

ENERGÍA SOLAR TÉRMICA DE CONCENTRACIÓN, TECNOLOGÍA EFICIENTE, SUSTENTABLE Y GESTIONABLE EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

Luis Martorelli

Laboratorio de Óptica calibraciones y Ensayos, FCAG-UNLP
Centro de Investigaciones en Metrología y calidad CIC

Resumen:

El moderno concepto que se aplica hoy a las energías renovables, por el cual éstas deben ser eficientes, limpias y gestionables, tiene su máximo exponente en la energía solar térmica de concentración. (ESTC). Este tipo de tecnología solar es la única gestionable durante veinticuatro horas continuas, con un 75 % del valor agregado en productos de industria nacional. Utilizando el almacenamiento de sales térmicas desde el año 2012, la Universidad Nacional de La Plata y la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Bs As a través de sus laboratorios LOCE y CEMECA vienen desarrollando varios proyectos de I+D+i, en generación de energía eléctrica y calor de proceso industrial con esta tecnología. En este trabajo se muestran los estudios realizados en: diseños experimentales, materiales nacionales, métodos de determinación y medición, áreas de solarimetría accesibles, así como aplicaciones en el campo de la generación de energía eléctrica y el calor de proceso industrial. La plataforma solar de Almería (PSA) Almería, España, es el centro de desarrollo tecnológico para la investigación de equipos, tecnologías y referencias en estas tecnologías con el cual la UNLP, ha firmado programas de capacitación y formación de RRHH, así como un programa específico de la Red CyTED para el desarrollo de sistemas de ESTC combinando híbridos de biomasa

Palabras clave: heliotérmica * plantas solares * ópticas * calor de proceso

1. Introducción

El Gobierno Nacional ha lanzado el desafío de que la capacidad instalada en renovables o sustentables, para finales del año 2017, debería ser del 8% y para el año 2020 del 20%. Éstas cifras son poco probables de alcanzar en las condiciones actuales de importación y casi nula participación de la industria nacional. La política actual que ha llevado a las licitaciones 2016 y 2017, Renovar; Ronda 1.0 y Ronda 1.5, ha destinado cifras del orden de 1200 Mw totales, en Energía Solar para el año 2019 (1). A pesar de este empuje y de la urgencia de los plazos, hay un fuerte atraso en el desarrollo tecnológico científico y en el sistema industrial nacional en este tipo de sustentables. De igual manera, no se han establecido aun los programas sistemáticos a nivel nacional de formación académica para nuevos profesionales en estos campos. La ESTC si bien es un área de las renovables con más de 30 años de experimentación a nivel mundial, en nuestro país su desarrollo es demasiado pequeño e incipiente. La industria nacional tendría en estas tecnologías un

nuevo campo de desarrollo, fuentes de formación de recursos humanos y fuertes aplicaciones en la región de América latina. Los proyectos de ESTC o heliotérmica que se están desarrollando en ambos laboratorios de la UNLP y la CIC, nos permiten determinar que este tipo de energía sustentable, es un moderno campo de desarrollo tecnológico para el país, ya que abre nuevas áreas de gestión industrial, recursos humanos, ingeniería de diseño, macroeconomía en renovables, gestionabilidad, durabilidad de 30 años y especialmente, nula contaminación ambiental al cabo de su ciclo de vida.

2. Objetivos

El presente trabajo tiene como finalidad mostrar los avances que se han hecho en ESTC en los laboratorios LOCE-FCAG de la UNLP, y CEMECA de la CIC, que permiten actualmente evaluar y determinar las posibles zonas de aplicación directa e indirecta de estas tecnologías en función de la radiación solar existente, la evaluación de los materiales nacionales posibles, tanto de reflexión, concentración, absorbancia y generación de focos térmicos, así como los métodos de medición térmicos y ópticos. Por otro lado, estos trabajos nos llevaron a analizar las falencias existentes en la determinación de radiación solar directa en nuestro país, y la escasa o casi nula verificación de tecnología posible para el desarrollo de normas vigentes de aseguramiento de la calidad técnica y de gestión en este tipo de plantas solares térmicas.

