

ESTUDIO GEOMETRICO DE UN HORNO SOLAR PARA PROCESAMIENTO DE MINERALES A ALTAS TEMPERATURAS#

C. Placco, M. Gea, M. Bonini, E. Gutiérrez, C. Fernández, H. Suligoy

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional de Salta

e-mail: cplacco@gmail.com

Recibido 06/08/18, aceptado 18/09/18

RESUMEN: Se presenta un estudio óptico geométrico del campo de helióstatos de un horno solar para procesamiento de minerales a altas temperaturas. La configuración propuesta tiene la particularidad de que tanto los helióstatos como el concentrador secundario tienen foco lineal para concentrar la radiación solar en un recinto térmico cilíndrico. Para la determinación de la eficiencia óptica geométrica del sistema se encontraron las ecuaciones de las posiciones angulares de los helióstatos para cada instante. Se obtuvo una herramienta computacional que permite evaluar la energía anual colectada para distintas geometrías del campo de colección y permite también encontrar la configuración que minimiza las pérdidas ópticas. Se realizó el diseño de los heliostatos mediante la asistencia del análisis de marcha de rayos. Se comprobó experimentalmente el grado de concentración lineal de las facetas que componen cada helióstato.

Palabras clave: energía solar térmica, horno solar, helióstato.

INTRODUCCIÓN

Para las empresas mineras de la Puna, localizadas lejos de la red de gasoductos, el desarrollo de sistemas productivos que involucren procesos térmicos se encuentra limitado debido al alto costo de transporte de los combustibles. A su vez, estas plantas están ubicadas en una de las regiones con mayor insolación del mundo, la Puna de Atacama, lo que hace que la energía solar sea el principal recurso energético local.

La empresa Ulex S.A. en su planta en la mina Sol de Mañana en el Departamento de Los Andes, provincia de Salta, construyó y ensayó un primer prototipo de horno solar. El mismo está formado por un conjunto de helióstatos (grandes espejos planos) que reflejan la radiación solar sobre concentradores secundarios de disco parabólico, y éstos, a su vez, sobre un recinto térmico, donde se procesa el mineral a alta temperatura (Figura 1). La eficiencia de este equipo es baja debido a que se trata de un prototipo básico, con componentes artesanales y control manual. Sin embargo el sistema permitió probar que se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 500 °C, lo que permitió realizar las primeras experiencias de separación y concentración de colemanita (borato de calcio) mediante calcinación y decrepitación del mineral.

La comprobación de que es posible disponer de energía solar térmica para procesos industriales en la propia localización de la explotación, abre nuevas posibilidades de agregar valor económico a algunos minerales de importancia en la producción regional, como es el caso de algunos boratos y de la perlita. Los mismos poseen un alto contenido de agua en su estructura y cuando son calentados hasta altas temperaturas la liberan, mejorando sus propiedades desde el punto de vista comercial.

El trabajo presentado en este artículo se encuentra enmarcado en un proyecto que consiste en el desarrollo de la tecnología de horno solar para procesamiento de minerales a altas temperaturas a través de la construcción y optimización de un prototipo de concentrador solar térmico.

Parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta.

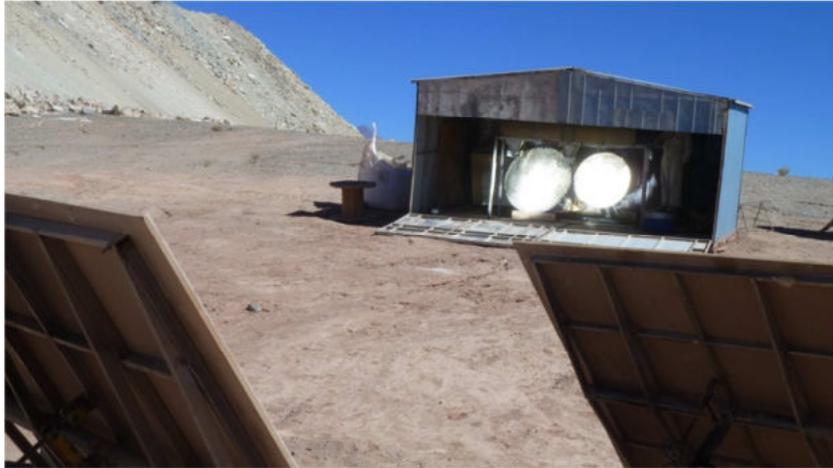


Figura 1: Primer prototipo de horno solar en la Puna salteña. Espejos planos reflejando la radiación solar sobre concentradores secundarios de disco parabólico.

HORNO SOLAR

Los hornos solares pertenecen a la rama de los sistemas termosolares de concentración. Estos hacen posible la obtención de altas relaciones de concentración mediante el empleo de varias etapas, pudiendo así lograr temperaturas muy elevadas en el receptor, que se sitúa en el foco o en las proximidades de éste.

Normalmente están compuestos por uno o varios heliostatos, un concentrador secundario y un receptor térmico (Figura 2). Para la regulación de la radiación sobre el receptor suele emplearse un atenuador constituido por pantallas rebatibles.

