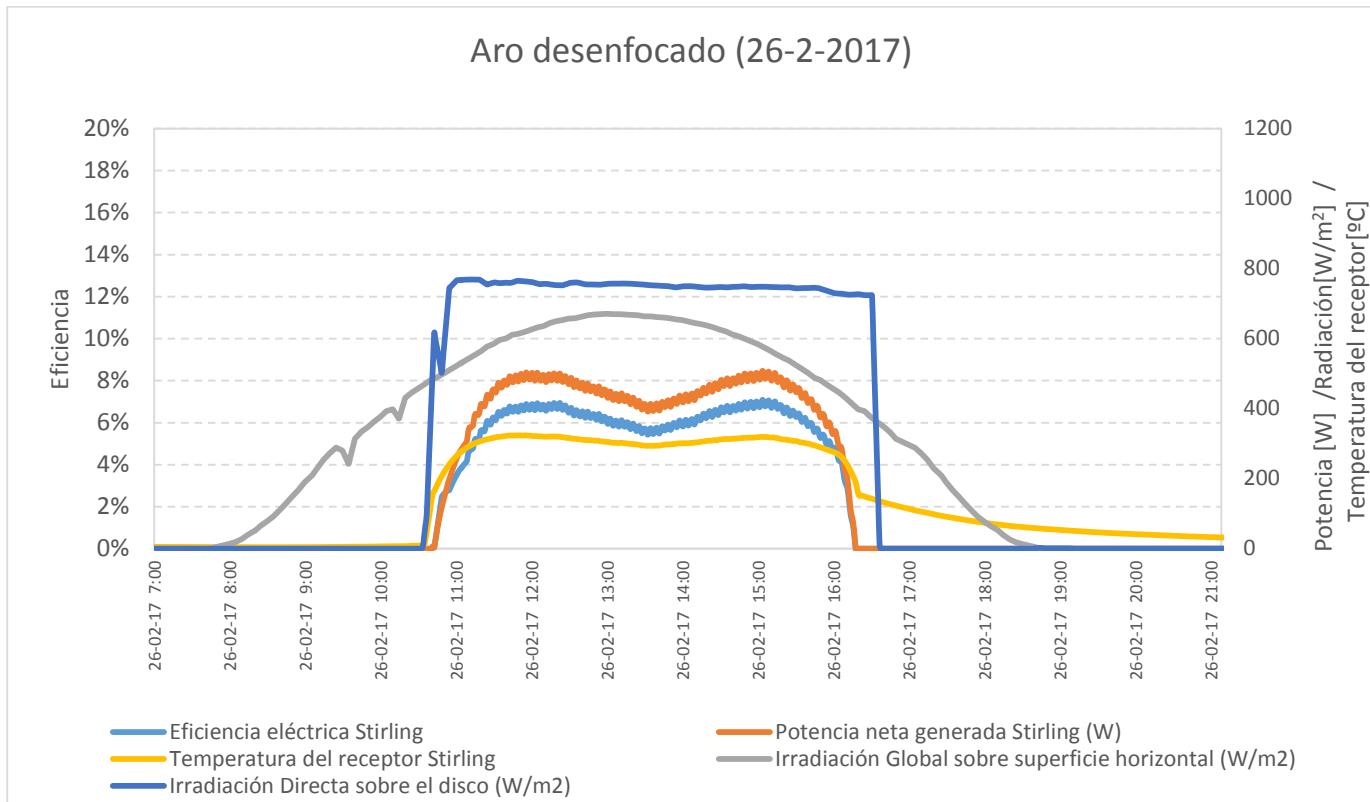
Fig. 43 Aro dañado por desenfoque del disco

La Gráfica 1 representa un día típico de funcionamiento del disco sin reconcentrador (sólo el aro plano), en concreto el 26 de febrero de 2017. Se trata de un día despejado, con niveles de radiación sobre superficie horizontal que llegan a  $660 \text{ W/m}^2$ , siendo la irradiación directa sobre la superficie de abertura del disco prácticamente constante y de

valor en torno a  $750 \text{ W/m}^2$ . Esta homogeneidad es debida al seguimiento a dos ejes que realiza el disco.

El efecto de spillage se ve claramente por la forma en V que tiene la gráfica de la potencia neta generada, con un mínimo relativo en los momentos de máximo desbordamiento. Pasa la producción de energía de 500 W a 390 W (un 28% de disminución).

El efecto del ensuciamiento de la superficie reflectora se detecta en la baja temperatura que alcanza en funcionamiento el receptor, estabilizada entorno a los  $320^\circ\text{C}$ , lo que conlleva a una importante disminución del rendimiento en la producción eléctrica que se queda en valores del 6%



Gráfica 1 Ilustración de las características más notorias del sistema con la configuración de aro desenfocado a lo largo del día.

### - Configuración 2: Concentrador desenfocado

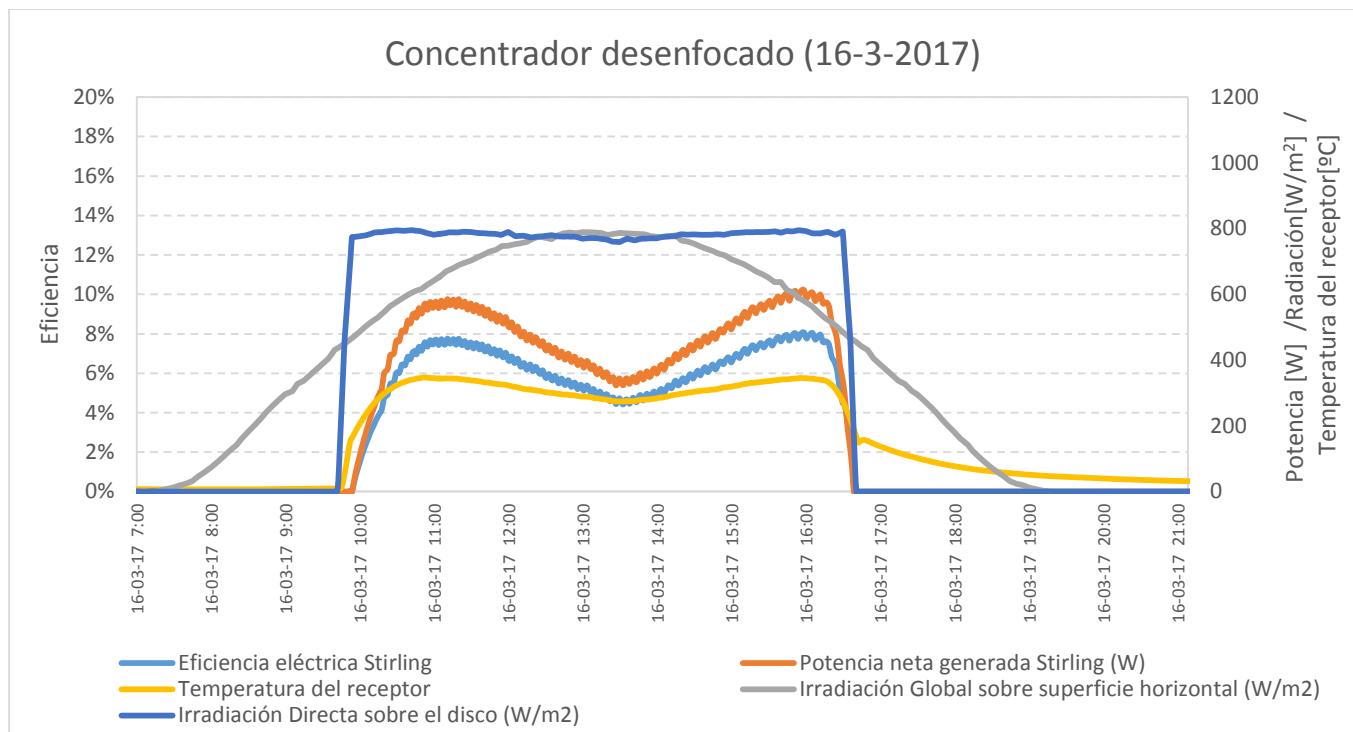
La Gráfica 2, muestra el comportamiento del día 16 de marzo de 2017. Como en el caso de la Configuración 1 muestra un descenso de la potencia (de 580W a 330W) y eficiencia en las horas centrales del día, coincidentes con la desviación del seguidor solar. Debido al desenfoque de disco, la mancha solar no está alineada perfectamente con la cavidad del receptor por lo que la radiación no es aprovechada 100% por el motor y eso hace que el rendimiento del equipo tenga máximos cercanos al 8%. Con estos valores se ve que el sistema no trabaja en condiciones nominales (por el efecto del ensuciamiento), pero sí que se percibe una mejora en la eficiencia debido al efecto del

reconcentrador. Para justificarlo se ha obtenido la media de la eficiencia en ambas configuraciones. La configuración 1 logra una eficiencia promedio de 5,78% mientras que en la configuración 2 es de 6,1%, lo cual demuestra que el concentrador tiene un funcionamiento más óptimo que el aro.

El efecto de la mancha solar sobre el reconcentrador se expone en la Fig. 44 donde se percibe una zona más oscura y deformada que es donde ha incidido más la radiación.

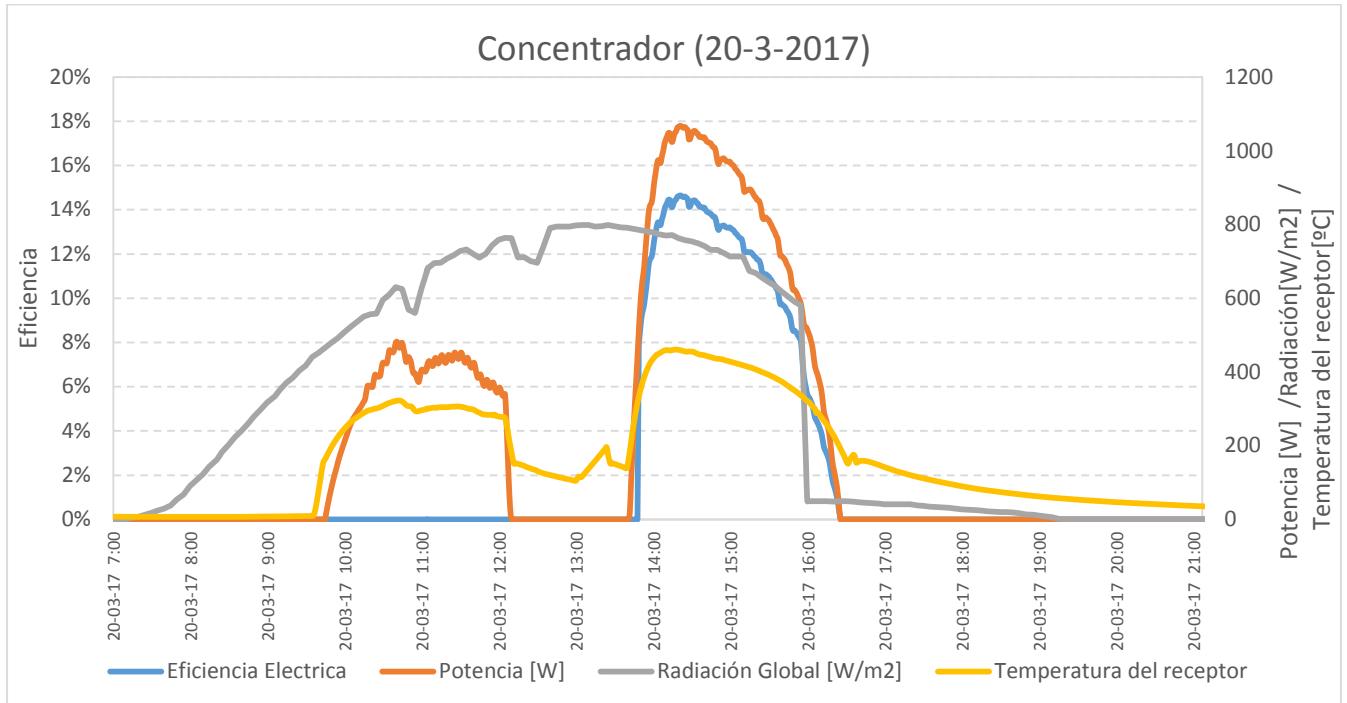


Fig. 44 Reconcentrador después de la prueba de desenfoque.



Gráfica 2 Representación de los parámetros del disco a lo largo de un día de trabajo para la configuración de reconcentrador desenfocado.

Tras el periodo de experimentación de la configuración 2, se procedió al enfoque y la limpieza del disco. En la Gráfica 3 se ilustra como al principio de la mañana el disco tiene un funcionamiento similar al del día ya analizado, pero a la 1pm, cuando se realiza la limpieza y se vuelve a posicionar se observa como el valor de la potencia pasa de los 500W logrados por la mañana a casi los 1100W. Este hecho hace imperiosa la necesidad de que estos sistemas estén en perfectas condiciones de higiene, ya que en este caso se ha logrado una mejora de hasta un 120%.