3. Historia

Los primeros diseños teóricos y prácticos con investigaciones novedosas en el desarrollo de equipos propios para la producción de energía eléctrica con colectores solares, se remontan a los años 1977 y 1978 con el grupo de Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)(2). En aquel momento se desarrolló un equipo unitario de superficies ópticas de revolución para unidades habitacionales estándares. Uno de los impulsores más fervientes fue el Dr. Ricardo Platzeck, (2) quien sentó las bases del estudio óptico, análisis de materiales y capacitaciones regionales en aquel momento. A pesar de los buenos resultados encontrados, este tipo de tecnología, nunca se transfirió al sistema productivo nacional, como sí se hizo en países de la Unión Europea y América del Norte (3).

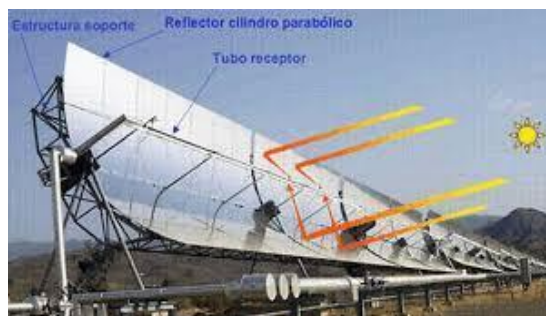


Figura 1. Colector cilíndrico parabólico



Figura 2. Torre solar Gemasolar, Sevilla 20MW.

La ESTC se divide en cuatro grandes tecnologías, basadas en la óptica de concentración (4 - 6) a- Sistemas de geometría cilíndrica parabólica, b- Sistemas de torre c.-Sistemas facetados de Fresnel y d- Parábolas de concentración de foco puntual.

Recién en los años 2008 y 2009 se ha comenzado a experimentar con sistemas ópticos de concentración tanto Fresnel (Universidad Nacional de Salta) y parabólicos con Stirling (Universidad Nacional de la Plata y el Instituto Universitario Aeronáutico de Córdoba). Desde el año 2012, la UNLP y la CIC, han trabajado en conjunto en tres tipos diferentes de energía solar ESTC a fin de lograr tanto generación eléctrica como calor de proceso.

A lo largo de estos proyectos se ha logrado diseñar y construir varios concentradores ópticos solares, cuyas dimensiones van desde 1,5 hasta 5 metros de diámetro (4),(5). Con sistemas parabólico, y motor Stirling, convertía, la energía calórica en mecánica, acoplado a un generador eléctrico del orden de 3 A 5 kW/h (6,7). Por otro lado el desarrollo de varios concentradores cilíndricos parabólicos CCP de 2 a 24 m², parabólicos acoplados a sistemas híbridos de biomasa, permitirán obtener energía eléctrica por vapor sobrecalentado y calor de proceso industrial, alcanzando temperaturas del orden de 300 a 400 °C..



Figura 3. Prototipo de concentrador óptico con motor Stirling, área colectora 12 m² - 5 Kw. UNLP-CIC

4.0 Metodología

4.1 Análisis de Solarimetría en la República Argentina

La instalación de sistemas para el uso de energía solar, cualquiera fuesen estos, deberá siempre contar con un control específico y determinación de la solarimetría regional. El Servicio Meteorológico Nacional, no posee una distribución completa a lo largo del territorio nacional de valores genuinos y estadísticos sobre solarimetría. En nuestro caso de ESTC es conveniente determinar radiación solar directa, (escasas determinaciones). Por el momento los mapas solares de la República Argentina se han realizado con aportes del SMN, la Comisión de Nacional de Asuntos Espaciales CNAE, la NASA y empresas del agro privadas e internacionales así como de la UN Luján (Gersolar).

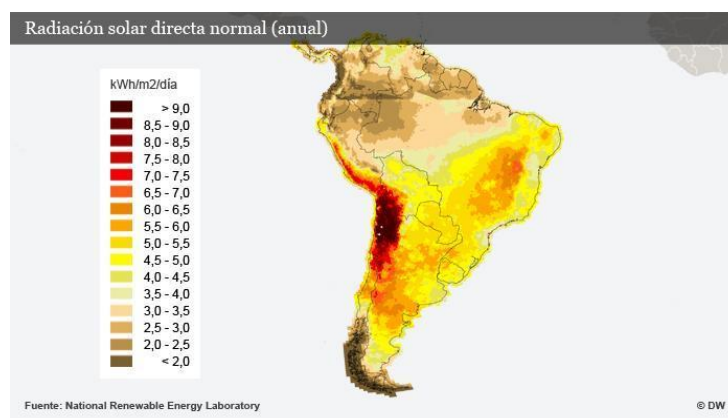


Figura 4. Regiones de solarimetría en América del Sur. C Solar 1367 Wm²

En la figura 4 se observan las zonas de América del Sur con los índices de radiación solar más altos del mundo en Atacama, Jujuy, y Salta. La Constante Solar es de 1.367 Wm². En la región de Atacama se han registrado valores del orden de 1.250 Wm².