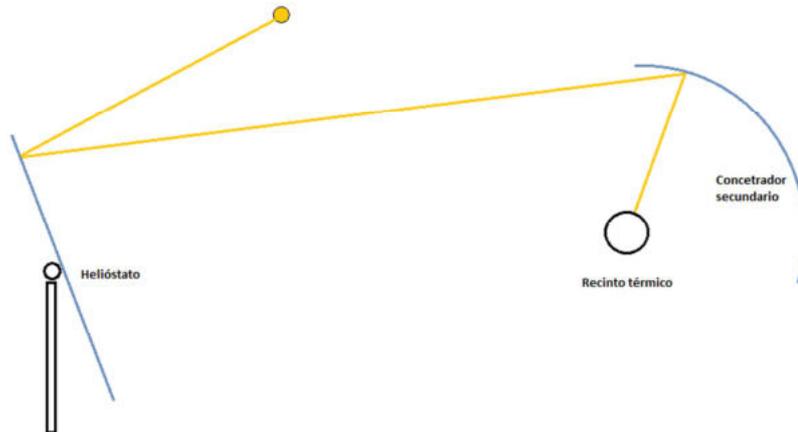


Figura 2: Esquema de un Horno Solar de alta temperatura

La tecnología de los hornos solares tiene sus inicios en la segunda mitad de la década de 1950. Las primeras investigaciones sobre hornos solares tenían como finalidad conocer el efecto de las altas temperaturas (aprox 3500°C) sobre diversas propiedades de materiales expuestos a flujos radiativos muy concentrados (Glaser 1957, 1958), como son conductividad térmica, coeficientes de dilatación, emisividad, puntos de fusión de diversos compuestos (Hisada, 1957), estudio de materiales ultrarrefractarios, obtención de diagramas de fase, crecimiento de cristales y purificación de materiales. Simultáneamente se han desarrollado métodos para medir altas temperaturas y técnicas para medir la densidad de radiación concentrada (Loh, 1957). Estas últimas han evolucionado y actualmente se utilizan técnicas de digitalización de imágenes usando cámaras CCD (Johnston, 1995) y técnicas calorimétricas como medida de referencia para las imágenes (Pérez Rábago, 2004).

Entre los primeros hornos se pueden mencionar el de Arizona State Collage en Estados Unidos de Norteamérica construido en 1956 y el de Instituto Gubernamental de Investigación Industrial, en Japón (Hisada, 1957). Posteriormente se construyeron hornos de mayor superficie de captación y con mayor capacidad de concentración, como el que se encuentra en el Centro Nacional de la Investigación Científica (CNRS) en Odeillo, Francia, de 1000 kW térmicos (Trombe, 1973); el horno solar de Instituto Paul Scherrer (PSI) de aproximadamente 40 kW (Schubnell, 1991); el horno solar de la Academia de Ciencias de la Republica de Uzbekistán de 1000 kW (Abdukhamaranov, 1998); el horno del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en Colonia, Alemania de 20 kW (Neumann, 1999); el horno solar del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) en Colorado, USA de 10 kW y el horno del Centro de Investigaciones Energéticas Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT) ubicado en la Plataforma Solar de Almería (PSA), España de 45 kW. También existen desarrollos recientes orientados a actividades industriales como la cocción de tabiques de arcilla y la fabricación de cerámicos (Martínez Plaza et al., 2015).

En nuestro país se cuenta con el antecedente antes mencionado, mediante el cual se está ensayando el procesamiento térmico de boratos en la Puna salteña. El mismo tiene un desarrollo preliminar y desde el INENCO se ha comenzado a trabajar, a través de un convenio con la empresa, con el objetivo de optimizar esta tecnología. Se plantea el diseño y construcción de un nuevo prototipo industrial que tenga en cuenta la experiencia desarrollada por los técnicos de la minera. La particularidad del diseño de horno solar propuesto es que tanto los helióstatos como el concentrador secundario se diseñaron con un foco lineal. Esto se debe a que en los ensayos preliminares los minerales se procesaron en recintos cilíndricos rotativos que permiten la circulación y el tamizado de los mismos. También se plantea utilizar el sistema para calentar fluidos térmicos como aceites o sales fundidas para generalizar las aplicaciones del sistema, incluso para desarrollar equipos de acumulación térmica.

ESTUDIO GEOMÉTRICO

Existen aspectos del sistema helióstatos - reflector secundario, que requieren un estudio detallado de la óptica geométrica. Éstos tienen que ver con el diseño necesario para conseguir una razón de concentración adecuada, para la minimización de las pérdidas ópticas, para la construcción de un sistema de seguimiento solar, etc.. El análisis de la geometría solar y la marcha de rayos, asociados a un modelo de atenuación atmosférica, permite calcular la radiación directa que recibe cada espejo en función del tiempo teniendo en cuenta que estos giran alrededor de dos ejes.

Las relaciones básicas que permiten determinar las coordenadas angulares del sol para cualquier punto sobre la superficie terrestre son las siguientes (Duffie and Beckman, 2006):

$$\delta = 23,45 \text{ sen } (360 (284 + n) / 365) \quad 1)$$

$$\Theta_z = \text{arc cos } (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \text{sen } \varphi \text{ sen } \delta) \quad (2)$$

$$\gamma_s = \text{sign } (\omega) \text{ arc cos } (\cos \Theta_z \text{ sen } \varphi - \text{sen } \delta) / \text{sen } \Theta_z \cos \varphi \quad (3)$$

δ : ángulo de declinación solar

n : número de día del año

Θ_z : ángulo cenital, es el ángulo que forman la radiación directa y la vertical del lugar.

φ : latitud del lugar

ω : ángulo horario (desplazamiento angular del sol debido a la rotación de la tierra)

γ_s azimut solar, es el ángulo que forma la proyección horizontal de la radiación directa con el meridiano del lugar.

En la figura 3 se representan las direcciones de incidencia y reflexión de la radiación solar respecto a un sistema de ejes definido de manera que la normal de la superficie del helióstato está contenida en el plano y-z. Es decir, la dirección del eje y coincide con la dirección de la proyección horizontal de la normal al plano. Este eje forma un ángulo azimutal γ_p respecto al meridiano del lugar. En el esquema 3-a está representada la proyección de un rayo incidente sobre el plano y-z.

Los ángulos son los siguientes:

α_{sol} : ángulo entre el azimut del sol y el azimut del heliostato ($\gamma_s - \gamma_p$).

h_{sol} : altura solar, ángulo que forma la dirección del sol respecto al plano horizontal ($90 - \Theta_z$).

h'_{sol} : proyección de la dirección de un rayo incidente sobre el plano y-z.

