

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

L. C. Martorelli, D. Panaroni, C. Álvarez Martini, L. Corujo, M. Abal Matos, M. Mujica, F. Cervini*

Centro de Investigaciones en Metrología y Calidad (CEMECA)
Laboratorio de Óptica, Calibraciones y Ensayos (LOCE)
laboratorio@cemecacic.com

RESUMEN

El moderno concepto que se aplica hoy a las energías renovables, por el cual estas deben ser eficientes, limpias y gestionables, tiene su máximo exponente en la energía solar térmica de concentración. Este tipo de tecnología solar es la única gestionable las veinticuatro horas continuas, con un 75 % del valor agregado en productos de industria nacional. Se utiliza para ello, 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 Buenos Aires, a través de sus laboratorios LOCE y CEMECA, vienen desarrollando varios proyectos de I+D+i¹ en generación de energía eléctrica y calor de proceso industrial con esta tecnología. En este trabajo, se muestran los estudios hechos en: diseños experimentales, materiales nacionales, métodos de determinación y medición, áreas de solarimetría accesibles, así como aplicaciones posibles. La Plataforma Solar de Almería, en España, es un 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 recursos humanos, así como un programa específico de la Red CyTED, para el desarrollo de sistemas de energía solar térmica de concentración combinando híbridos con biomasa.

Palabras clave: heliotérmica, plantas solares, ópticas, calor de proceso.

* Centro de Investigaciones en Metrología y Calidad (CEMECA): L. C. Martorelli, D. Panaroni, C. Álvarez Martini, L. Corujo. Laboratorio de Óptica, Calibraciones y Ensayos (LOCE), Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata: L. C. Martorelli, D. Panaroni, M. Abal Matos, M. Mujica, F. Cervini.

¹ Investigación, desarrollo e innovación (I+D+i).

INTRODUCCIÓN

El Gobierno Nacional ha lanzado el desafío de que la capacidad instalada en energías renovables o sustentables, para finales del año 2017, deberá ser del 8 %, y para el año 2020 del 20 %. Cifras poco probables de alcanzar en las condiciones actuales de desarrollo tecnológico y una casi nula participación de la industria nacional. La política actual, que ha llevado a las licitaciones 2016 y 2017 de RenovAr (Ronda 1.0 y Ronda 1.5), ha destinado alrededor de 1200 MW totales en energía solar para el año 2019 (Saravia, 2007). A pesar de este empuje y de la urgencia de los plazos, hay un fuerte atraso en el desarrollo científico y en el sistema industrial nacional en este tipo de sustentables. De igual manera, no se han establecido programas sistemáticos de formación académica para nuevos profesionales en estos campos. La energía solar térmica de concentración (ESTC), si bien es un área de las renovables con más de treinta años de experimentación a nivel mundial, en nuestro país su desarrollo es demasiado pequeño e incipiente. La industria tendría en estas tecnologías un nuevo campo de crecimiento en formación de recursos humanos y en 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 aplicación que abre nuevas áreas de gestión industrial, recursos humanos, ingeniería de diseño, macroeconomía en renovables, gestionabilidad y especialmente una nula contaminación ambiental al cabo de su ciclo de vida.

OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como finalidad mostrar los avances que se han hecho en ESTC, que permiten actualmente evaluar y determinar las posibles zonas de aplicación directa e indirecta de estas tecnologías, en función de la radiación solar existente y la evaluación de los materiales nacionales, tanto de reflexión y de concentración, como de absorción. Otro de los objetivos, es 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 técnicas vigentes de aseguramiento de la calidad y de gestión en este tipo de plantas solares.

HISTORIA

Los primeros diseños teóricos y prácticos con investigaciones novedosas en el desarrollo de equipos propios para la producción de energía eléctrica con esta técnica se remontan a los años 1977 y 1978 con el grupo de Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) (Nicolfis *et al.*, 1978). En aquel momento, se trabajó con superficies ópticas de revolución para unidades habitacionales estándares. Uno de los impulsores más fervientes fue el Dr. Ricardo Platzeck, quien sentó las bases del estudio óptico, el análisis de materiales y capacitación. 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 (Greenpeace, 2009).