Actualmente en la Republica de Chile los programas de generación de energía eléctrica con este tipo de ESTC están llevando adelante la construcción de tres plantas solares de torre, que inyectarán a la red una sumatoria de 600 MW. La figura 2 muestra el mapa solar de la Argentina y en la tabla I se describen los promedios de radiación existentes en cada zona, aptos para la instalación de diferentes tipos de sistemas de concentración óptica.

La distribución en gran escala de las áreas de solarimetría definidas en la figura 2, se representan en áreas del territorio y su promedio diario en la Tabla I. Los datos corresponden a análisis estadísticos combinados entre datos satelitales y terrestres.



Figura 2. Regiones de solarimétricas en la República Argentina

Para un estudio serio y preciso en zonas elegidas para este tipo de instalaciones es determinante realizar un año de observaciones solarimétricas de radiación directa con Pirheliómetros con seguimiento solar automatizados.

Región	km ² Aprox	Radiación	Regiones del país
1	150.000	1.200 Wh/m ²	NOA / Cuyo
2	250.000	1.000 Wh/m ²	Centro /Cuyo/ Patagonia
3	300.000	850 Wh/m ²	Centro / NEA
4	300.000	650 Wh/m ²	Mesopotamia- Pampeana

Tabla I. Distribución aproximada de radiación solar incidente en las cuatro regiones del país

4.2 Determinación del diseño experimental.

En todo sistema óptico concentrador la cónica geométrica esta definida por alguna superficie de revolución, las variables principales que deben ser consideradas en el plano focal serán (11) (12) (20) (21):

1- Razón de concentración:

$$R_{cr} = A1/A2 \quad (1)$$

Donde $A1$ es el área del colector principal, y $A2$ es el área del plano focal de concentración.

2- Intensidad de radicación sobre el plano focal:

$$I_f = e \omega I_d(n, \Theta, h). R_{cr} \quad (2)$$

Donde n es la fecha en días julianos de observación solar, Θ es el ángulo de apartamiento del Sol del zenit del lugar y h es la altura sobre el nivel del mar.

- 3- **I_d : Valor de la radiación solar directa:** es un dato entregado por el sistema meteorológico local, o en su defecto por un piranómetro colocado en el lugar de detección. En nuestro caso por Servicio Meteorológico Nacional de Argentina
- 4- **w : Valor de pérdida por reflexión.** Valor que determina la absorbancia y transmitancia de los materiales cristalinos de reflexión.
- 5- **e : Valor de absorción de radiación por atmosfera.** Este valor está determinado por la altura sobre el nivel del mar, y las condiciones de visibilidad solar en tiempo real.

6- **Razón focal del sistema:**

$$F = f/D1(3)$$

Donde $D1$ es el diámetro del colector y f es la distancia focal del sistema. En aplicaciones de concentración solar con diseños de ópticas de revolución se tiene un valor aceptado para la razón focal comprendido entre: $0,7 < F < 0,6$.

- 7- **Propiedades ópticas y mecánicas del sistema:** dependen del tipo de materiales cristalinos reflectivos utilizados, y de los errores de movimiento y seguimiento solar de los motores de desplazamiento.

La razón de concentración (R_{cr}) de la ecuación (1) determina el factor de energía que se concentrará en el plano focal. Esto definirá tanto el tamaño del receptor acoplado al motor Stirling, para el caso de generación de energía eléctrica, como el plano focal específico para la concentración en el horno solar. La generación de una curva de revolución parabólica o esférica considerando la ecuación (3) de la razón focal, define el tamaño del plano focal. Este punto es determinante para la relación de irradiación en dicho plano, y la temperatura deseada para la eficiencia del sistema concentrador

4.3 Determinación de la figura de revolución óptica del prototipo.

Para el caso que nos ocupa, se aplicaron los principios teóricos utilizados en la generación de una cónica de revolución, idénticos a los aplicados en el diseño y construcción de sistemas reflectores ópticos astronómicos (9).