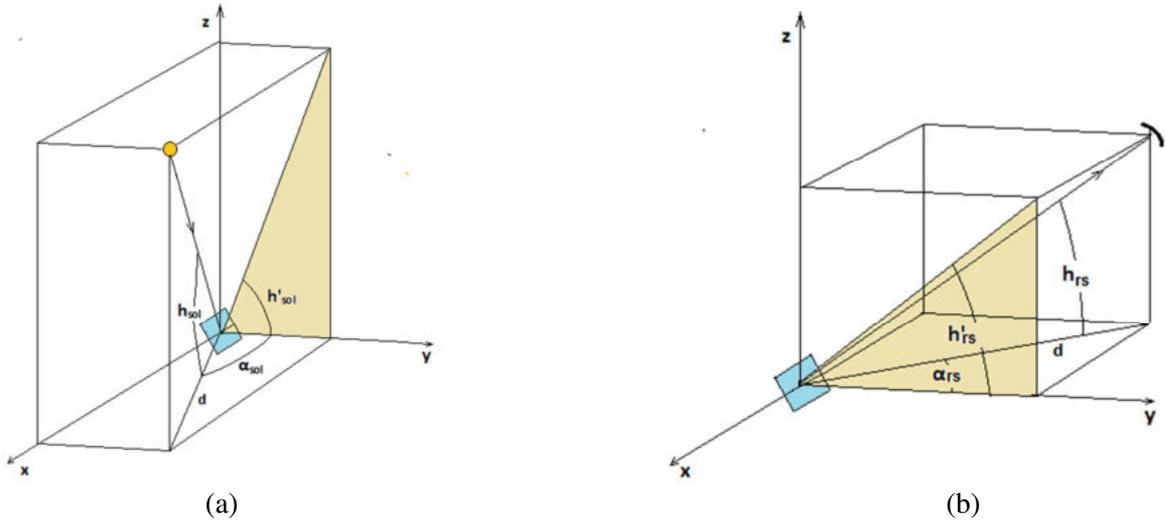


Figura 3: Proyecciones sobre el plano normal al heliostato: a) de un rayo incidente, b) de un rayo reflejado

Se puede observar en dicho esquema que para una dada posición del sol (x,y,z), se cumple que:

$$z = y \operatorname{tg} (h'_{sol}) = d \operatorname{tg} (h_{sol}) \quad (4)$$

$$y = d \cos (\alpha_{sol}) \quad (5)$$

$$h'_{sol} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} (\operatorname{tg} (h_{sol}) / \cos (\alpha_{sol})) \quad (6)$$

En el esquema 3-b está representada la proyección de un rayo reflejado hacia el reflector secundario sobre el plano y-z, cuya dirección respecto al heliostato es γ_{rs} (figura 4).

α_{rs} : ángulo entre el azimut del reflector secundario y el azimut del heliostato ($\gamma_{rs} - \gamma_p$).

h_{rs} : ángulo que forma la dirección del secundario respecto al heliostato y el plano horizontal.

h'_{rs} : proyección de la dirección de un rayo reflejado sobre el plano y-z.

Análogamente al caso de la incidencia, en la reflexión se puede plantear que:

$$z = y \operatorname{tg} (h'_{rs}) = d \operatorname{tg} (h_{rs}) \quad (7)$$

$$y = d \cos (\alpha_{rs}) \quad (8)$$

$$h'_{rs} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} (\operatorname{tg} (h_{rs}) / \cos (\alpha_{rs})) \quad (9)$$

Planteando la condición de que la dirección de la normal al plano es bisectriz entre los rayos incidentes y reflejados, se puede obtener el ángulo de inclinación del heliostato β :

$$\beta = (h'_{sol} + h'_{rs}) / 2 \quad (10)$$

En cuanto al cálculo del azimut del plano, se debe tener en cuenta que éste debe ser bisectriz entre el azimut del sol y la dirección de la proyección horizontal de la línea que une el heliostato con el reflector secundario (figura 4):

$$\gamma_p = (\gamma_s + \gamma_{rs}) / 2 \quad (11)$$

La determinación de los valores que deben tomar en cada instante los ángulos de inclinación β y azimutal γ_p de cada heliostato para reflejar la radiación solar a un punto fijo (reflector secundario), en su movimiento de seguimiento al sol durante el día, para cualquier época del año se puede realizar con la siguiente secuencia de cálculo:

- Cálculo del ángulo de declinación solar para un determinado día del año con la ecuación (1)
- Cálculo del ángulo cenital Θ_z una vez definidos n , la latitud del lugar y el momento del día con la ecuación (2).
- Cálculo del azimut solar γ_s con la ecuación (3).
- Determinación de las coordenadas angulares del reflector secundario respecto del heliostato en estudio γ_{rs} y h_{rs}
- Cálculo de la inclinación β con las ecuaciones de (6), (9) y (10)
- Cálculo del azimut del plano γ_p con la ecuación (11)

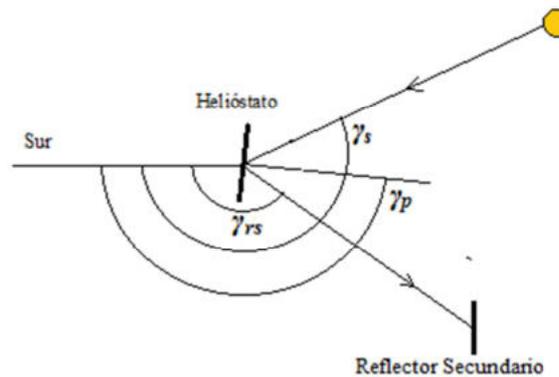


Figura 4: Proyección en planta - ángulos azimutales

RADIACIÓN DISPONIBLE EN EL RECEPTOR DEL SISTEMA

Atenuación atmosférica

La radiación solar disponible en determinado lugar sobre la superficie de la tierra depende de factores astronómicos, geográficos, geométricos, físicos y meteorológicos. Los factores astronómicos están relacionados con la constante solar, la declinación solar, el ángulo horario y horas de sol. Los factores geográficos dependen de la latitud, longitud y altitud del sitio. Los factores geométricos son una función de la inclinación de la superficie y de su ángulo azimutal. Los factores físicos están relacionados con el contenido de vapor de agua en la atmósfera, la dispersión por moléculas de aire y gases miscibles, la presencia de aerosoles y el efecto del ozono. Los factores meteorológicos están relacionados con la temperatura, la precipitación, la humedad, etc.. Los dos últimos son los grupos más difíciles de cuantificar, ya que varían continuamente, y generan incertidumbre para establecer con precisión la energía incidente en la superficie de la Tierra en períodos específicos de tiempo.