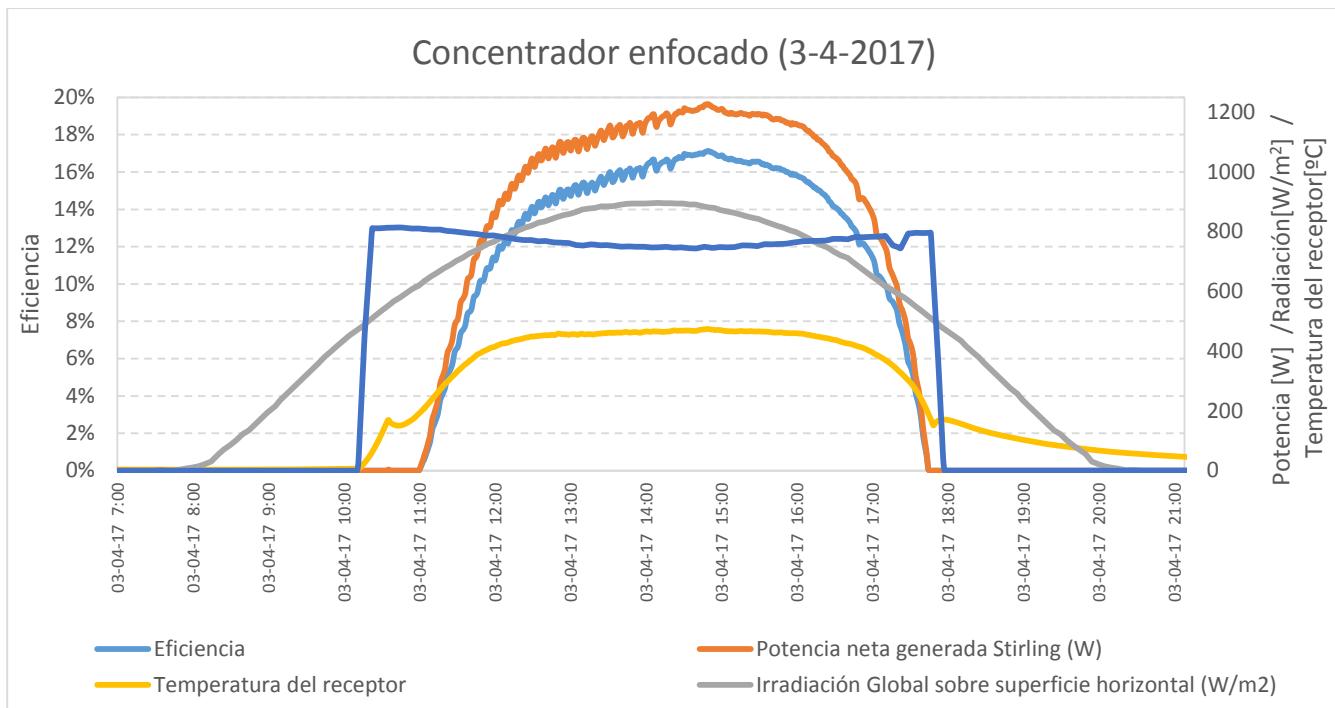


Gráfica 3 Efecto de la limpieza del disco Stirling.

#### - Configuración 3: Concentrador enfocado

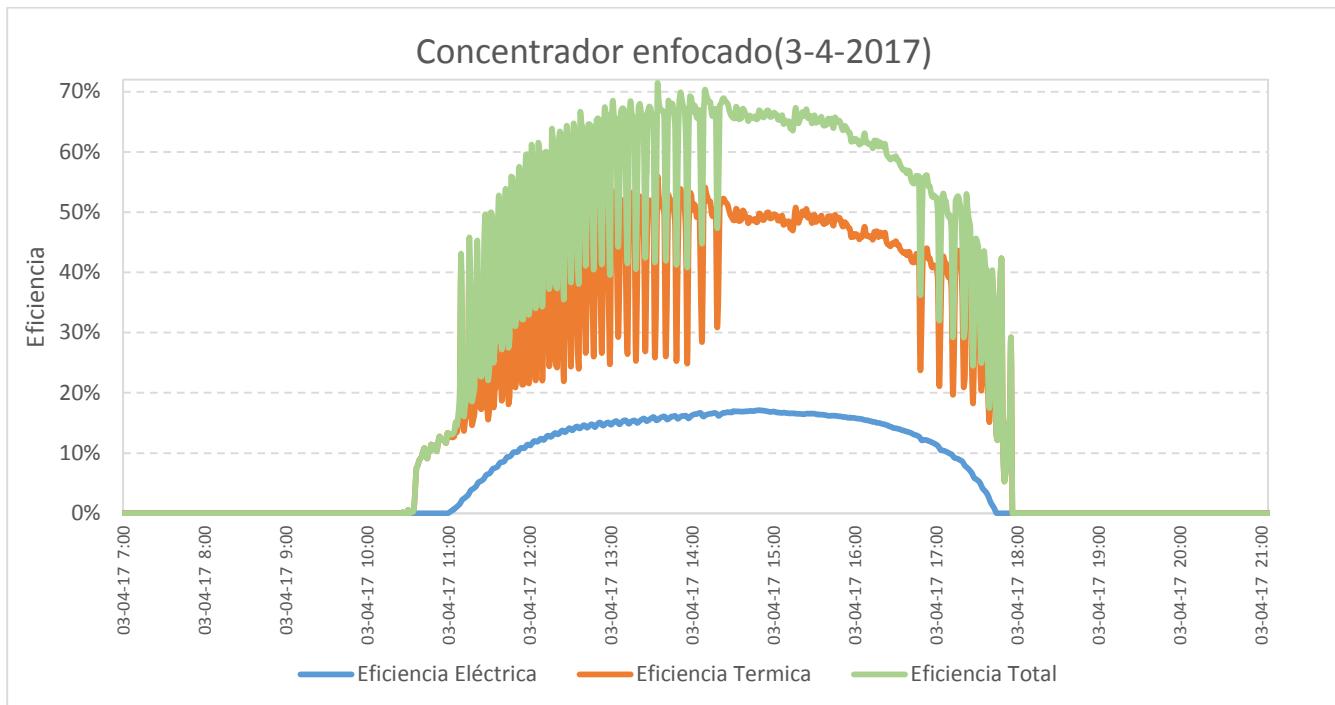
En este experimento las condiciones iniciales se modifican, básicamente se limpia la superficie reflectante y se vuelve a focalizar el sistema a las 12 TSV.

En la Gráfica 4, se observa el comportamiento del día 3 de abril. Se comprueba que es un día sin nubes debido a que la radiación global forma una curva prácticamente perfecta. Por el hecho de la realización de la limpieza se logra una subida importante de la potencia, llegando a valores de 1200W y con una eficiencia máxima de alrededor del 17%. Se debe indicar que esta configuración no tiene el efecto de spillage, observado en las configuraciones 1 y 2, con lo que se puede asegurar que el desenfoque es despreciable o nulo.



Gráfica 4 Seguimiento horario del trabajo realizado por el disco con la configuración del reconcentrador enfocado.

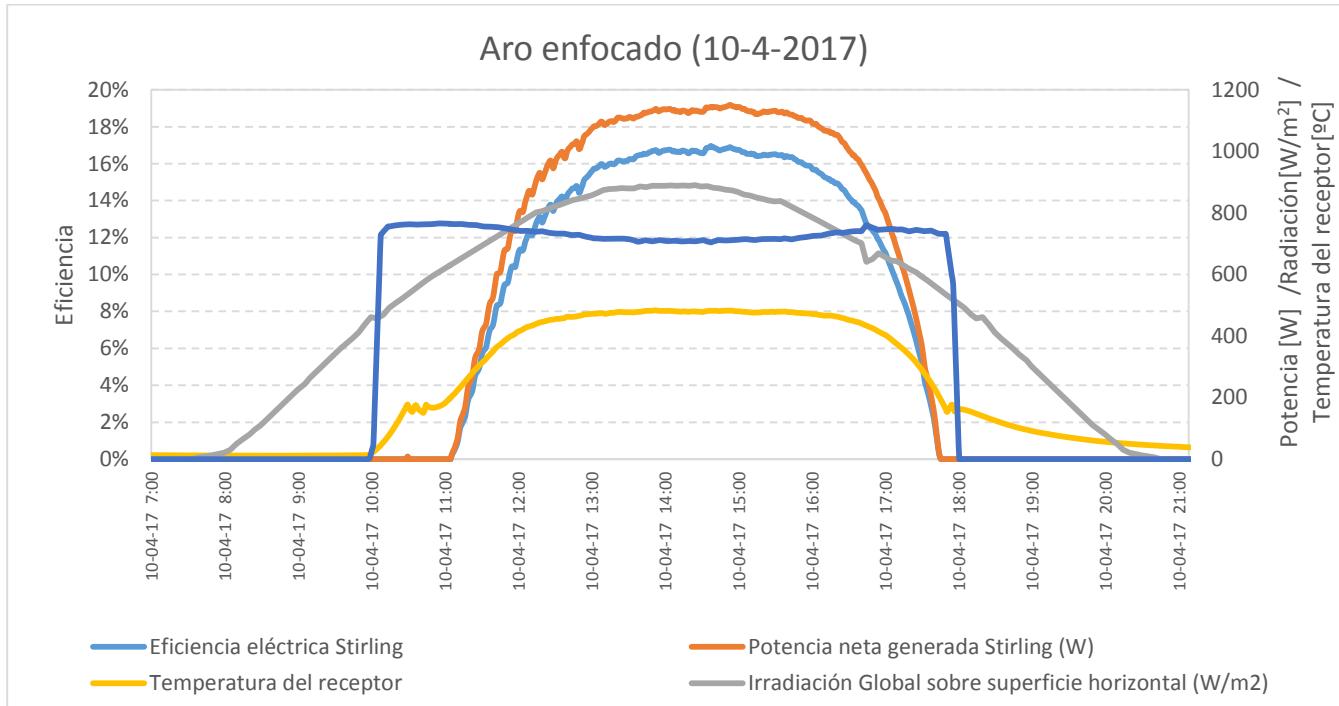
Adicionalmente se analiza el comportamiento (Gráfica 5) del sistema de refrigeración del motor Stirling, que se utiliza como sistema de cogeneración para aprovechamiento de ACS. Se puede observar que el rendimiento térmico tiene un comportamiento algo oscilante en algunos de los períodos del día, pero mantiene un rendimiento térmico medio entorno al 40%. Este valor junto al rendimiento eléctrico (13%) da un valor global del rendimiento del disco Stirling de 53%



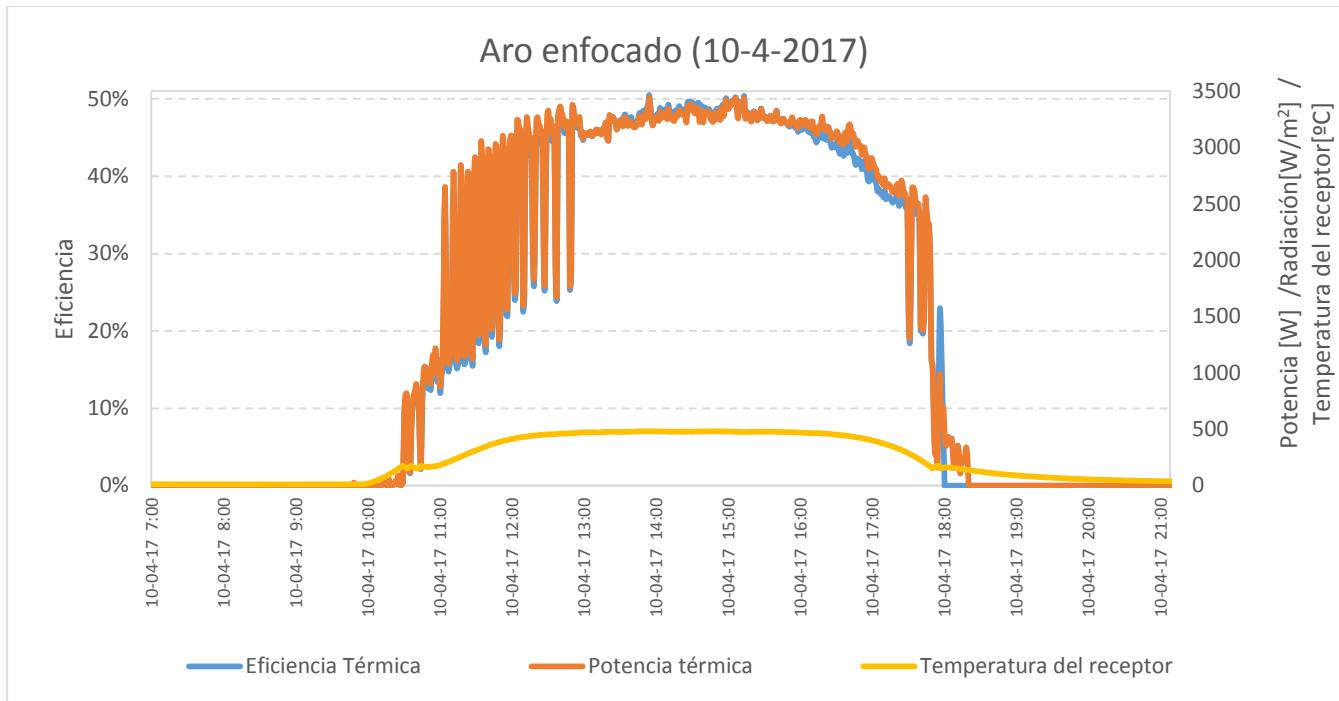
Gráfica 5 Eficiencia eléctrica, térmica y total del sistema con la configuración nº 3

#### - Configuración 4: Aro enfocado

Se ha tomado el día 10 de abril como referencia de la Configuración 4 para la elaboración de la Gráfica 6 donde se puede apreciar que apenas hay diferencia con la configuración 3.