Para ello, evaluando el tamaño del plano focal deseado y las dimensiones geométricas estructurales del concentrador prototipo, definimos $F \leq 0,70$. Determinando las variables ópticas descriptas, se experimentó con un número dado de superficies cónicas con diámetros entre 1.5 y 5 metros y razones de concentración diferentes según la aplicación de concentración buscada en el foco térmico.

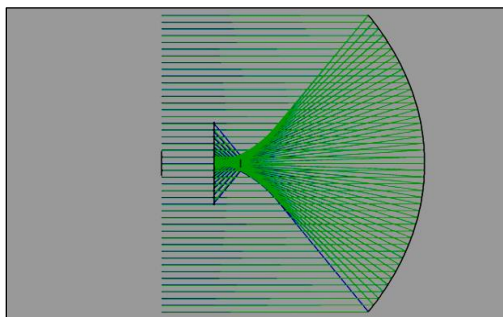


Figura 3: Trazado de rayos en el sistema óptico esférico. $b=0$

En la figura 3, se aprecia la forma de una cónica de revolución parabólica, con constante de deformación $b=-1$, con la mayor concentración en un plano focal de pequeñas dimensiones, lo cual produciría temperaturas muy elevadas, ideales para el caso del horno solar en diámetros mayores de 5 metros. Éstos sistemas son ideales para ser utilizados en estudios metalúrgicos o calorimétricos, debido a la altísima concentración (Tabla II). Para ello se utilizó un programa de diseño óptico (programa *ZEMAX-EE Optical Desing Program 2005*).

$D_1=1,50$ m		$D_1=5$ m	
$A_1=1,80$ m^2		$A_1=20$ m^2	
D_2 m	A_2 m^2	Rc_1	Rc_2
0,12	0,0118	152	1700
0,10	0,0078	257	2564
0,08	0,0050	362	4000
0,06	0,0028	642	7150
0,04	0,0012	1500	16500

Tabla II: valores de Rcr , en función del diámetro del colector D_1 y del plano focal D_2 . A_1 y A_2 áreas.

5. Análisis realizados

En los diferentes proyectos que hemos analizado y que se desarrollan a nivel mundial se ha observado el uso de una gama de materiales reflectivos para los concentradores como aceros pulidos, aluminios pulidos, películas reflectantes y materiales vítreos entre otros. En este proyecto y en los prototipos construidos, nos inclinamos por los materiales vítreos nacionales, por tres razones:

- El bajo deterioro y la alta durabilidad de los mismos frente al medio ambiente al que están expuestos.
- Factor económico positivo en materiales nacionales.
- Experiencia con este tipo de materiales del grupo de Energía Solar del LOCE-FCAG-UNLP. y CEMECA –CIC

Considerando que en la tecnología de concentradores solares vítreos, el material es desarrollado en pocos países del mundo, (EEUU-España y Alemania), estudiamos y determinamos la factibilidad de los materiales nacionales.

Una de las primeras experiencias que se llevaron a cabo en el LOCE-CEMECA fue confirmar la reflectividad y transmitancia de estos materiales cristalinos. Una de las variables ópticas que más afectan en este tipo de elementos es la absorción (A_b) dentro del propio material. Existiendo dos cuestiones de peso a

considerar, por un lado la merma en el porcentaje de intensidad de radiación en el plano focal y por otro el deterioro del propio material, frente a acciones meteorológicas y climáticas a la que se ven expuestos. Se analizaron además variables de seguimiento solar, radiación local, determinaciones tridimensionales de focos calóricos puntuales y lineales así como variaciones térmicas en calorimetría de concentración (22).

Nuestro trabajo, consiste en:

1. Buscar los diseños ópticos más aptos de cónica de revolución.
2. Comparar los parámetros de reflexión y transmisión en materiales ópticos.
3. Evaluar y analizar curvas térmicas en los planos tridimensionales de los prototipos construidos (2) (3).
4. Evaluar la curvatura, flexión y deformaciones de las ópticas de reflexión.
5. Verificar las superficies mecánicas en las monturas de soporte.
6. Aplicar y determinar normativas ⁽²⁾ ⁽³⁾ nacionales e internacionales en la verificación de eficiencia térmica.
7. Efectuar las comparaciones de concentración térmica focal, en función de la época del año.
8. Verificar la energía de concentración en función de la solarimetría local.
9. Diseñar plantas solares de pequeño porte con sistemas híbridos para generación eléctrica o calor de proceso (11) (12).
10. Capacitar y formar especialistas en la temática ESTC.