A partir de 1940 se desarrollaron distintos modelos analíticos para el cálculo de la radiación solar, que fueron creciendo en precisión y complejidad. Entre ellos el modelos de Moon, Reddy, ASHRAE, Lacis & Hansen, Hottel, Atwater & BallDavis & Hay, Hoyts y Watts (Gutiérrez-Trashorrasa et al., 2018). El modelo no espectral Bird & Hulstrom es más completo y preciso que los modelos anteriores y es el que se utiliza para el cálculo de la radiación en el presente trabajo. Aunque este modelo permite determinar radiación directa y difusa, a fines de evaluar el sistema de concentración se enfoca el cálculo sólo en la directa (Bird & Hulstrom, 1981).

$$I_d = 0.9662 C_r \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a \quad (12)$$

Donde: 0.9662 es un factor de corrección que ajusta el rango de longitud de onda del espectro solar (0,3–3 μm).

C_r : Valor de la constante solar diaria (W/m^2).

τ_r : Transmitancia por scattering en moléculas de aire.

τ_o : Transmitancia debido a la absorción del ozono (O_3).

τ_g : Transmitancia debido a absorción de una mezcla uniforme de gases (CO_2 y O_2).

τ_w : Transmitancia debido a la absorción en vapor de agua.

τ_a : Transmitancia por absorción y scattering por la presencia de aerosoles.

La constante solar diaria y las distintas transmitancias son determinadas por ecuaciones. Las transmitancias dependen de la masa de aire, y según su tipo, del espesor de la capa de ozono, de la cantidad de agua precipitable y de la turbidez atmosférica (Bird & Hulstrom, 1981).

Pérdidas óptico geométricas

Las pérdidas óptico geométricas dependen de la posición relativa de los helióstatos en torno al absorbedor y de la posición del sol. Por este motivo dependen fuertemente del instante y del diseño del conjunto solar. Estas pérdidas vienen determinadas por los siguientes factores:

Efecto coseno

Cuantifica las pérdidas causadas por la inclinación del eje óptico del helióstato con respecto a la trayectoria de los rayos solares, lo que se traduce en una reducción del área visible proyectada por el sol. Estas pérdidas son proporcionales al coseno del ángulo que forman la normal a la superficie reflectiva con la dirección de incidencia de la radiación directa. Para cada helióstato y cada instante del año se tendrá un factor coseno determinado. El hecho de que la dirección de la radiación reflejada sea propia de cada helióstato, y fija para todo instante, determina que ante una dirección de la radiación incidente idéntica para todos los helióstatos de un campo solar, el factor coseno de cada uno sea diferente.

Pérdidas por sombras y bloqueo

Las pérdidas por sombras engloban tanto las producidas por las sombras que unos helióstatos proyectan sobre otros, como la proyectada por cualquier otro elemento sobre los helióstatos. Causan una reducción del área útil reflectiva y también son función de la posición del sol y, por tanto, de la hora del día para cada día del año. Las pérdidas por bloqueos corresponden a la fracción de radiación solar reflejada por los helióstatos que no alcanza el receptor al resultar bloqueada por helióstatos vecinos. Como en los casos anteriores, este efecto también depende del instante considerado.

Pérdidas por reflectancia

Las pérdidas por reflectancia se deben a que los helióstatos no reflejan de forma especular la totalidad de la radiación solar que incide sobre su superficie reflectante, ya que por un lado, parte de dicha radiación es absorbida por el vidrio, y por otro lado una fracción de la radiación incidente será reflejada de forma difusa por los espejos. Dependen del espesor y de la calidad del vidrio y crecen con el aumento del ángulo de incidencia de la radiación respecto a la normal al plano.

Pérdidas por desbordamiento de flujo:

El desbordamiento de flujo consiste en la fracción de la radiación reflejada por el campo de helióstatos que no alcanza la superficie absorbente, debido a errores ópticos. Éstas son cuantificadas con el denominado factor de desbordamiento, que son consecuencia de los errores en el seguimiento del movimiento del sol y de los errores de pendiente de los helióstatos. Sus efectos dependen de la posición relativa entre el sol, el heliostato y el receptor.

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA CONFIGURACIÓN DE HELIÓSTATOS

Se desarrolló un programa de cálculo que, a partir de una determinada configuración de un sistema de helióstatos y su ubicación geográfica, permite calcular la radiación incidente en el recinto térmico.

El software utiliza las ecuaciones obtenidas en el estudio geométrico descrito precedentemente y el modelo de Bird de atenuación atmosférica para realizar el cálculo de la radiación solar directa que llega en cada instante al plano de los helióstatos. Cuantifica las pérdidas geométricas por efecto coseno y por reflectancia. Para la determinación de estas últimas se utilizaron las correlaciones entre la reflectancia especular y el ángulo de incidencia, obtenidas en estudios anteriores para vidrios similares (Hongn, et al., 2011).

El cómputo se inicia a partir de la selección del lugar geográfico de emplazamiento, sus características atmosféricas (presión atmosférica, vapor de agua, presencia de aerosoles, etc.). Requiere de un

prediseño del campo de heliostatos de los cuales se conoce el número, el área y las coordenadas de cada uno respecto al receptor y las características del material reflectante (espesor y tipo de vidrio). La configuración geométrica tiene asociada ángulo de apertura ψ , medido entre el eje del absorbedor y los colectores como se muestra en la figura 5.

El programa determina la posición del sol a intervalos de seis minutos, durante todos los días del año. De acuerdo a la configuración geométrica del sistema, realiza el cálculo de la posición angular instantánea del plano de cada uno de los heliostatos (inclinación β y azimut del plano γ_p) y valora las pérdidas por efecto coseno y por reflectividad para determinar una eficiencia óptica. Las pérdidas por bloqueo y sombreado deben ser minimizadas en el prediseño del campo de heliostatos (se considera una eficiencia de 0,95) y las pérdidas por desbordamiento se estiman de acuerdo a experiencias anteriores, considerando que los errores ópticos alcanzan el 5%. A partir de la radiación extraterrestre afectada por la atenuación atmosférica, y las pérdidas óptico geométricas se obtiene la irradiancia reflejada por cada uno de los heliostatos, e integrada en el tiempo la energía anual.