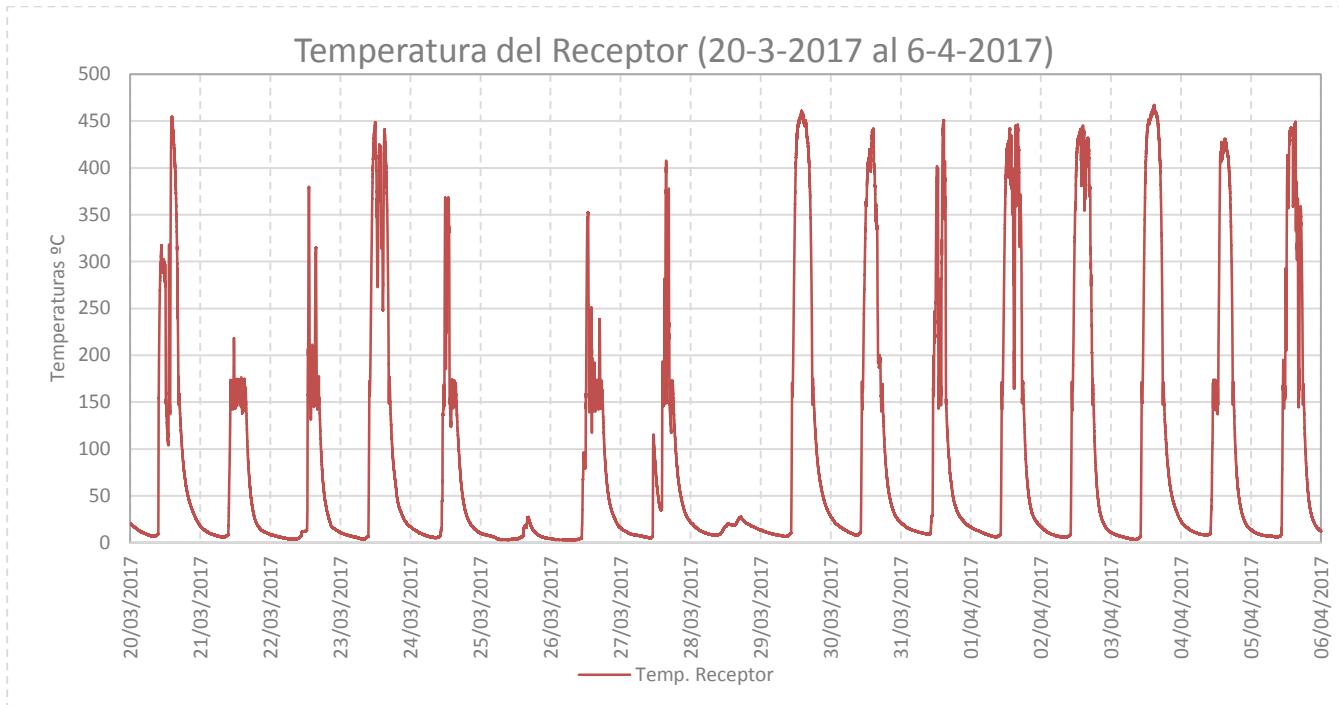
Gráfica 6 Parámetros característicos del disco a lo largo de un día de trabajo con el aro enfocado como configuración principal.



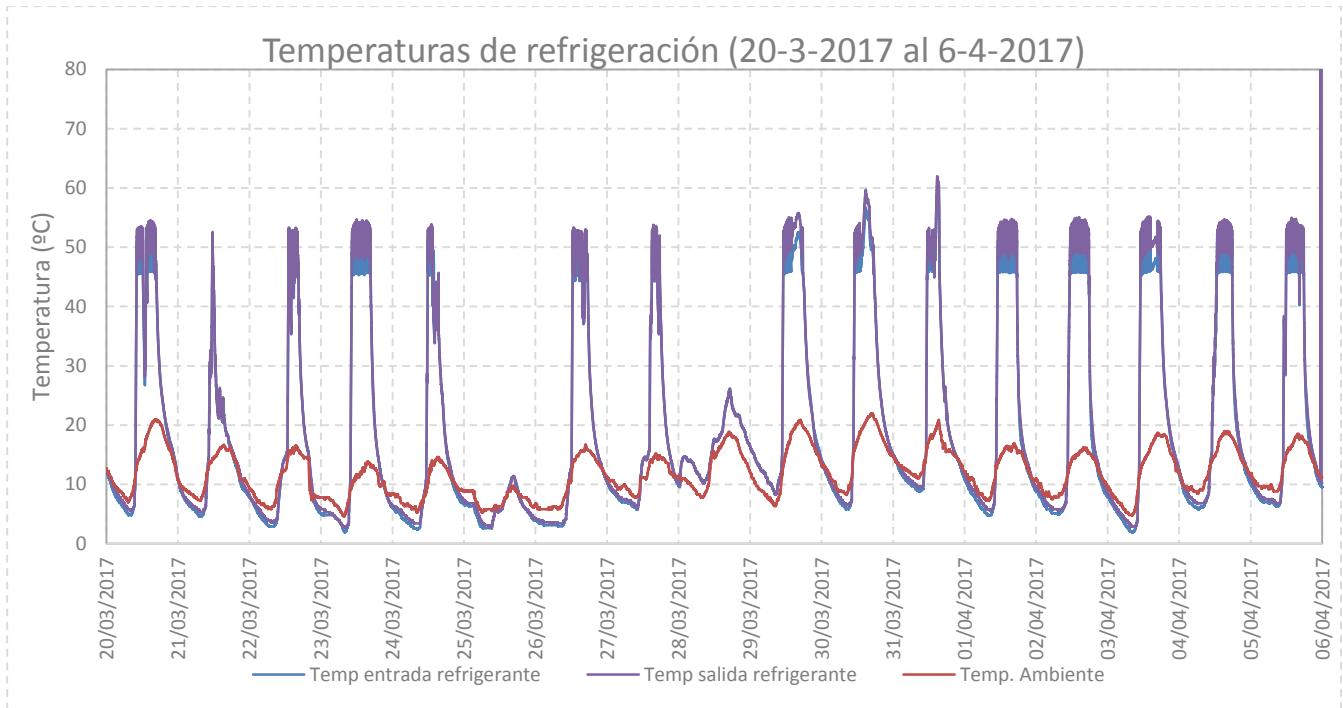
Gráfica 7 Representación de la eficiencia y potencia térmica de la configuración 4.

Al igual que en el apartado anterior, se ha representado en la Gráfica 7 la eficiencia térmica. En este caso se muestra una disminución del 7,5% respecto a la configuración anterior. También se observa una potencia térmica máxima de 3,4 kW.

Se ha considerado necesario ilustrar el comportamiento de las temperaturas del sistema en un periodo temporal mayor (una semana), con el objetivo de mostrar cuan altas son y hacer patente la necesidad de conocerlas para el diseño de los elementos (aro y concentrador). Por tal motivo, se ha construido la Gráfica 8 y la Gráfica 9 que realizan una recopilación semanal, con la configuración 3, de las temperaturas del receptor y la refrigeración del sistema. Se puede apreciar que para ciertos días puntuales, el 26 y 29 de marzo, el sistema no se situó en posición de trabajo, con lo cual el disco no pudo producir energía esos días. Para el resto de los días el receptor alcanza temperaturas de hasta 460°C. Respecto al líquido refrigerante, su temperatura nominal este entorno a los 50°C.

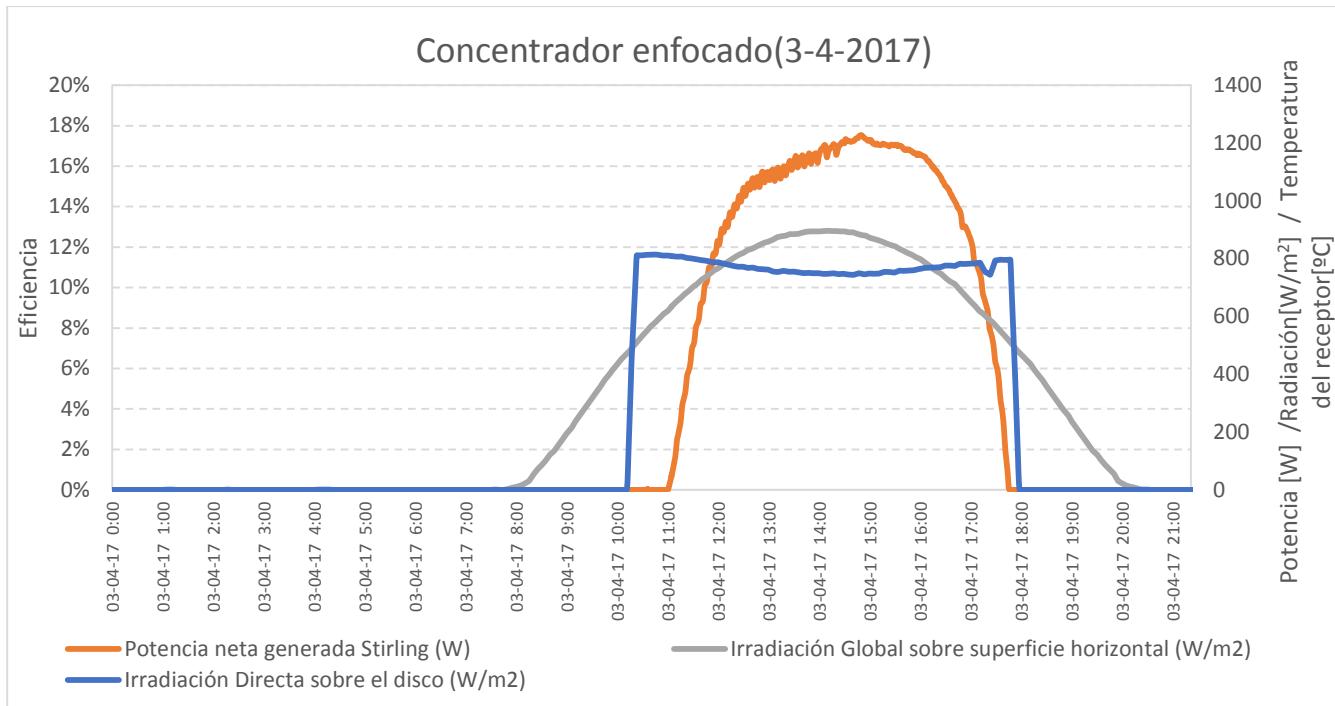


Gráfica 8 Seguimiento de la temperatura del receptor con la configuración 3.

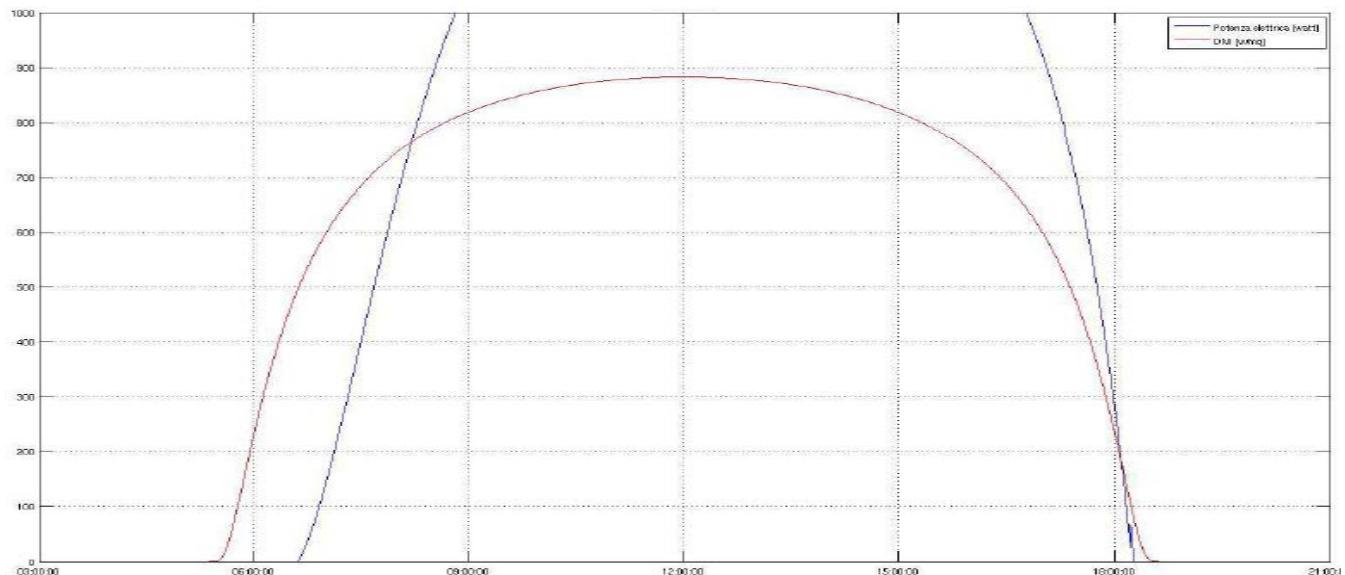


Gráfica 9 Representación de las temperaturas del refrigerante durante la semana de estudio de la configuración 3

Para concluir con este apartado se va a comparar la curva de funcionamiento durante un día nominal con la curva proporcionada por el fabricante de este equipo. Con las Gráfica 10 y Gráfica 11 se puede realizar una comparación con la configuración del reconcentrador enfocado y limpio. Se obtiene como resultado una semejanza razonable a excepción del inicio de la producción de energía, que en el modelo experimental se retrasa cuatro horas, debido al retardo programado en el comienzo y finalización de la captación solar del equipo.