6. Conclusiones

Los sistemas analizados y desarrollados de ESTC en los programas de la UNLP, y CIC desde los Laboratorios LOCE y CEMECA han permitido hoy llegar a las siguientes conclusiones:

- La República Argentina no cuenta con mediciones o determinaciones solarimétricas en el campo de la radiación directa (sí hay global). Esto obliga al sistema de Ciencia y Tecnología (C y T) a desarrollar programas que permitan determinar y asegurar las mediciones de radiación solar precisa

- Los sistemas reflectivos para ESTC, utilizan materiales vítreos del tipo cristal, por ser los de mayor eficiencia y durabilidad en el tiempo. En nuestro país la industria del vidrio tendría una enorme fuente de aplicaciones (centrales de torre para 20 MW utilizan 350.000 m² de vidrio tratado).

La República Argentina cuenta con enorme radiación solar en 6 provincias de la zona de Cuyo y del NOA, y con 5 más para la combinación con sistemas híbridos utilizados para la generación de calor de proceso industrial. Una Planta de generación de 20 MW de energía eléctrica puede ser hoy perfectamente diseñada, desarrollada y construida en un 80% con la industria nacional. Estas plantas además permitirán descentralizar los actuales polos económicos, industriales y poblacionales creando nuevas economías regionales hasta 1.500 km de la Planta Solar propiamente dicha

Como ejemplo detallamos el diseño básico de una Planta Solar para 20 MW (20.000 habitantes)

- e- Un campo de aproximadamente 350 hectáreas
- f- 300.000 m² de cristal reflectivo en segunda superficie
- g- 320 km de caños acerados de transporte de fluido térmico.
- h- 30.000 Tn de sales frías (única vez)
- i- 1.000 Tn de hierros acerados para soportes.
- j- 100 bombas de empuje-
- k- Dos tanques de 30.000 m³ para sales frías y calientes.
- l- Turbina de 20 MW con vapor sobrecalentado.

- m- 2000 personas para el montaje y 400 para su funcionamiento y mantenimiento. Del orden de 40 industrias en obra.
- n- Trabajos sistemáticos: limpieza de los cristales, control del seguimiento solar, control de presión y temperaturas en las cañeras del fluido. Turbina y generación en horas nocturnas

- o- Tiempo de vida útil, del orden de 30 años.
- p- Contaminación nula

- q- Aplicación y verificación de normas en la industria, y en los laboratorios de calibraciones y ensayos bajo ISO 17025/IRAM301 en ópticas, térmicos, eléctricos, vapor y químicos Seguridad industrial e ingeniería de diseño. ISO 9806.



Fig. 5 - **Planta** Heliostatos para Torre Solar

Tabla II. Componentes y requisitos de materiales para los sistemas de plantas solares de cilindros concentradores y sistemas de torre. Breve resumen.

N	Componente	Materia prima	Requisitos específicos	Requisitos de habilidad industrial	Recursos humanos
1-	Soportes o pie de apoyos	Concreto base de apoyo o pilar	A definir según modelos	Equipamiento técnico básico. Instalación estándar	Personal técnico
2-	Pilares , o pie de apoyo del conjunto	Acero estándar	Ídem anterior	Equipamiento técnico básico	Personal técnico
3-	Controlador de seguimiento solar en uno o dos ejes	Acero, motores eléctricos, servos, sistemas hidráulicos	Alta precisión, alta durabilidad confiables	Fabricación precisa y de alta calidad, confiables	Personal experimentado
4-	Sistemas de Sof y control electromecánico	Sensores , componentes electrónicos	Alta precisión, fiabilidad	Fabricación de exactitud, durables en el tiempo. Tecnología	Personal calificado uso y seguimiento
5-	Ópticas de concentración	Vidrio, alta reflexión, capa de plata y varias capas de cobre y laca	Durabilidad y alta reflectividad	Tecnología de cristal Exactitud, precisión	Personal calificado
6-	Conexiones de todos los sistemas	Cables, simples, especiales	Fabricación estándar	Equipo de cable estándar	Personal calificado
7-	Cabezales y tubos del absorbedor	Aleaciones de alta temperatura de 450 a 1.100 °C	Diseño de larga vida útil (ciclos térmicos, fluidez...)	Servicios de ingeniería y construcción	Personal calificado
8-	Plomería, cañerías, ensambles	Acero, bombas aleaciones de alta temperatura	Alta presión, compensación de la dilatación térmica	Servicios de ingeniería y construcción	Personal calificado
9-	Fluido de transferencia de calor	Agua salada, salitre.	Pureza de los líquidos	Procesamiento de materiales, control de calidad	Personal calificado
10-	Almacenamiento	Bombas de almacenamiento.	Sistemas libres de pérdidas a mediano plazo	Sistemas estándar básicos de almacenamiento	Personal calificado
11-	Vapor a Eléctrica calor de proceso	Ciclos Rankin o Brayton	Vapor sobrecalentado 280 °C	Turbina. Sistema de recuperación.	Personal calificado
12-	Conexión red	Cableado para determinada energía	Torres y sistemas interconectados	Central de transformación	Personal calificado