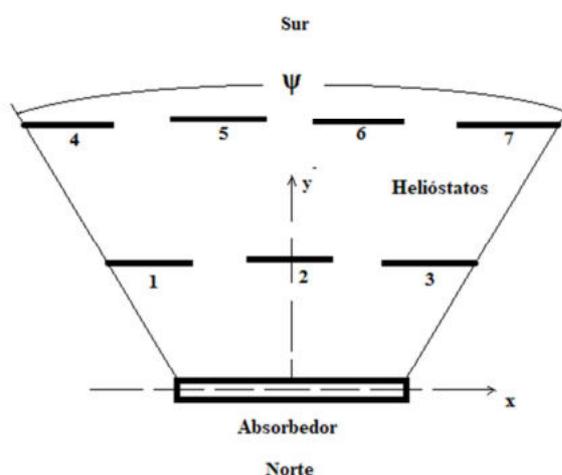


Figura 5: Configuración del campo de heliostatos.

El programa realiza las operaciones de forma matricial, independientemente del número de elementos que componen el campo de reflectores, lo cual facilita la comparación entre sistemas diseñados con distinta cantidad de heliostatos, sólo ingresando sus posiciones respecto al recinto térmico.

La salida del software proporciona el ángulo de apertura del sistema, la energía anual que recibe el recinto térmico, un archivo con los datos de: día, hora, eficiencia óptica y potencia instantánea por heliostato para todos los días del año con diez valores por hora y otro archivo con idénticos datos para los días medios de cada mes.

Comparando los resultados del cálculo de la energía anual colectada para distintas configuraciones con diferentes ángulos de apertura ψ y altura del receptor es posible encontrar aquella en la que la energía es máxima.

Con el objetivo de evaluar la influencia de las pérdidas geométricas para distintas configuraciones, se consideró un prediseño de campo solar de acuerdo al proyecto de prototipo a instalar en la Mina Sol de Mañana. Este está constituido por 3 heliostatos cuadrados, de aproximadamente 3 m de lado, sumando un área de 25,2 m² de espejos comunes de 3 mm de espesor. El receptor se encuentra a 5 m de altura y los centros de los heliostatos, que corresponden a los números 1, 2 y 3 del esquema de la figura 5, tienen las siguientes coordenadas en el plano x-y (Tabla 1).

Heliostato 1		Heliostato 2		Heliostato 3	
x	y	x	y	x	y
-5 m	10 m	0	11 m	5 m	10 m

Tabla 1: Coordenadas del campo solar

Con esta configuración se calculó la variación diaria de la energía reflejada y del rendimiento óptico. Como ejemplo se presentan en la Figura 6 las gráficas correspondientes al día 21 de junio. En ellas se

puede apreciar la influencia del efecto coseno observando las curvas de la radiación solar reflejada por los heliostatos que están fuera del eje de simetría. El Heliostato N°1 colecta más radiación durante la mañana que durante la tarde, e inversamente lo hace el Heliostato N° 3. Lo mismo se observa en las gráficas de la eficiencia óptica.

Mediante la aplicación del programa de cálculo desarrollado también se puede analizar la influencia del valor del ángulo de apertura ψ y de la altura del receptor en la energía colectada en un año (Figura 7).

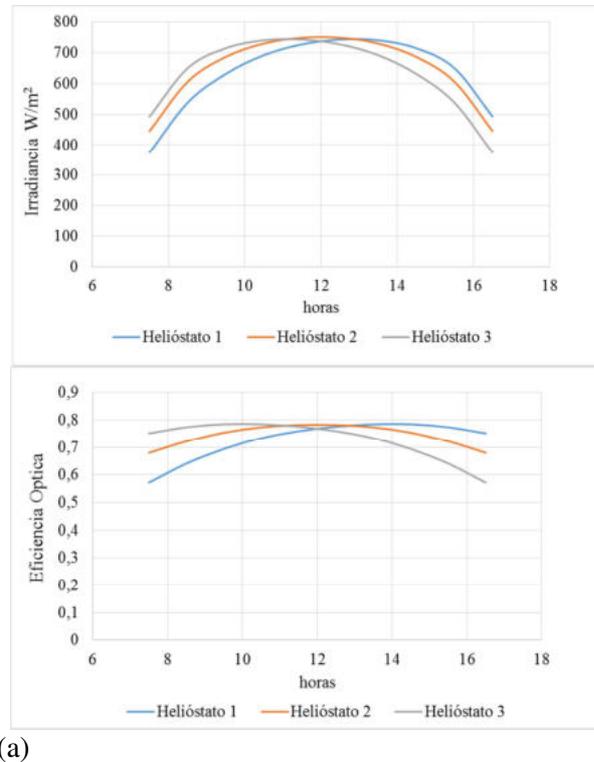


Figura 6: Radiación reflejada (a) y eficiencia óptica (b) de cada heliostato para el día 21 de junio

Se observa que, para un dado número de heliostatos, mientras mayor es el ángulo de apertura del campo solar, menor es la radiación reflejada calculada para todo el año. Esto se debe a la creciente incidencia del efecto coseno y, en menor medida, de la pérdida de reflectancia de los espejos al aumentar el ángulo de incidencia de la radiación. Esta pérdida se acentúa en los heliostatos más alejados del eje y durante las primeras y últimas horas del día. Respecto a la influencia de la altura del receptor, se observa en la figura que existe una altura para la cual es máxima la captación de energía anual que corresponde a la minimización del efecto coseno.