Gráfica 10 Configuración 3 con su curva característica.



Gráfica 11 Curva característica del sistema proporcionada por el fabricante. (27)

## 4.2. Comparativa de funcionamiento

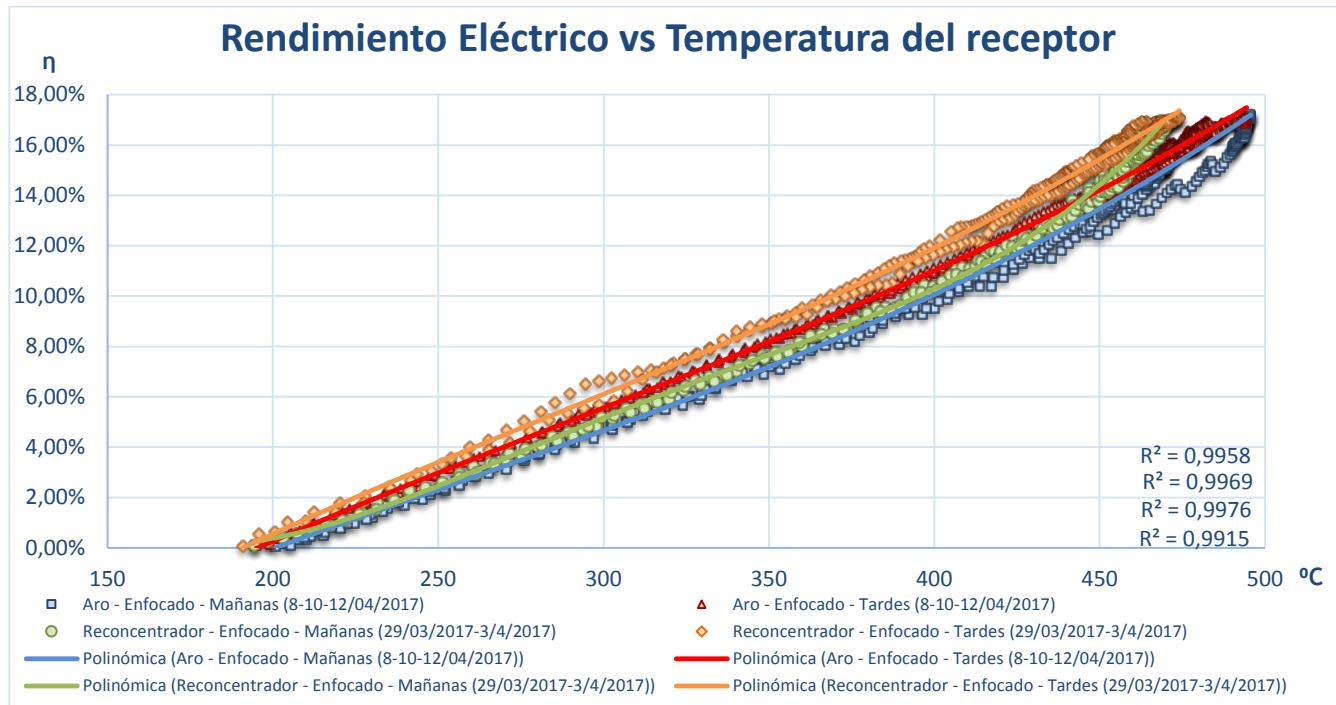
En el punto anterior se ha mostrado el comportamiento del disco Stirling en las cuatro configuraciones en las que se le ha hecho trabajar. En este apartado se realizará una comparativa de funcionamiento entre ellas.

### 1.- Comparativa configuración 3 y 4: reconcentrador enfocado y aro enfocado

Lo primero que se ha efectuado, después del tratamiento de los datos, fue una selección de los días óptimos, ya que en ciertas ocasiones el clima no ha sido el idóneo para este periodo. Se han tomado como días óptimos los días 8, 10 y 12 de abril para el aro enfocado, mientras que para el reconcentrador enfocado se han tomado los días 29 de marzo y 3 de abril.

Utilizando los datos adquiridos en los días seleccionados, se han elaborado una serie de gráficas para realizar una comparación entre ambas configuraciones.

La primera de ellas, la Gráfica 12, muestra el rendimiento eléctrico frente a la temperatura alcanzada por el receptor. En ella hay varios puntos a destacar.



Gráfica 12 Rendimiento eléctrico frente a la temperatura del sistema, para reconcentrador y aro enfocados.

En primer lugar se encuentra que las líneas de tendencia muestran una distribución prácticamente lineal de los datos, tanto para el aro enfocado como el reconcentrador, con un comportamiento diferente mañana y tarde en cada una de las configuraciones. Por la mañana el rendimiento es mayor debido a que la temperatura exterior es menor y

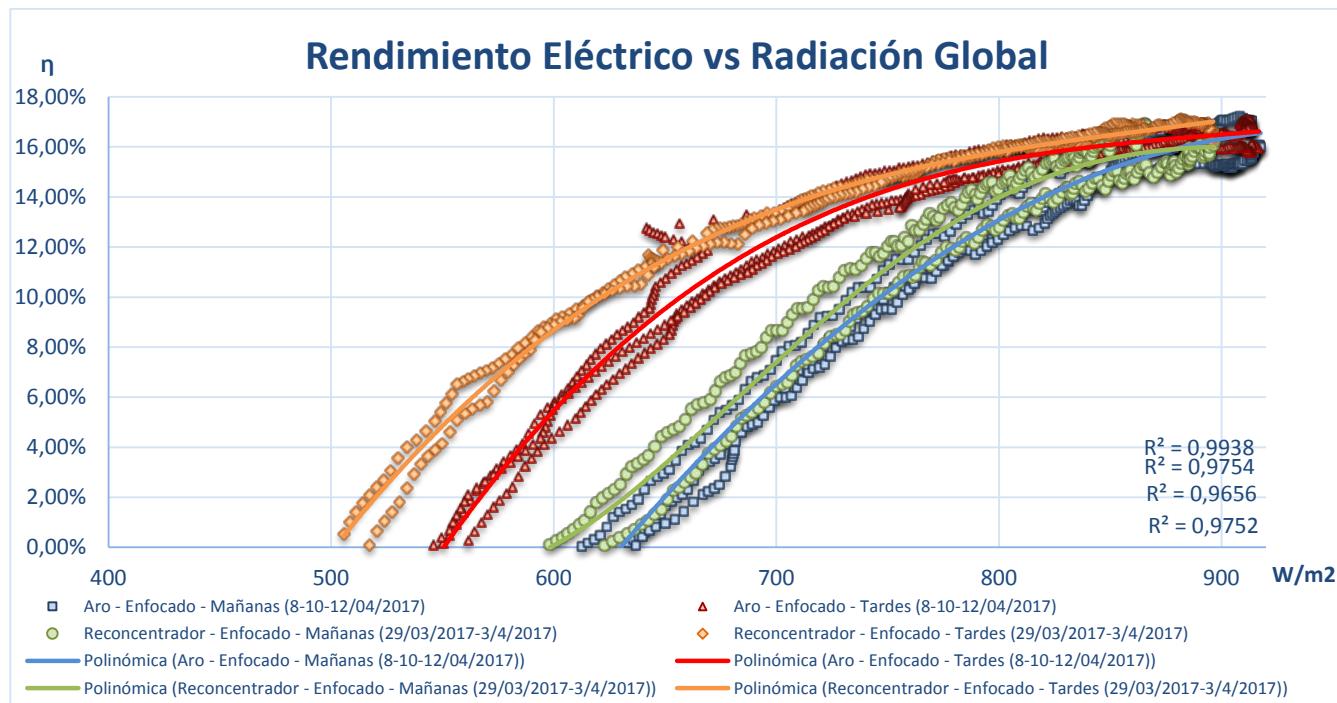
su efecto sobre la refrigeración del motor Stirling resulta más eficiente, afectando al rendimiento global.

A sí mismo se observa el  $\eta_{Elect.max.}$ , con un valor de 17,23%. La diferencia del aro con el reconcentrador enfocado es mínima. Por lo que, sabiendo que el rendimiento máximo está condicionado por el motor, estos valores muestran que el uso del aro o el concentrador indistintamente, no tienen un efecto negativo en el rendimiento máximo del disco debido al perfecto enfocado del sistema con el sol.

El rango de temperaturas de trabajo tanto para el aro enfocado como para el reconcentrador enfocado es de 200°C a 500°C. Es importante que se conozcan para saber a qué temperatura comienza la producción de energía, y las temperaturas máximas alcanzadas para la elección del material de fabricación del sistema.

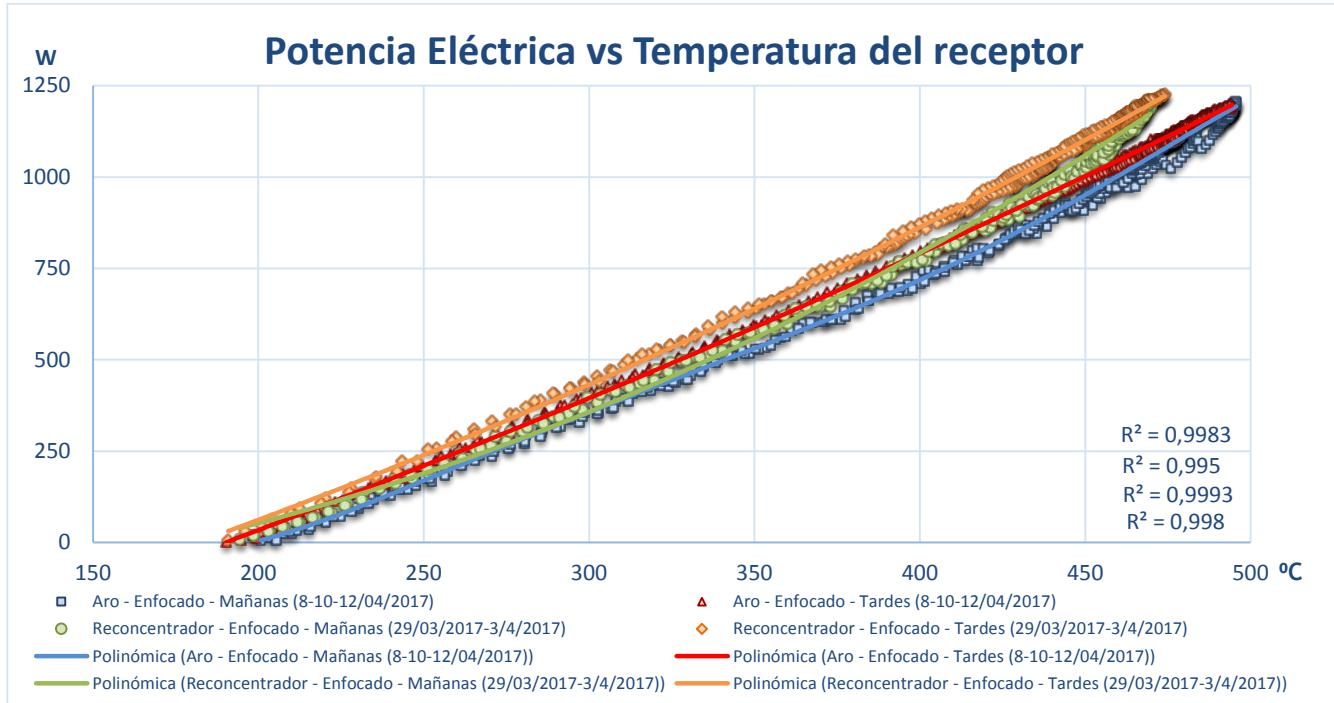
Si se mira la gráfica atentamente se puede notar que, para una misma temperatura el concentrador obtiene un rendimiento eléctrico superior que el aro, porque la radiación que incide en el receptor lo hace de forma más homogénea en su superficie.

En la Gráfica 13 se ha trazado el rendimiento eléctrico frente a la Rad. Global. Lo más importante a destacar dentro de esta es que, para una misma Rad. Global, se obtiene un rendimiento bastante superior del reconcentrador frente al aro. Esto refuerza el hecho de que la configuración 3 obtiene unos resultados mejores que la configuración 4.



Gráfica 13 Rendimiento eléctrico frente a la radiación global del sistema, para reconcentrador y aro enfocados.

Por último se puede observar en la Gráfica 14 como varia de forma lineal la potencia eléctrica con la temperatura, en ambas configuraciones. Un valor importante a destacar es la *Potencia Elect.max.*, que la proporciona el concentrador enfocado tiene un valor de 1213,83 W. La potencia eléctrica de diseño es de 1 kW, por lo que se ha conseguido hacer trabajar al disco Stirling en condiciones óptimas.



Gráfica 14 Potencia eléctrica frente a la temperatura del sistema, para reconcentrador y aro enfocados.