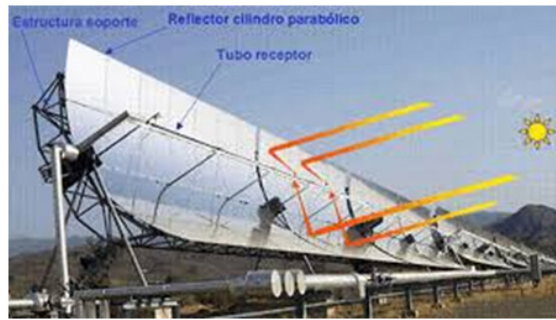


Figura 1. Colector cilíndrico parabólico

La ESTC se divide en cuatro grandes tecnologías basadas en la óptica de concentración (Greenpeace, 2009; Stine y Diver, 1994; Álvarez, 2006): a) sistemas de geometría cilíndrica parabólica (figura 1); b) sistemas de torre (figura 2); c) sistemas facetados de Fresnel; d) parábolas de concentración de foco puntual (figura 3).



Figura 2. Torre solar Gemasolar Sevilla 20 MW

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

Para ello, ambos laboratorios han diseñado, desarrollado y puesto en banco de prueba varios concentradores parabólicos de 1,5 metros a 4 metros de diámetro, utilizando varios sistemas de determinación y verificación en los focos de concentración como son motores Stirling, calorímetros, planos con termocupla (Winston, 1978) (figura 3). Por otro lado, el desarrollo de varios concentradores cilíndricos parabólicos (CCP) de 2 a 24 m² (Losada, 2009), acoplados a sistemas híbridos de biomasa, permitirán obtener energía eléctrica por vapor sobrecalentado, que alcanzará temperaturas de entre 300 y 400 °C.

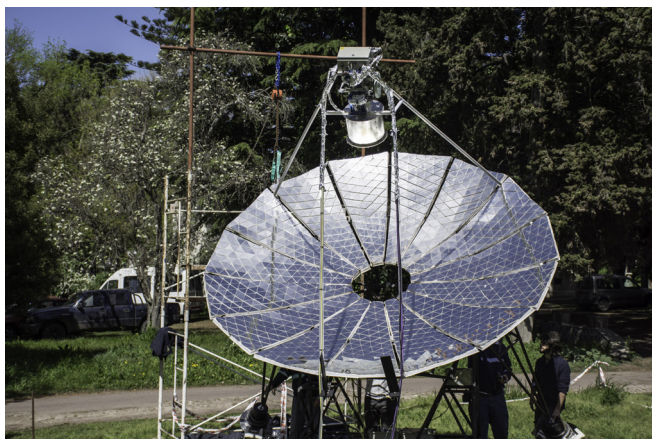


Figura 3. Prototipo de concentrador óptico con motor Stirling. Área colectora 12 m² - 5 kW. UNLP-CIC