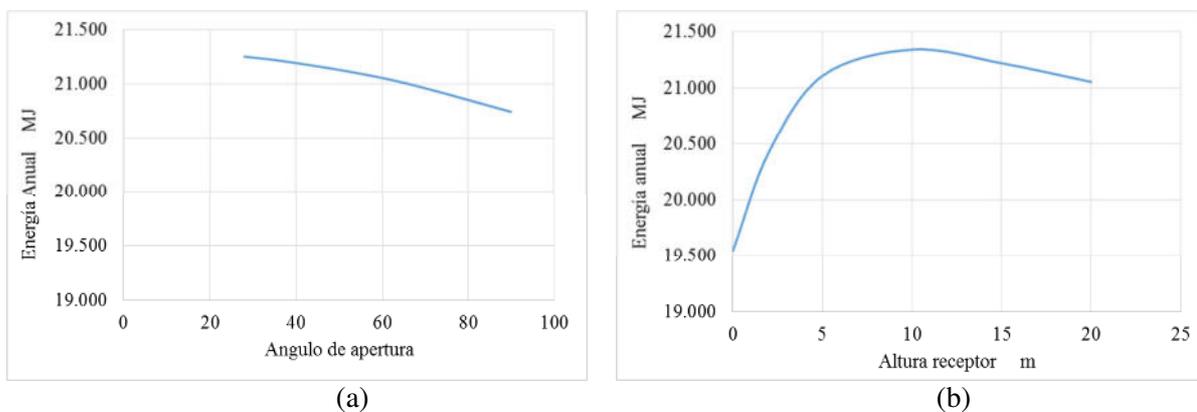


Figura 7: Energía anual colectada por los heliostatos en función del ángulo de apertura (a) y de la altura del receptor (b)

CONSTRUCCIÓN Y ESTUDIO GEOMÉTRICO DEL HELIÓSTATO

A fin de comenzar a desarrollar un prototipo industrial para la transferencia de tecnología, se plantea la construcción y análisis de un helióstato cuadrado de 3 m de lado, constituido por 8 facetas (figura 8-a). Tanto los marcos externos como los bastidores de las facetas fueron construidos con caño estructural. Cada faceta está vinculada a la estructura del helióstato mediante cuatro tornillos regulables que permiten dar una orientación distinta a cada una para lograr un grado de concentración inicial (canteo). A su vez, el espejo de cada faceta tiene en su parte posterior un mecanismo de deformación por flexión controlada para conformar una imagen lineal sobre el receptor (figura 8-b).

Análisis mediante traza de rayos:

Para estudiar el comportamiento teórico de este diseño se utilizó un software de geometría que posibilita analizar el sistema mediante traza de rayos. El programa permite obtener valores de configuración del canteo y deformación lineal de los espejos con los cuales se logra una concentración de rayos máxima para cada posición y para cualquier ángulo de incidencia de la radiación. En la práctica, tanto el canteo como la deformación cilíndrica del espejo se realizan una sola vez, calibrando cada helióstato a una hora determinada. Durante el resto de las horas de funcionamiento la mancha de radiación solar concentrada sobre el receptor cambia mínimamente su tamaño, manteniéndose dentro del ángulo de aceptación de un concentrador secundario.

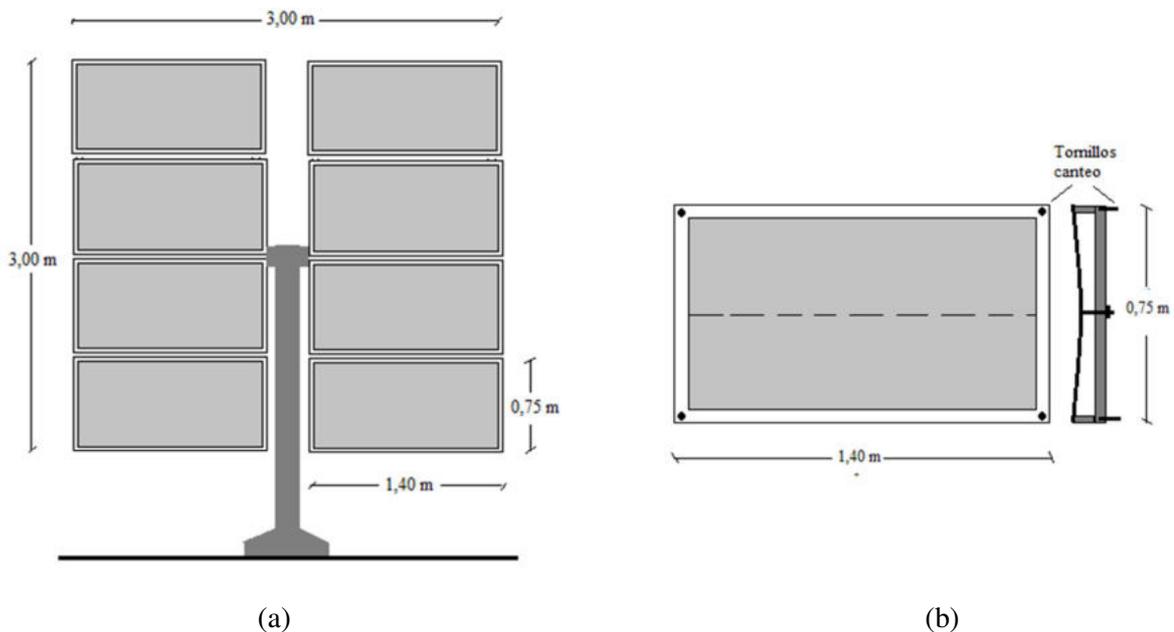
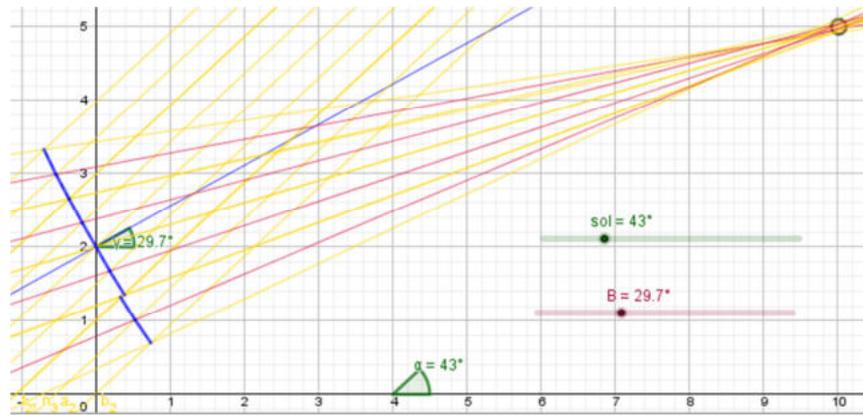


Figura 8: a) Esquema del helióstato de 8 facetas. b) Sistema de canteo de facetas y flexión de espejos (en corte)