	Rad. Directa max.	Rad. Directa media	Rad. Global max.	Rad. Global media.	$\eta$ Elect. max.	$\eta$ Elect. medio	$\eta$ Term. max.	$\eta$ Term. medio	Pot. Elect. max. (W)	Pot. Elect. media (W)	Pot. Term. Max.(W)	Pot. Term. media(W)	Pot. Total max.(W)	Pot. Total media(W)	Temp. Max.	Temp. media
Aro - enfocado - Mañanas	790,88	743,92	915,49	808,05	17,23	12,26	50,5	33,56	1207	865,87	3451,89	2385,43	4658,89	3087,81	495,65	424,40
Aro - enfocado - Tardes	768,34	733,20	916,75	783,15	17,14	13,47	50,39	42,73	1202,33	942,29	3496,38	2708,25	4677,29	3514,24	494,4	433,74
Reconcentrador - enfocado - Mañanas	810,39	765,22	896,52	789,14	16,97	12,35	55,65	34,62	1213,83	881,43	4014,04	2526,71	5132,38	3296,98	469,61	410,40
Reconcentrador - enfocado - Tardes	796,38	746,43	896,31	752,44	17,13	13,49	54,02	44,31	1227,66	973,45	3806,84	2980,44	4980,34	3888,16	474,08	420,98

Tabla 4 Datos adicionales del aro y el reconcentrador enfocados.

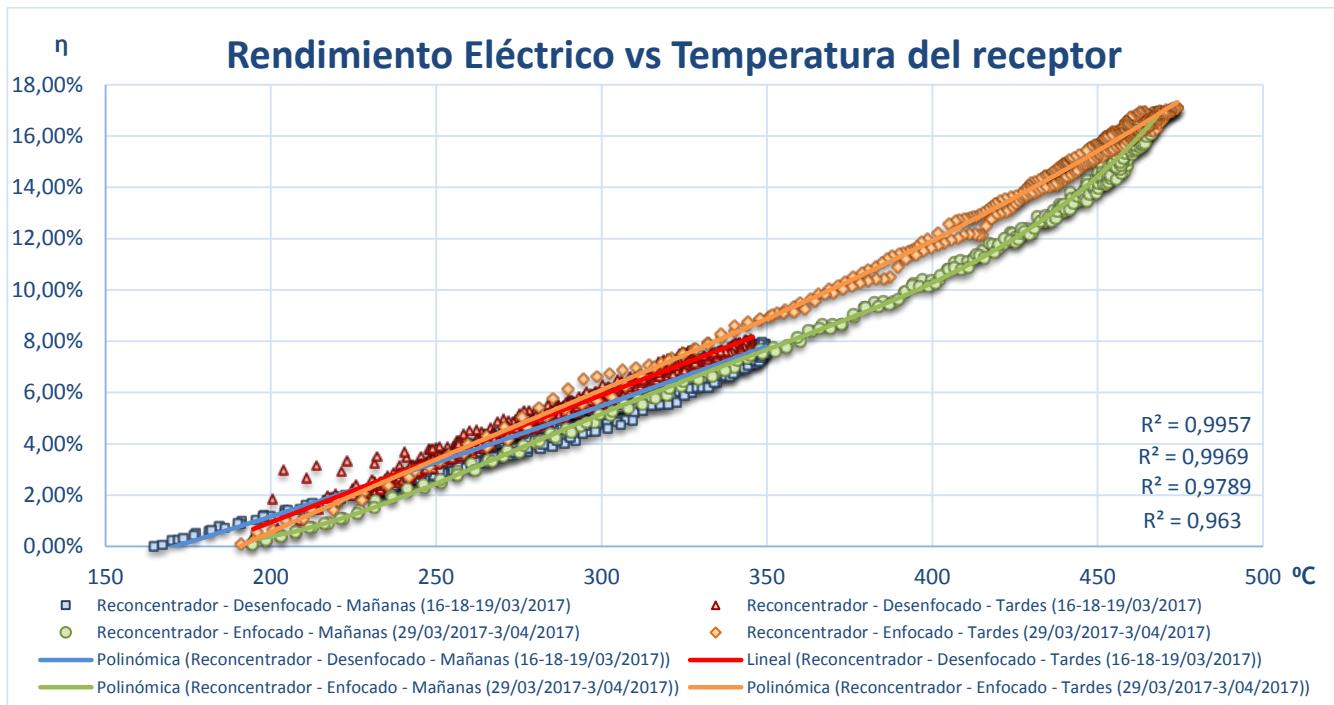
Estas gráficas y datos son los más importantes a destacar, aun así se ha querido recopilar en la Tabla 4 una ampliación de los datos obtenidos.

La conclusión que se puede obtener, con los datos conseguidos, es que el reconcentrador funciona, ya que para unos mismos valores de radiación y/o temperatura se logran unos resultados mejores que aplicando la configuración con el aro plano.

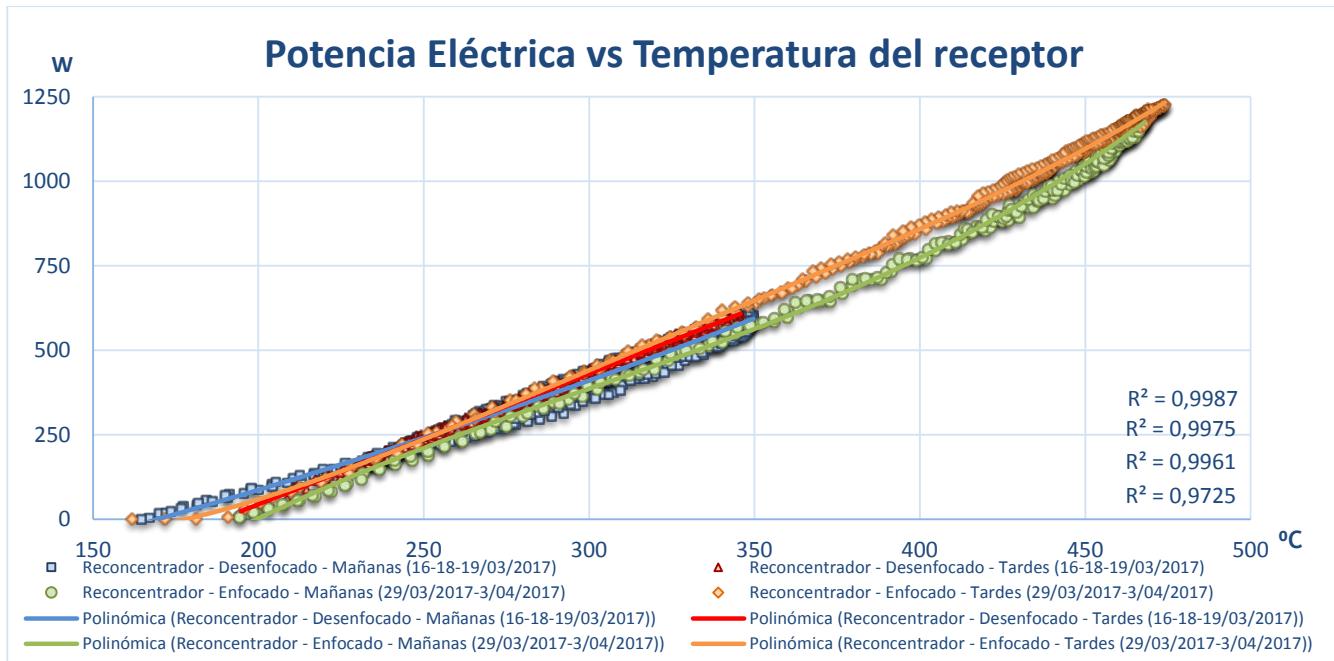
## 2.- Comparativa configuración 2 y 3: reconcentrador desenfocado y enfocado

Además de obtener la comparativa con el aro y el reconcentrador, enfocados y el plato limpio, se ha visto que sería interesante estudiar cómo afectaría, la suciedad y un ligero desenfoque en el plato, a los resultados finales del reconcentrador. Esto ha surgido de la necesidad de que, en condiciones reales, estos sistemas se ensucian muy a menudo y pueden sufrir ciertos desenfoques.

Se han escogido como días óptimos los días 16, 18 y 19 de marzo para el reconcentrador desenfocado. Para el reconcentrador enfocado se han tomado los días 29 de marzo y 3 de abril como días significativos.



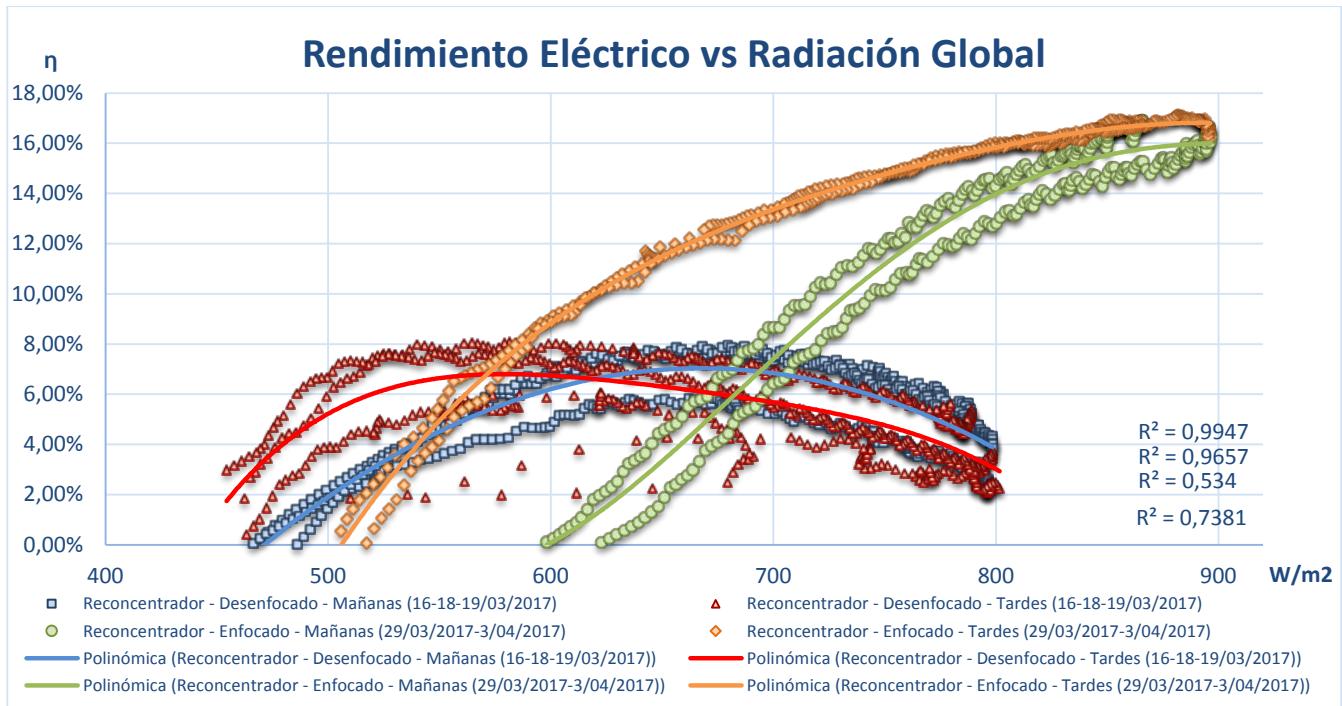
Gráfica 15 Rendimiento eléctrico frente a la temperatura del sistema, para la configuración de concentrador enfocado y desenfocado



Gráfica 16 Potencia eléctrica frente a la temperatura del sistema, para la configuración de concentrador enfocado y desenfocado.

En la Gráfica 15, se ha representado el rendimiento eléctrico frente a la temperatura. Se comprueba que la suciedad si afecta en este parámetro, pudiéndose comprobar que las temperaturas alcanzadas son mucho menores y por tanto el rendimiento también lo es. Esto hace que la potencia producida descienda, tal y como muestra la Gráfica 16. Esta serie de efectos se deben a la suciedad del plato, que limita su reflectividad, y a su desenfoque, el cual hace que parte de la radiación no llegue al receptor.

Además, se ha obtenido la curva característica del sistema la cual se expone en la Gráfica 17, y se ha elaborado la Tabla 5 con los datos más importantes.



Gráfica 17 Curva característica del sistema con ambas configuraciones, reconcentrador enfocado y desenfocado.