METODOLOGÍA

Análisis de solarimetría en Argentina

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

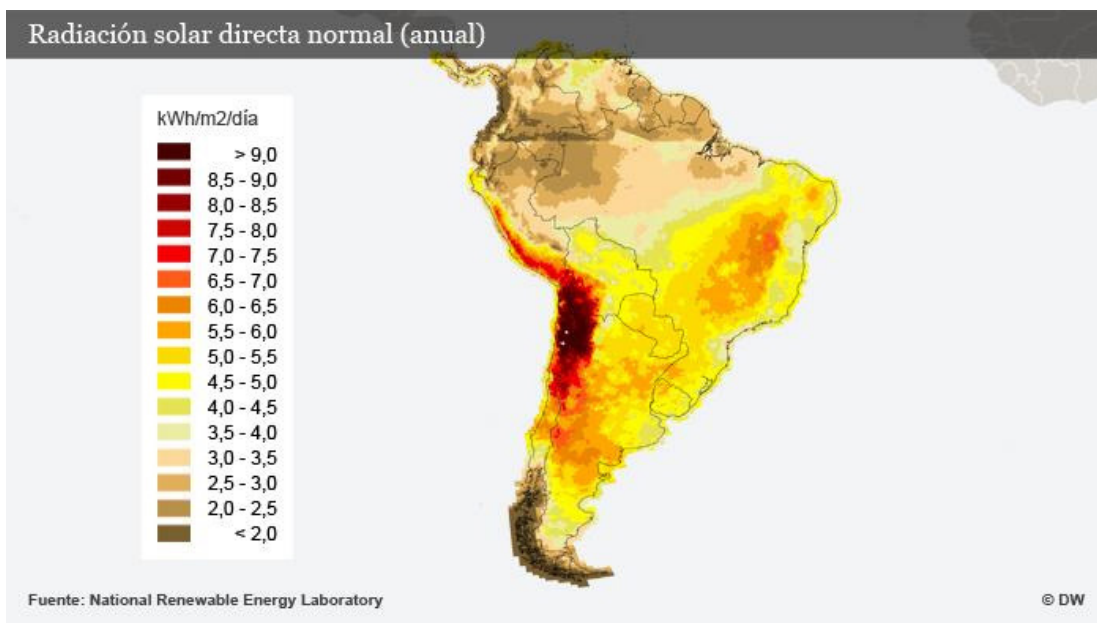


Gráfico 1. Regiones de solarimetría en América del Sur. C Solar 1367 W/m²

En el gráfico 1, se observan las zonas de América del Sur con los índices de radiación solar más altos del mundo en Atacama, Jujuy y Salta. Siendo la constante solar 1367 W/m^2 , en la región de Atacama se han registrado valores del orden de 1250 W/m^2 . Actualmente en la república de Chile, a través de los programas de generación de energía eléctrica con este tipo de ESTC, se está llevando adelante la construcción de tres plantas solares de torre, que inyectaran a la red una sumatoria de 600 MW. El gráfico 2 muestra el mapa solar de la Argentina, desarrollado en nuestros proyectos durante los años 2015 y 2016, y en la tabla 1 se describen los promedios de radiación existentes en cada zona, determinados estadísticamente aptos para la instalación de diferentes tipos de sistemas de concentración óptica.



Gráfico 2. Regiones solarimétricas en la República Argentina

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

Región	Km ² aprox.	Radiación	Regiones del país
1	150 000	1200 Wh/m ²	NOA/Cuyo
2	250 000	1000 Wh/m ²	Centro/Cuyo/Patagonia
3	300 000	850 Wh/m ²	Centro/NEA
4	300 000	650 Wh/m ²	Mesopotamia/Región Pampeana

Tabla 1. Distribución aproximada de radiación solar incidente en las cuatro regiones del país

Determinación del diseño experimental

En todo sistema óptico concentrador, la cónica geométrica está definida por alguna superficie de revolución; las variables principales que deben ser consideradas en el plano focal serán (Ruelas Ruiz *et al.*, 2011; Martorelli, *et al.*, 2013):

- a. Razón de concentración:

$$R_{cr} = A_1/A_2 \quad (1)$$

Donde A_1 es el área del colector principal, y A_2 es el área del plano focal de concentración.

- b. Intensidad de radiación sobre el plano focal:

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

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.

- c. 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, el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina.

- d. ω : valor de pérdida por reflexión. Valor que determina la absorbancia y transmitancia de los materiales cristalinos de reflexión.

- e. e : Valor de absorción de radiación por atmósfera. Este valor está determinado por la altura sobre el nivel del mar y las condiciones de visibilidad solar en tiempo real.

- f. Razón focal del sistema:

$$F = f/D_1 \quad (3)$$

Donde D_1 es el diámetro de apertura 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: $0,7 < F < 0,6$.

- g. 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 6 de la razón focal, define el tamaño del plano focal. Este punto es determinante para la relación entre la irradiación en dicho plano y la temperatura deseada para la eficiencia del sistema concentrador.

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 (Quinteros Grijalva, 2008). 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 descritas, 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.

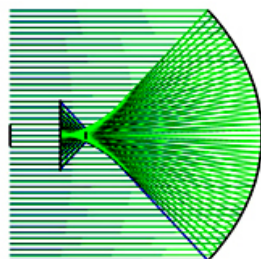


Gráfico 3. Trazado de rayos en el sistema óptico esférico. $b = 0$

En el gráfico 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, que genera muy altas temperaturas, ideales para el caso de hornos solares. En diámetros mayores a 5 metros, estos sistemas son ideales para ser utilizados en estudios metalúrgicos o calorimétricos, debido a la altísima concentración (tabla 2). Para ello se utilizó un programa de diseño óptico (programa ZEMAX-EE Optical Desing Program 2005) (Martorelli, 2012, 2013).