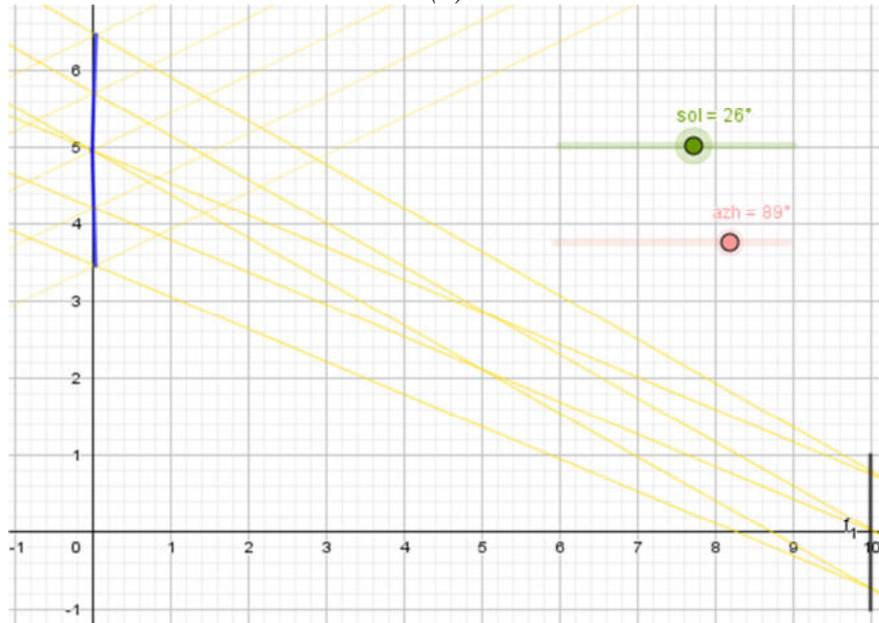
Comprobación experimental:

Para iniciar el estudio experimental del helióstato, se construyeron el marco estructural y los 8 bastidores de las facetas con sus respectivos tornillos para canteo, con las medidas indicadas en la Figura 8. Se completó una de las facetas con el pegado de un espejo de 3 mm de espesor y la construcción del sistema de deformación por flexión, que genera la concentración de rayos, *non image*, en un foco lineal. Se instaló la mitad de la estructura sobre una plataforma que permite las rotaciones alrededor de los ejes horizontal y vertical, a fin de realizar el enfoque de manera manual (Figura 10).

Se realizó un primer ensayo con el objeto de evaluar la variación del tamaño de la imagen generada por la faceta para distintas horas del día. Para ello se configuró la faceta de manera que forme una mancha solar sobre una pantalla para una hora determinada (12:00 hora solar). Esto se realizó fijando los tornillos del canteo y produciendo una flexión controlada del espejo modificando la flecha de la deformación con los tornillos posteriores hasta lograr un ancho mínimo de la imagen lineal sobre la pantalla. Manteniendo fija esta configuración, al día siguiente se realizaron los enfoques correspondientes a las horas 9:00, 10:00, 11:00 y 12:00 obteniéndose las imágenes presentadas en la Figura 11.



(a)



(b)

Figura 9: Proyección de los rayos para el helióstato N° 3, a) en el plano x-z, b) en el plano x-y

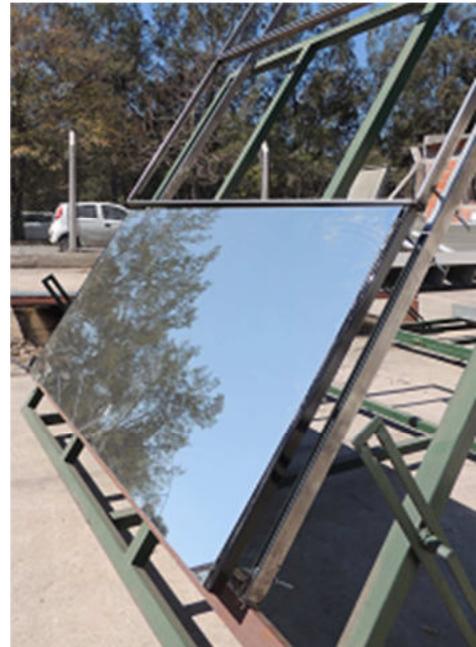


Figura 10: Fotografías de la estructura del helióstato y de una faceta.

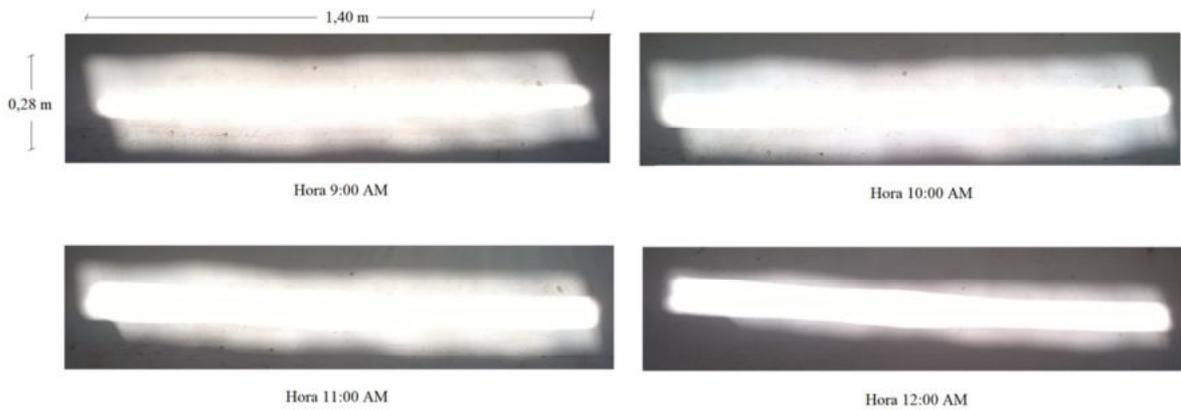


Figura 11: Secuencia de imágenes de la radiación concentrada por una faceta

Las imágenes obtenidas nos permiten realizar un análisis cualitativo, observando que el ancho de la mancha solar de concentración lineal se mantiene aproximadamente constante, con una marcada disminución del mismo a las 12:00, hora para la cual está calibrado el sistema. En cada imagen se observa que en la zona central la concentración es alta y disminuye hacia los bordes. Esto se explica en el hecho que la curvatura del espejo, generada por una fuerza distribuida en el eje longitudinal, corresponde matemáticamente a un polinomio de tercer grado (Gea et al., 2007). La mayor concentración de rayos ocurre en las proximidades del eje donde las diferencias entre las curvas de segundo y tercer grado son mínimas.