	Rad. Directa max.	Rad. Directa media	Rad. Global max.	Rad. Global media	$\eta$ Elect. Max.	$\eta$ Elect. medio	$\eta$ Term. Max.	$\eta$ Term. medio	Pot. Elect. max. (W)	Pot. Elect. media (W)	Pot. Term. max(W)	Pot. Term. media(W)	Pot. Total max.(W)	Pot. Total media(W)	Temp. max.	Temp. media
Reconcentrador - desenfocado - Mañanas	812,8	782,5	801,71	687,32	7,98	5,15	46,35	26,4	610,16	387,7	3487,9	1979,27	4005,64	2366,98	349,66	292,09
Reconcentrador - desenfocado - Tardes	794,9	749,14	798,55	678,58	8,08	5,21	44,6	29,91	614,83	372,88	3129,12	2171,34	3664,68	2557,03	345,76	286,01
Reconcentrador - enfocado - Mañanas	810,39	765,21	896,52	789,14	16,97	12,35	55,65	34,62	1213,83	881,43	4014,04	2526,71	5132,38	3296,98	469,61	410,40
Reconcentrador - enfocado - Tardes	796,38	746,43	896,31	752,44	17,13	13,49	54,02	44,31	1227,66	973,45	3806,84	2980,44	4980,34	3888,16	474,08	420,98

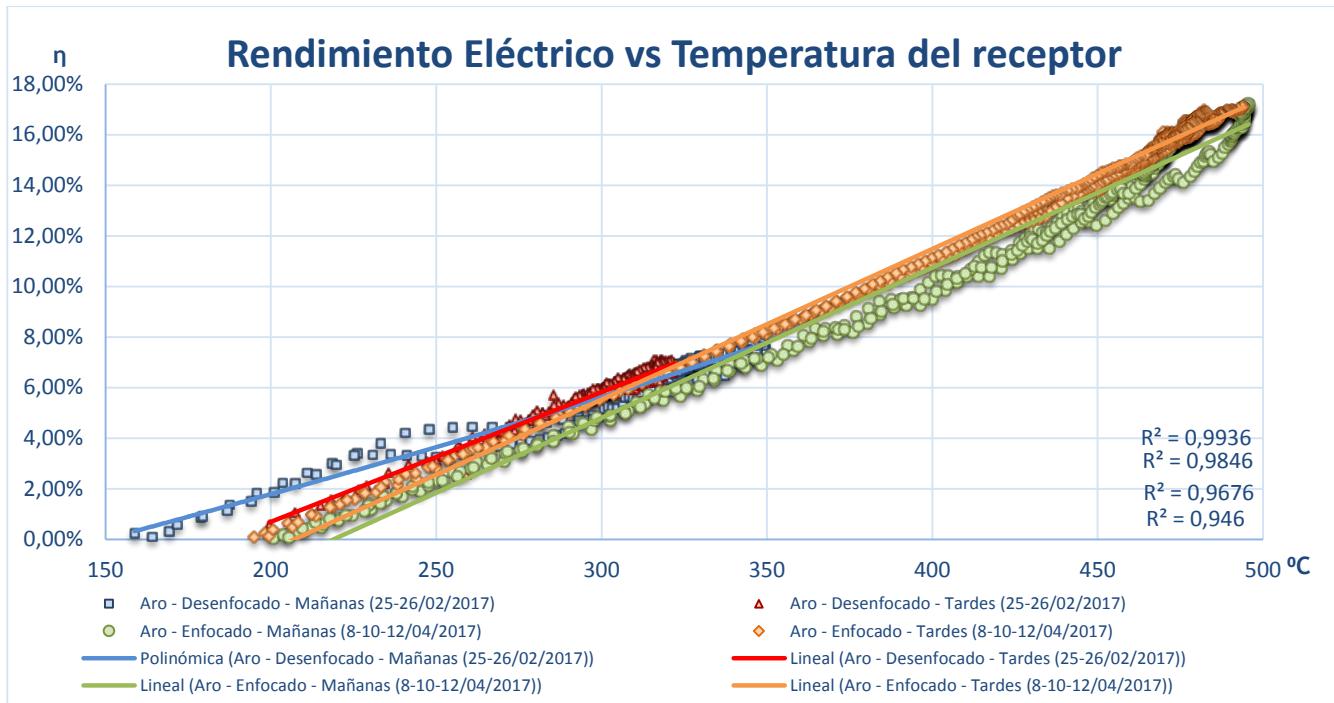
Tabla 5 Valores principales para la comparación de ambas configuraciones.

Es necesario comentar que estos sistemas pierden todo su potencial si están sucios o desenfocados y por lo tanto es necesario tener un sistema de control y limpieza eficientes.

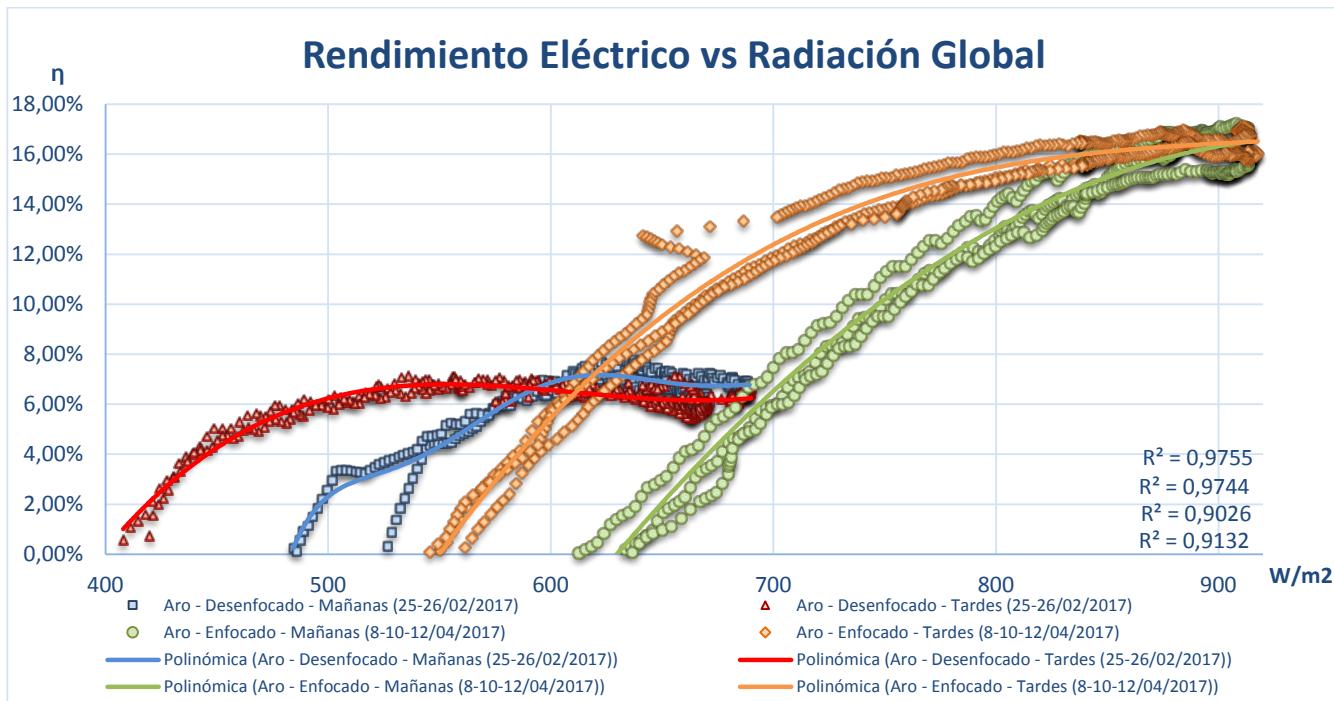
### 3.- Comparativa configuración 1 y 4: aro desenfocado y enfocado

Si se ha decidido no utilizar un reconcentrador y se sigue utilizando la disposición original de aro, se van a exponer los efectos de la suciedad y el desenfoque sobre esta configuración. Para el análisis se han tomado como días óptimos los días 25 y 26 de febrero para el aro desenfocado, mientras que para el aro enfocado se han seleccionado los días 8, 10 y 12 de abril. En la Fig. 45 se expone el sistema trabajando con este dispositivo instalado.

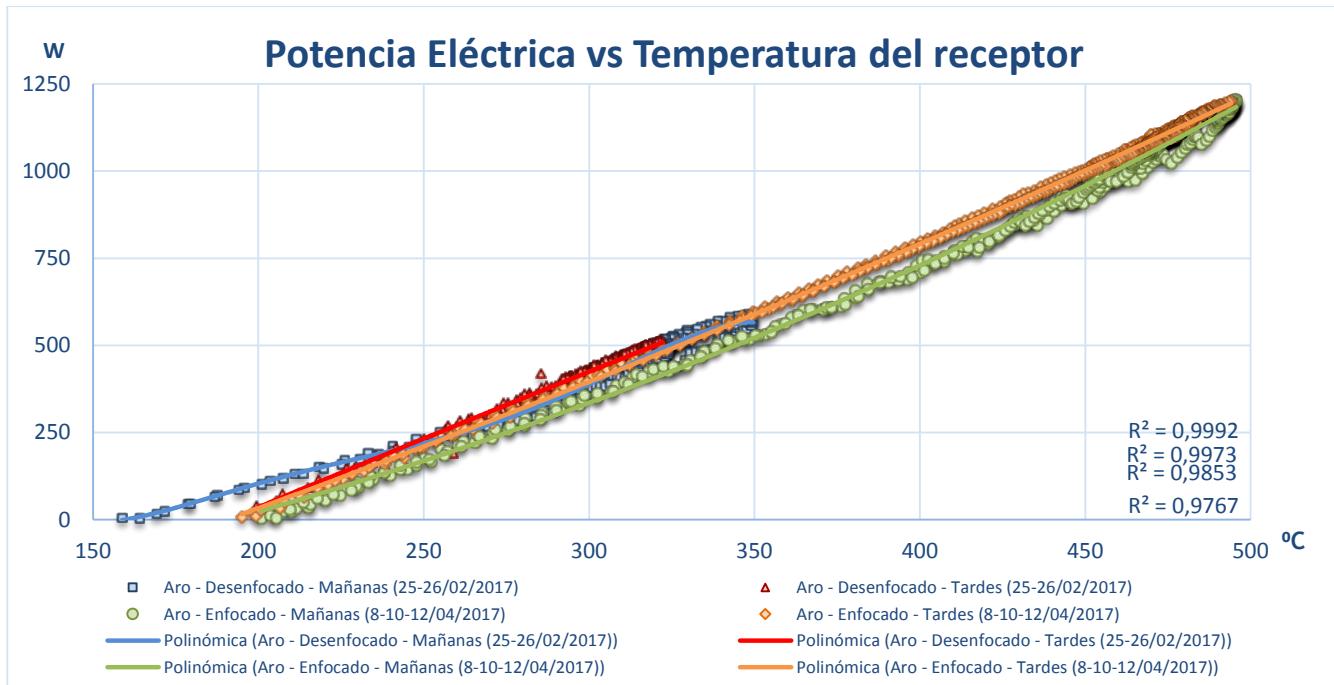
Utilizando la representación de datos en gráficas, se han elaborado los siguientes resultados.



Gráfica 18 Rendimiento eléctrico frente a la temperatura del sistema, realizada para el aro enfocado y desenfocado.



Gráfica 19 Curva característica del sistema, realizada para el aro enfocado y desenfocado



Gráfica 20 Potencia eléctrica frente a la temperatura del sistema, realizada para el aro enfocado y desenfocado.

La Gráfica 18 refleja el rendimiento eléctrico frente a la temperatura. Al igual que en el apartado anterior, el rendimiento eléctrico es bastante deficiente con el aro sucio y desenfocado, lo cual afecta a la potencia obtenida como se aprecia en la Gráfica 20.

Se ha elabora la curva característica del sistema trazada en la Gráfica 19, y se han recopilado los datos más significativos en la Tabla 6.

	Rad. Directa max.	Rad. Directa media	Rad. Global max.	Rad. Global media	$\eta$ Elect. max.	$\eta$ Elect. medio	$\eta$ Term. max.	$\eta$ Term. medio	Pot. Elect. max. (W)	Pot. Elect. media (W)	Pot. Term. max.(W)	Pot. Term. media(W)	Pot. Total max.(W)	Pot. Total media(W)	Temp. Max.	Temp. media
Aro - desenfocado - mañanas	799,11	769,69	690,04	628	7,779	6,486	49,43	26,92	591,666	442,07	3661,07	2011,507	4186,57	2491,685	349,533	320,78
Aro - desenfocado - tardes	799,11	769,69	690,04	628	7,129	6,050	49,28	29,75	515,166	441,09	3506,6	2167,027	4216,80	2614,437	322,2	304,41
Aro - enfocado - Mañanas	790,88	743,92	915,4	808	17,23	12,265	50,503	33,568	1207	865,875	3451,895	2385,433	4658,895	3087,811	495,65	424,40
Aro - enfocado - Tardes	768,34	733,20	916,75	783	17,14	13,47	50,395	42,730	1202,333	942,295	3496,379	2708,256	4677,290	3514,245	494,4	433,74

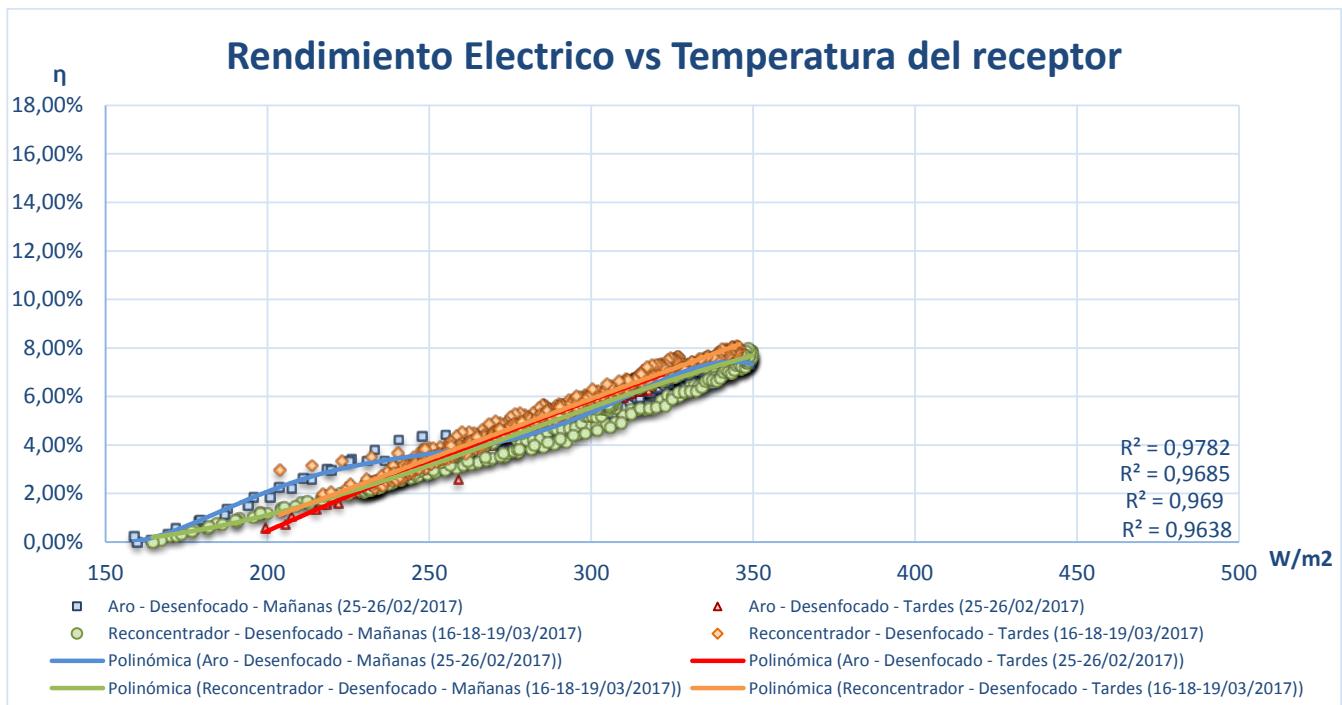
Tabla 6 Valores notables tanto para aro enfocado como desenfocado.