$D_1 = 1,50 \text{ m}$		$D_1 = 5 \text{ m}$	
$A_1 = 1,80 \text{ m}^2$		$A_1 = 20 \text{ m}^2$	
$D_2 \text{ m}$	$A_2 \text{ m}^2$	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	16 500

Tabla 2: valores de Rcr , en función del diámetro del colector D_1 y del plano focal D_2 . A_1 y A_2 áreas

RESULTADOS

En laboratorio hemos analizado el uso de diferentes tipos de materiales reflectivos para los concentradores, como aceros y aluminios pulidos, películas de polipropileno y polietileno reflectantes y materiales vítreos. Para los prototipos construidos, utilizamos materiales vítreos nacionales, por tres razones:

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

Por otro lado, los resultados nos permitieron:

1. Buscar los más aptos diseños ópticos 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 (Nicolfis, 2011; Greenpeace 2009).

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 (Nicolfis, 2011; Greenpeace 2009) 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 (Ruelas Ruiz, 2011; Martorelli *et al.*, 2013).
10. Capacitar y formar especialistas en la temática ESTC.

CONCLUSIONES

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

- La República Argentina no cuenta con mediciones o determinaciones solarimétricas en el campo de la radiación solar directa.
- Los sistemas reflectivos para ESTC utilizan materiales vítreos del tipo cristal, por ser los de mayor eficiencia y durabilidad en el tiempo. Los resultados demuestran que, en Argentina, la industria del vidrio tendría una enorme fuente de aplicaciones (centrales de torre para 20 MW utilizan 350 000 m² de vidrio tratado).
- El territorio nacional cuenta con enorme radiación solar en seis provincias de la zona de Cuyo y del NOA, y con cinco más para la combinación con sistemas híbridos utilizados para la generación de calor de proceso industrial (gráfico 2). Una planta de generación de 20 MW de energía eléctrica puede ser perfectamente diseñada, desarrollada y construida en un 80 % con la industria local. Estas plantas además permitirán descentralizar los actuales polos económicos, industriales y poblacionales, al crear nuevas economías regionales hasta 1500 km de la planta solar propiamente dicha.
- Nuestro trabajo se ha centrado, además, en el diseño de una planta solar de torre para 20 MW (20 000 habitantes, figura 4), que se detalla brevemente a continuación:
 - a. Un campo de aproximadamente 350 hectáreas.
 - b. 300 000 m² de cristal reflectivo en segunda superficie.
 - c. 320 km de caños acerados de transporte de fluido térmico.
 - d. 30 000 Tm de sales frías (única vez).
 - e. 1000 Tm de hierros acerados para soportes.
 - f. 100 bombas de empuje.
 - g. Dos tanques de 30 000 m³ para sales frías y calientes.
 - h. Turbina de 20 MW con vapor sobrecalentado.
 - i. 2000 personas para el montaje y 400 para su funcionamiento y mantención. Alrededor de 40 industrias en obra.
 - j. Trabajos sistemáticos: limpieza de los cristales, control del seguimiento solar, control de presión y temperaturas en las cañerías del fluido. Turbina y generación en horas nocturnas.

- k. Tiempo de vida útil, alrededor de 30 años.
- l. Contaminación nula.
- m. Aplicación y verificación de normas en la industria y en los laboratorios de calibraciones y ensayos bajo ISO 17025/IRAM301 en el campo óptico, térmico, eléctrico, de vapor, químico, de seguridad industrial y de ingeniería de diseño.