CONCLUSIONES

Este trabajo constituye el primer avance en el desarrollo de un prototipo de horno solar destinado a dar respuesta a una demanda concreta de una empresa productora de boratos. Se obtuvieron los primeros resultados, tanto en aspectos conceptuales como experimentales orientados a la aplicación específica, los cuales se destacan a continuación.

Se encontraron las ecuaciones que permiten determinar los ángulos de inclinación β y azimutal γ_p de cada heliostato para cada instante. Conociendo estos ángulos es posible calcular el ángulo de incidencia de la radiación sobre cada plano en cada instante y con él determinar las pérdidas óptico geométricas del sistema.

Para la evaluación de la energía que puede coleccionar un campo de heliostatos y la estimación de su eficiencia óptica se desarrolló un programa computacional. Se obtuvo una herramienta adecuada para evaluar distintas geometrías del sistema y encontrar la configuración que minimice las pérdidas ópticas. Este programa es una herramienta valiosa que permite el diseño y dimensionado de un campo de heliostatos de un horno solar.

El análisis mediante traza de rayos y los estudios experimentales iniciales permitieron comprobar el buen funcionamiento de los sistemas de calibración de la concentración generada por un heliostato. Se probaron los mecanismos de canteo de facetas y de flexión de espejos. Este último posibilita desarrollar un sistema novedoso de heliostatos con concentración en foco lineal.

Como trabajo futuro, se prevé la culminación del montaje y calibración de un heliostato con sus ocho facetas; con base en nuevos estudios experimentales de la mancha solar se diseñará el concentrador secundario. Se realizará el estudio teórico y experimental del comportamiento térmico del sistema en su conjunto.

REFERENCIAS

- Abdukhamaranov A. A. Akbarov R.Y. Gulamov K.G. et al. "Operating Experience of a Big Solar Furnace 1000 kW in Power" *Applied Solar Energy*, vol. 34, No. 1, 1998.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3ª edición. Wiley Interscience, New York.
- Gea M., Saravia L., Fernández C., Caso R. y Echazú R. "Concentrador Lineal Fresnel para la Generación Directa de Vapor de Agua" *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 11, 2007. ISSN 0329-5184
- Glaser, Peter E. "A solar furnace for use in applied research". *Solar Energy*, vol. 1, Issues 2-3, pp. 63-67, April-July, 1957.
- Glaser, Peter E. "Engineering research with a solar furnace" *Solar Energy*, vol. 2, Issues 2, pp. 7- 10, April 1958
- Gutiérrez Trashorras A., Villicaña Ortiz E, Álvarez A., González Caballín J., Xibert Bernat J., Suarez López M. "Attenuation processes of solar radiation. Application to the quantification of direct and diffuse solar irradiances on horizontal surfaces in Mexico by means of an overall atmospheric transmittance". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018) 93–106.
- Hisada T., Mii H., Noguchi C., Noguchi T., Hukuo N., and Mizuno M. "Concentration of the Solar Radiation in a Solar Furnace" *Solar Energy*. Vol. 1, No. 4, pp 14-18, 1957.
- Hongn M., Flores Larsen S., Altamirano M., Gea M., Saravia L. "Estudio de Reflectancia de Espejos para un Concentrador Solar Fresnel Lineal". *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 15, 2011. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Johnston, G. Flux "Mapping the 400m² 'Big Dish' at the Australian National University". *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 117, No. 4, pp 290-293, 1995.
- Loh, Eugene et al. "Heat flux measurements at the sun image of the California institute of technology lens-type solar furnace" *Solar Energy*, vol. 1, Issues 4, pp. 23-26, October 1957.
- Martínez Plaza D., Cañadas Martínez I., Mallol Gasch G., Téllez Sufrategui F., Rodríguez García J. . "A case study of the feasibility of using solar concentrating technologies for manufacturing ceramics". *Journal of Cleaner Production* 87 (2015) 977e991.
- Neumann, A. and Witzke, A. "The influence of sunshape on the DLR solar furnace beam" *Solar Energy*, vol. 66, Issues 6, pp. 447-457, 1999.
- Pérez Rábago, C.A., Marcos, M.J., Romero, M., Estrada, C.A.. "Heat Transfer in a Conical Cavity Calorimeter to Measure the thermal Power of a Point Focus Concentrator". *EUROSUN 2004*, Freiburg, Germany. June 20-23, 2004.
- Schubnell, M. "Sunshape and its influence on the flux distribution in imaging solar concentrators" *Transactions of the ASME Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 113, pp. 112-116, May 1991. SERI/TR-642-761. February 1981. A Simplified Clear Sky. Model for Direct and. Diffuse Insolation on. Horizontal Surfaces. Richard E. Bird. Roland L. Hulstrom.
- Trombe, F. & Le Phat Vinh, A.. "Thousand kW Solar Furnace, Built by the National Center of Scientific Research, in Odeillo (France)" *Solar Energy*, vol. 15, pp. 57-61, 1973.

ABSTRACT:

A geometric optical study of the heliostat field of a solar furnace for the processing of minerals at high temperatures is presented. The proposed configuration has the particularity that both the heliostats and the secondary concentrator have a linear focus to concentrate the solar radiation in a cylindrical thermal enclosure. For the determination of the geometric optical efficiency of the system, the equations of the instantaneous angular positions of the heliostats were found. A computational tool was obtained that allows to evaluate the collected annual energy for different geometries of the collection field and also allows to find the configuration that minimizes the optical losses. The design of the heliostats was carried out by the assistance of the analysis of ray tracing. The degree of linear concentration of the facets that make up each heliostat was checked experimentally.

Keywords: solar thermal energy, solar furnace, heliostat.