Tabla IV – Comparación entre plantas de ESTC, Nuclear y Fotovoltaica

Tipo de Planta	Potencia Mw	Horas por día (prom.)	Área ocupada	Viviendas beneficiadas	RRHH directos e indirectos	Costo en Millones U\$S	Vida útil años
Nuclear Patagonia	1100	24	400 ha	340.000	Alta calidad 2500 a 3000	10.000	20 TC 15
Fotovoltaica Salta. S.A. Cobres	100	14 <u>10 h</u> <u>otros</u>	300 ha <u>Red Inter</u>	33000	300	150 <u>100</u>	12 TC 2
ESTC-Torre o CCP Fresnel	20 200 a 350	24 24 Hibrido Biomasa	3 Km diámetro 1 ha	7000 Plantas industriales calor de proceso	800 a 2000 50	200 1 A 10	30 TC 3

Referencias bibliográficas.

- [1] Energía Argentina S.A, Enarsa.
- [2] Nicolás R, Platzeck R. *et al.* Concentrador cilíndrico fijo a espejo facetado para aprovechamiento de la Energía Solar. Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina. 1978.
- [3] Las centrales eléctricas de colectores cilíndricos parabólicos. Andasol. Documento Solar Millenium de Andasol. España. 2011.
- [4] Energía solar termoeléctrica. Pasos firmes contra el cambio climático. Documento Greenpace. 2009.
- [5] Energía solar térmica de concentración. Perspectivas. 2009-2014. Documento Greenpeace. 2009.
- [6] Stine William B, Diver RB. A compendium of solar dish/Stirling Technology. California State Polytechnic University, 1994.
- [7] EuroDish – Stirling system description. Schlaich PS Almería, 2003
- [8] Romero Álvarez M. Energía solar termoeléctrica. Plataforma Solar de Almería, 2006.
- [9] Winston R, Enoch J M. Spie some basic ideas in concentrators optics, 1990.
- [10] Lozada San José J. Análisis de un sistema de disco parabólico con motor *Stirling*. Tesina Universidad Carlos III de Madrid. Ingeniería Industrial 2009.
- [11] Quinteros Grijalva J. Estudio teórico y experimental de colector solar parabólico para generación de energía eléctrica; 2008. Chile.
- [12] Venegas Reyes E. Sistema para generación y almacenamiento de calor de proceso mediante un concentrador solar de foco puntual. 2008. México.

- [13] Ruelas Ruiza JE, Velázquez Limónb N, Beltrán Chacónc R. Diseño de un concentrador solar acoplado a un motor *Stirling* fijo. 2011. México
- [14] Martorelli L. *et al.* Sistemas de concentradores ópticos para energía solar evaluaciones térmicas en focos calóricos tridimensionales. XXXVIII Jornadas IRAM Universidades. 2013.
- [15] Martorelli L, *et al.* Análisis y evaluación de variables ópticas en el desarrollo de concentradores solares ópticos para la generación de energía eléctrica. XXXVI Jornadas IRAM Universidades, 2012.
- [16] Romero Álvarez M. Energía Solar termoeléctrica. Plataforma Solar de Almería, 2006.
- [17] www.youtube.com/ Luis Martorelli Energia Solar térmica