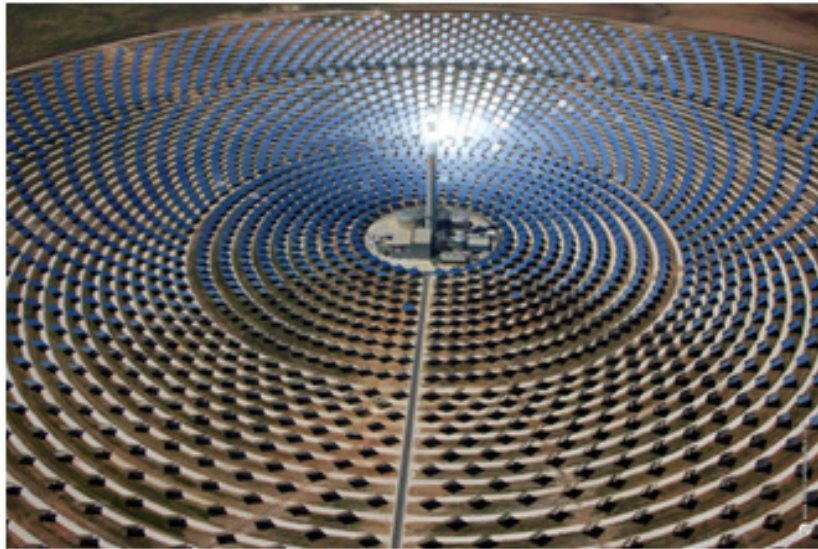


Figura 4. Planta helióstatos para torre solar

Tipo de Planta	Potencia MW	Horas por día (prom.)	Área ocupada	Viviendas beneficiadas	RR. HH. directos e indirectos	Costo en millones U\$S	Vida útil en 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 10 h otros	300 ha Red Inter	33 000	300	150 100	12 TC 2
ESTC-Torre o CCP Fresnel	20 200 a 350	24 24 Híbrido Biomasa	3 Km diámetro 1 ha	7000 Plantas industriales, CALOR DE PROCESO	800 a 2000 50	200 1 A 10	30 TC 3

Tabla 3. Comparación entre plantas de ESTC, nuclear y fotovoltaica

N	Componente	Materia prima	Requisitos específicos	Requisitos de habilidad industrial	Recursos humanos
1-	Soportes o pie de apoyo.	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.	A definir según modelos.	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 <i>software</i> 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 y especiales.	Fabricación estándar.	Equipo de cable estándar.	Personal calificado.
7-	Cabezales y tubos del receptor.	Aleaciones de alta temperatura de 450 a 1100 °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 Rankine 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 4. Componentes y requisitos de materiales para los sistemas de plantas solares de cilindros concentradores y sistemas de torre. Breve resumen

BIBLIOGRAFÍA

- GREENPEACE (enero, 2009). "Pasos firmes contra el cambio climático". *Revista Green*, pp. 9-11.
- LOSADA SAN JOSÉ, J. (2009). *Análisis de un sistema de disco parabólico con motor Stirling* (tesis de maestría). Madrid, España: Universidad Carlos III.
- MARTORELLI, L.; BIOTTI, M. A.; CERVINI, F.; CHIESA, L. y CONSTANZO, M. (2012). "Análisis y evaluación de variables ópticas en el desarrollo de concentradores solares ópticos para la generación de energía eléctrica". *XXXVI Jornadas IRAM Universidades*.
- MARTORELLI, L.; BIOTTI, M. A.; HAAG, G.; COSTANZO, M.; BERGAMINI, J.; CERVINI, F. ... y CHIESA, L. (2013). "Sistemas de concentradores ópticos para energía solar evaluaciones térmicas en focos calóricos tridimensionales". *XXXVIII Jornadas IRAM Universidades*.
- NICOLFIS, R. O.; PLATZECK, R. P.; DURFIN, J. C.; MORAGUES, J. A. y SCHEUER, W. (1978). "Concentrador cilíndrico fijo a espejo facetado para aprovechamiento de la energía solar". *Argentine Atomic Energy Commission report CNEA*.
- QUINTEROS GRIJALVA, J. (2008). *Estudio teórico y experimental de colector solar parabólico para generación de energía eléctrica* (tesis de pregrado). Chile, Universidad de Chile.
- RICHTER, C.; TESKE, S. Y SHORT, R. (2009). "Energía solar térmica de concentración. Perspectiva mundial 2009". Ámsterdam, Países Bajos: Greenpeace.
- ROMERO ÁLVAREZ, M. (2006). Introducción a la energía solar termoelectrica. Madrid, España, CIEMAT.
- RUELAS RUIZ, J. E., VELÁZQUEZ LIMÓN, N., y BELTRÁN CHACÓN, R. (2011). "Diseño de un Concentrador Solar acoplado a un motor stirling fijo". *Ingeniería mecánica, tecnología y desarrollo*, vol. 4, n.º 1, pp. 15-22.
- SARAVIA, L. R. (abril, 2007). "La Energía Solar en la Argentina". *Petrotecnia*, pp. 56-67.
- STINE, W. B. y DIVER, R. B. (1994). *A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology*. Estados Unidos: Sandia National Labs.
- VENEGAS REYES, E. (2008). *Sistema para generación y almacenamiento de calor de proceso mediante un concentrador solar de foco puntual (cospaa-90)* (tesis de maestría). México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- WELFORD, W. T. y WINSTON, R. (1978). *Optics of nonimaging concentrators. Light and solar Energy*. Estados Unidos: Academic Press Inc.