Fig. 45 A la izquierda se observa sistema desenfocado y sucio con aro. Mientras, a la derecha se muestra el sistema enfocado y limpio con aro.

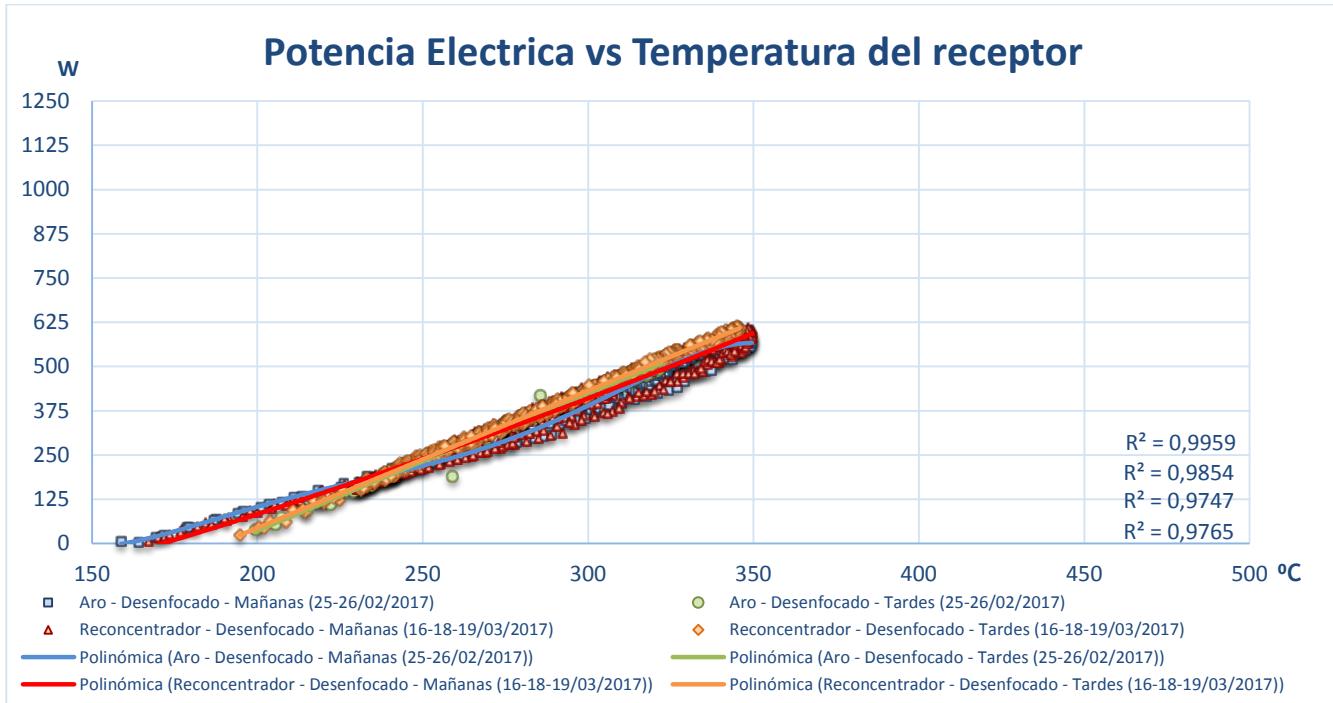
#### 4.- Comparativa configuración 1 y 3: aro y reconcentrador desenfocados

En este último punto se van a comparar las configuraciones 1 y 3 con el objetivo de determinar que configuración da mejores resultados utilizando las peores condiciones posibles (desenfoque y suciedad). Para este estudio se han tomado como días óptimos los días 25 y 26 de febrero para el aro desenfocado, mientras que para el reconcentrador desenfocado se han utilizado los días 16, 18 y 19 de marzo.

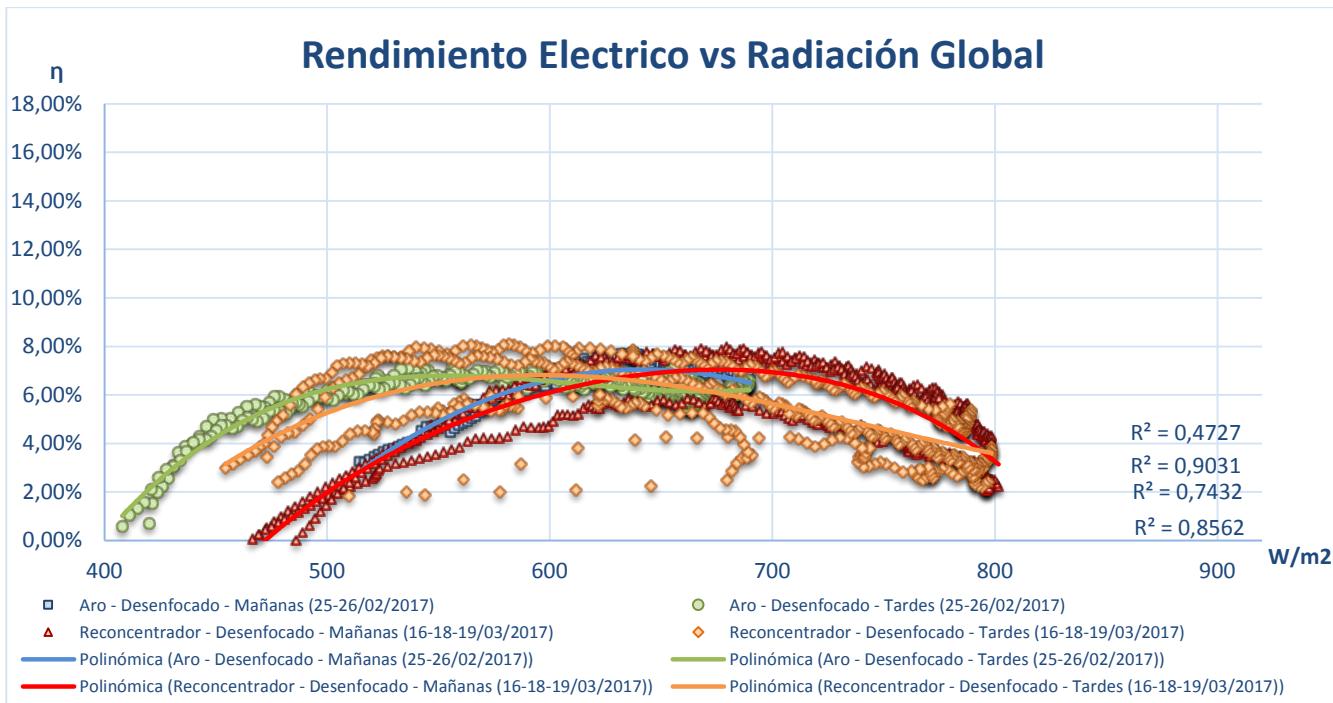


Gráfica 21 Comparativa del rendimiento eléctrico para las configuraciones 1 y 3.

En la Gráfica 21, se representa el rendimiento eléctrico de ambas configuraciones. En ella se ilustra que los valores son similares en ambas configuraciones y su comportamiento es lineal con la temperatura. Esto mismo se muestra en la Gráfica 22 donde las potencias también son muy parecidas.



Gráfica 22 Representación de la potencia en las configuraciones 1 y 3.



Gráfica 23 Ilustración de la curva característica de las configuraciones 1 y 3.

Adicionalmente se ha representado la curva característica del sistema en la Gráfica 23 y se ha elaborado la Tabla 7 con los datos más significativos

Análisis experimental de un reconcentrador de rayos para un disco Stirling.

	Rad. Directa max.	Rad. Directa media	Rad. Global max	Rad. Global media	$\eta$ Elect. max.	$\eta$ Elect. Medio	$\eta$ Term. max.	$\eta$ Term. Medio	Pot. Elect.max. (W)	Pot.Elect. media (W)	Pot. Term. max.(W)	Pot. Term. media(W)	Pot. Total max.(W)	Pot.Total media(W)	Temp.Max.	Temp. Media
Aro - desenfocado - mañanas	799,11	769,70	690,04	628,33	7,78	6,49	49,44	26,93	591,67	442,08	3661,08	2011,51	4186,58	2491,69	349,53	320,79
Aro - desenfocado - tarde	799,11	769,70	690,04	628,33	7,13	6,05	49,29	29,76	515,17	441,10	3506,60	2167,03	4216,81	2614,44	322,20	304,41
Concentrador - desenfocado - mañanas	812,80	782,54	801,71	687,33	7,99	5,15	46,35	26,40	610,17	387,70	3487,90	1979,28	4005,65	2366,98	349,67	292,09
Concentrador - desenfocado - Tardes	794,90	749,14	798,55	678,58	8,09	5,21	44,60	29,91	614,83	372,88	3129,12	2171,34	3664,68	2557,03	345,77	286,01

Tabla 7 Datos significativos para las configuraciones 1 y 3.

## 5. Conclusiones

Para concluir con el estudio se van a exponer las conclusiones que se han obtenido del análisis de los datos.

- Cotejando el efecto de spillage, ilustrado en la Gráfica 1 y la Gráfica 2, se concluye que, aunque con la configuración de reconcentrador obtenemos un 10% menos de eficiencia puntual en el mínimo relativo de la curva de potencia que con la configuración de aro, el rendimiento medio del sistema es un 5,5 % mayor con el reconcentrador. El efecto de spillage ha de ser evitado a toda costa, ya que su aparición puede provocar la destrucción del sistema tal y como revela la Fig. 43.
- El efecto de la limpieza sobre este sistema tiene una importancia extrema. Cuando el sistema se encuentra en perfectas condiciones de limpieza, logra un 120% más de potencia eléctrica producida, utilizando la configuración 3 y 4 (reconcentrador y aro enfocados).
- Según las especificaciones del fabricante compiladas en la Tabla 2, el equipo produce 1 kW eléctrico y 3 kW térmicos, con  $750\text{W/m}^2$  de radiación directa. En este estudio se han logrado una mejora del 30% en cuanto a la producción de energía eléctrica y de un 16,6% en cuanto a la energía térmica, para los mismos valores de radiación.
- Comparando las configuraciones 3 y 4 podemos concluir que, para un mismo nivel de radiación, obtenemos unos resultados mucho mejores con el reconcentrador con el aro. Estos resultados se vuelven más parejos a medida de que la radiación solar aumenta, pero en niveles de baja radiación ( $560\text{W/m}^2$ ) la diferencia puede llegar a ser del 200% tal y como se muestra en la Gráfica 13.
- En la Gráfica 23, aun con el efecto de la suciedad y el desenfoque, obtenemos una mejora del 13,5% con el reconcentrador frente al aro. Cabe destacar que usando el reconcentrador estamos produciendo energía en un rango de temperaturas mayor que si usáramos el aro.

Todo ello lleva a concluir que, para unas condiciones óptimas de funcionamiento, el reconcentrador obtiene valores mejores a los del aro y por lo tanto es altamente recomendable instalarlo, ya que aunque ello suponga un aumento en el coste final del disco, el aprovechamiento de la energía y del sistema sería altamente satisfactorio.

A partir de esta serie de conclusiones se han concretado varias propuestas para la mejora y el desarrollo de este sistema.

- Una acción de mejora que se podría implementar sería fabricar el concentrador con inconel, una superaleación que resiste altas temperaturas y evitaría los daños provocados por el efecto de spillage (desbordamiento) del sistema.
- Se hace patente la necesidad de estos sistemas en reducir la suciedad que se acumula en ellos. Por ello, sería conveniente diseñar e implementar un sistema automático de limpieza del plato porque, como se ha demostrado, mejoraría la eficacia del sistema notablemente.



## Anexo A

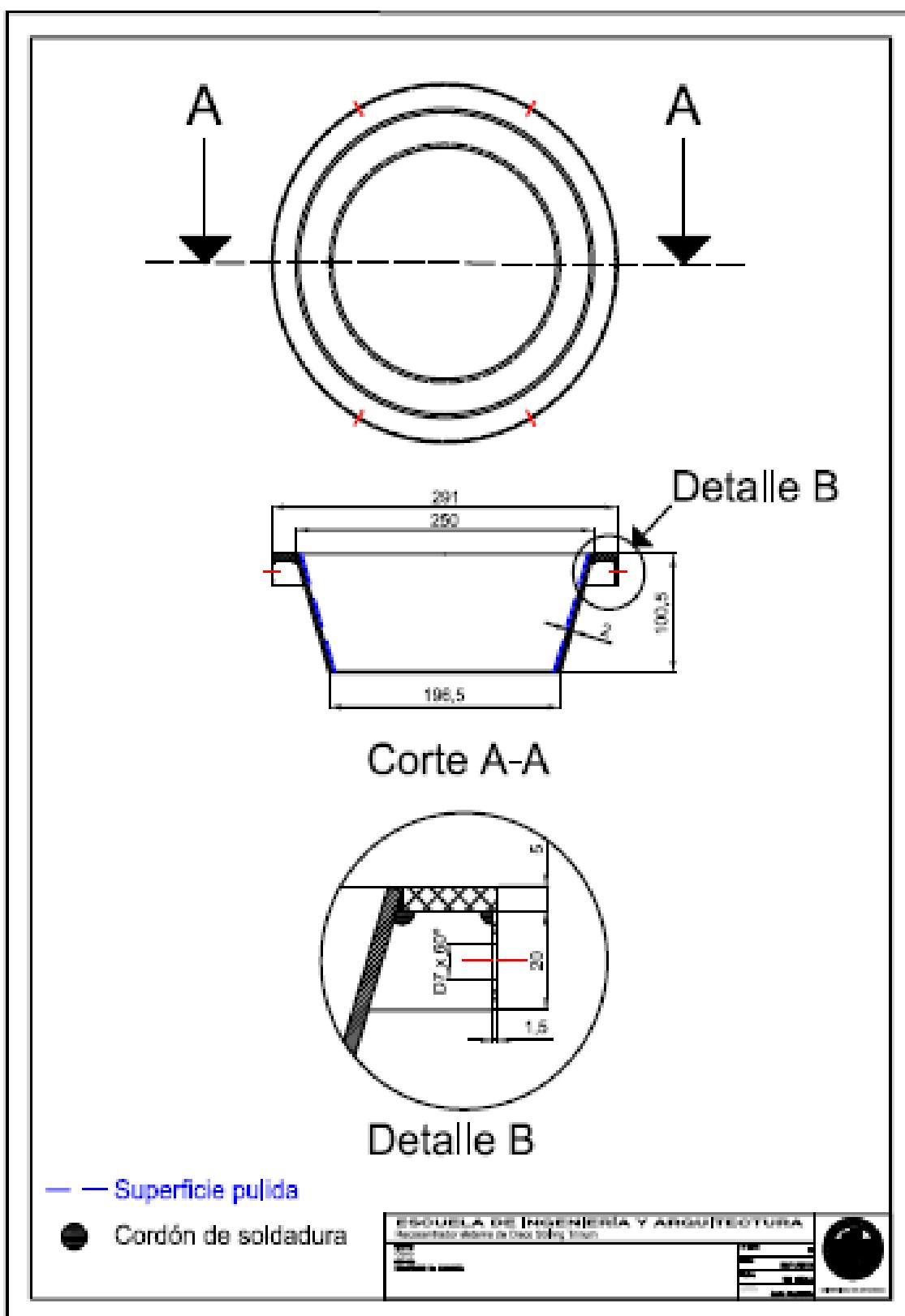


Fig. 46 Planos de construcción del reconcentrador.

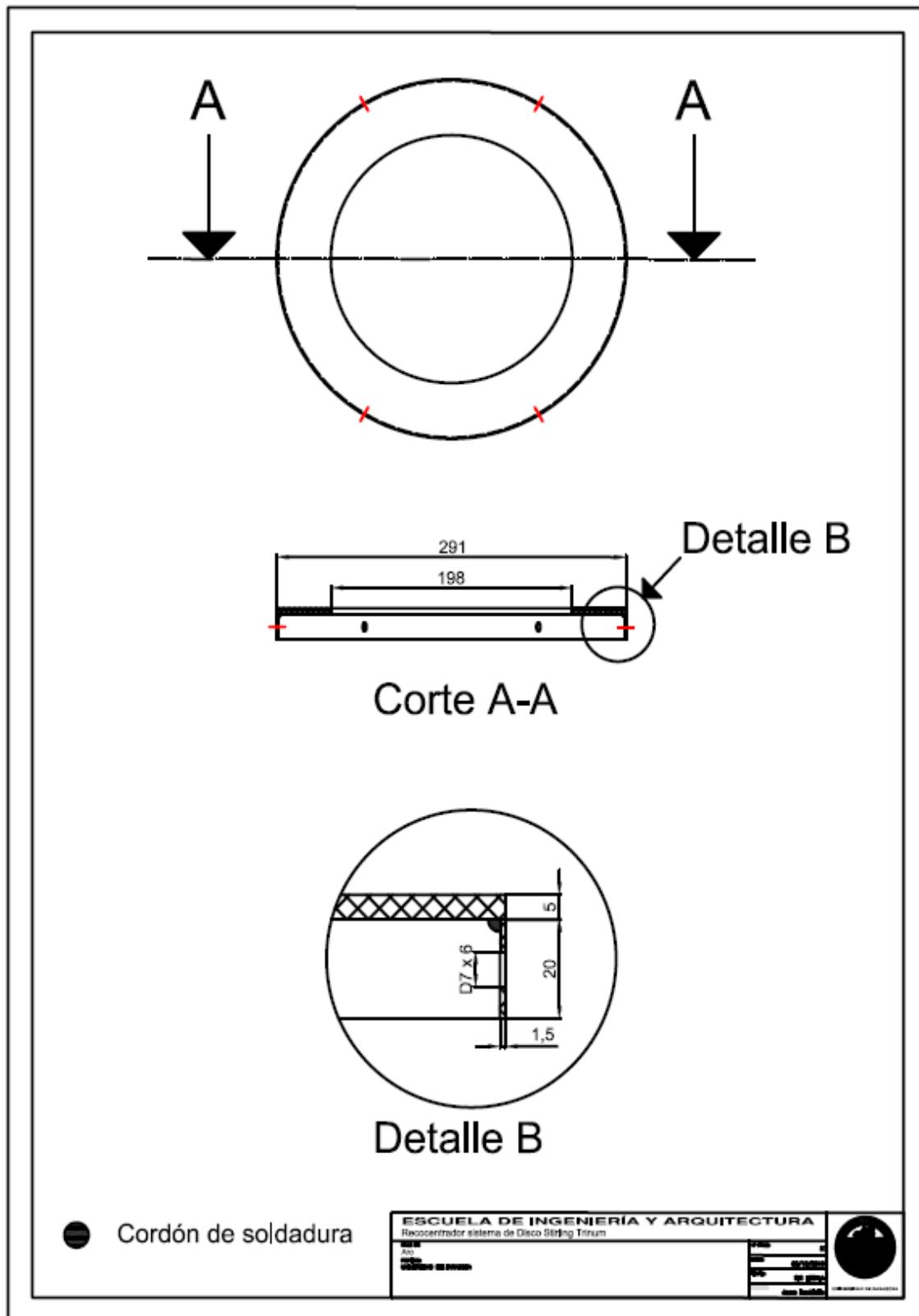


Fig. 47 Planos constructivos del aro.

# Referencias

1. Red Eléctrica de España. *Red Eléctrica de España*. [En línea] Abril de 2017. <http://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/indicadores-nacionales/series-estadisticas>.
2. Slideshare. [En línea] 11 de Abril de 2010. [Citado el: 2 de Junio de 2017.] <https://es.slideshare.net/cfloresd/muro-trombe-3694723>.
3. welcomeelectromusic. *welcomeelectromusic*. [En línea] [Citado el: 26 de Mayo de 2017.] <http://welcomeelectromusic.blogspot.com.es/2014/10/horno-solar-para-el-dispositivo-usado.html>.
4. *Dish-Stirling Systems: An Overview of Development and Status*. Mancini, Thomas, y otros. [ed.] R. Pitz-Paal. s.l. : the ASME Solar Energy Division, 125 -135 de Octubre de 2002.
5. Noon energy. [En línea] [Citado el: 26 de Mayo de 2017.] <http://noon-energy.com/Tecnologia.htm>.
6. Grupo Termodinámica y Energías Renovables. [En línea] [Citado el: 9 de Marzo de 2017.] <http://gter.es/disco-parabolico-con-motor-stirling.html>.
7. Escuela de Ingeniería de Eibar. [En línea] 10 de Enero de 2011. [Citado el: 9 de Marzo de 2017.] <http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/termoelectrica/revision/revision.html>.
8. Varinia. [En línea] 15 de Julio de 2010. [Citado el: 26 de Mayo de 2017.] <http://varinia.es/blog/2010/07/15/stirling-un-motor-cuyo-combustible-es-solo-calor/>.
9. flickr. [En línea] [Citado el: 26 de Mayo de 2017.] [https://www.flickr.com/photos/derek\\_curry/49083646](https://www.flickr.com/photos/derek_curry/49083646).
10. Plataforma Solar de Almería. [En línea] [Citado el: 16 de Febrero de 2017.] <http://www.psa.es/es/installaciones/discos/eurodish.php>.
11. Energía solar. [En línea] 17 de marzo de 2016. [Citado el: 16 de Febrero de 2017.] <https://solar-energia.net/definiciones/motor-stirling.html>.
12. Stirlingengineforum.com. [En línea] Martes de Julio de 2012. [Citado el: 16 de Febrero de 2017.] <http://stirlingengineforum.com/viewtopic.php?t=1694>.
13. DecorBold. [En línea] 2016 . [Citado el: 6 de Marzo de 2017.] <http://www.decorbold.com/stirling-motor-plans.html>.
14. Technologies, Advanced Cooling. Advanced Cooling Technologies. [En línea] [Citado el: 13 de Mayo de 2017.] <https://www.1-act.com/working-fluids/>.

- 15. Felt-metal-wick head-pipe solar receiver. Howard, M. Cole y Nicos, H. Andreas.**
- 16. Development of Advanced Hybrid Heat Pipe Receivers in Dish/Stirling Systems for Decentralised Power Production. D. Laing, H. Thaler, L. Lundström, W. Reinalter, T. Keck, O. Brost. Junio de 1999.**
- 17. Dish/Stirling Hybrid-Heat-Pipe-Receiver Design and Test Results. Moreno , James , y otros. [ed.] Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 2002.**
- 18. Hybrid Dish/Stirling Systems: Combustor and Heat Pipe Receiver Development. Laing, Doerte y Pa'lsson, Magnus . 176-181, s.l. : Journal of Solar Energy Engineering, Mayo de 2002, Vol. 124.**
- 19. The effect of receiver geometry on the optical performance of a smallscale. M. Daabo, Ahmed , Mahmoud, Saad y K. Al-Dadah, Raya . 2016, Energy, págs. 513-525.**
- 20. (DOE), U.S. Department of Energy. SAIC/STM Utility-Scale Joint Venture Project. 1999.**
- 21. innova. Manual dish stirling modelo Trinium. 15 de 2 de 2014.**
- 22. Almería, Plataforma solar de. Informe anual . 2003.**
- 23. California energy commission. [En línea] [Citado el: 14 de Mayo de 2017.] <http://www.energy.ca.gov/sitingcases/solartwo/>.**
- 24. ENERGY.GOV. [En línea] <https://energy.gov/eere/sunshot/downloads/suncatcher-power-system-unveiled>.**
- 25. Treehugger. [En línea] 9 de Julio de 2009. [Citado el: 26 de Mayo de 2017.] <https://www.treehugger.com/solar-technology/improved-solar-power-dish-with-stirling-engine-made-by-car-parts-suppliers.html>.**
- 26. Energythic. [En línea] 31 de Octubre de 2012. [Citado el: 2 de Junio de 2017.] <http://energythic.com/view.php?node=378>.**
- 27. SOLUTION, INNOVA ENERGY. Solar Dish System cogenerative e Thermal Modules. 2066.**
- 28. Sandia National Laboratories. [En línea] [Citado el: 14 de Mayo de 2017.] [https://share-ng.sandia.gov/news/resources/news\\_releases/new-suncatcher-power-system-unveiled-at-national-solar-thermal-test-facility-july-7-2009/#.WRh9y\\_mLTIV](https://share-ng.sandia.gov/news/resources/news_releases/new-suncatcher-power-system-unveiled-at-national-solar-thermal-test-facility-july-7-2009/#.WRh9y_mLTIV).**

# Bibliografía

- Monne, Carlos. *Apuntes de Energias renovables*.
- Stine, William B. y Geyer, Michael. *Power from the sun*. 2001.
- *An International Survey of Parabolic Dish/Stirling Engine Electrical Power Generation Technology*. Stine, W. Washington, D.C. : Solar Engineering, Proc. of ASME, 1993, Solar Engineering, Proc. of ASME.
- *Optical performance of a solar dish concentrator/receiver system*:. Xu, Guoqiang, y otros. 10 de Marzo de 2016, Energy, págs. 95-107.
- *Optical performance evaluation of a 2-D and 3-D novel hyperboloid solar concentrator*. Mallick, Tapas K, y otros. 25 de Septiembre de 2010, ResearchGate, págs. 25-30.
- *Solar parabolic dish Stirling engine system design, simulation, and thermal analysis*. Zakaria Hafez, Ahmed , y otros. 15 de Junio de 2016, Energy Conversion and Management, págs. 60-75.

