

## DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ÓPTICA DE UN COLECTOR TIPO DISCO PARABÓLICO MEDIANTE CALORIMETRÍA

D. Pararoni<sup>1,2,✉</sup>, M. Mujica<sup>1,2</sup>, L. Martorelli<sup>1</sup>, A.M. Castro Luna<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Óptica, Calibración y Ensayo (LOCE), Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina.

<sup>2</sup>Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC-PBA).

<sup>3</sup>Energías Alternativas, Tecnología y Desarrollo Sustentable (EnAlTecS), Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Materiales (CITEMA), Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional (FRLP-UTN), Argentina.

✉ [dario.pararoni@gmail.com](mailto:dario.pararoni@gmail.com)

### Resumen

El desarrollo de la vida humana depende del suministro de energía, la cual se obtiene mayormente quemando combustibles fósiles. Estas fuentes de energía son limitadas, y su disponibilidad no está garantizada por largo tiempo. La continuidad de la civilización humana exige un suministro energético suficiente y continuo. La energía solar es una alternativa, el Sol puede suministrar en una hora la energía requerida por toda la población de la Tierra en un año. Se puede aprovechar la energía solar aplicando una tecnología capaz de concentrar los rayos solares en un receptor para transformarlos en energía térmica con elevada exergía. Un colector tipo disco parabólico consiste de un concentrador conformado por una superficie reflectante que se aproxima a un paraboloide de revolución y un receptor ubicado en el área focal del espejo concentrador. Se presenta un método sencillo para evaluar la eficiencia óptica del sistema propuesto que permita dimensionar de un modo confiable los equipos construidos de acuerdo a la potencia requerida. El receptor es un calorímetro que contiene un fluido que absorbe la energía solar proveniente del concentrador solar parabólico, y la transforma en energía térmica. La potencia térmica puede obtenerse al medir la temperatura del fluido del calorímetro en función del tiempo.

### Abstract

The development of human life depends on the energy supply that is obtained mainly by burning fossil fuels. These energy sources are limited, and their availability is not guaranteed for a long time. The continuity of human civilization demands a sufficient and continuous energy supply. Solar energy is an alternative, the sun can supply in one hour the energy required by the entire population of the earth in a year. It is possible to take advantage of solar energy by applying a technology capable of concentrating the sun's rays on a receiver to transform them into thermal energy with high exergy. A parabolic disk collector consists of a concentrator formed by a reflective surface that approaches a paraboloid of revolution and a receiver located at the focal area of the concentrator mirror. A simple method is presented to evaluate the optical efficiency of the proposed system with which to obtain reliable results and thus dimension the equipment built according to the required power.

The receiver is a calorimeter that contains a fluid that absorbs the solar energy from the parabolic solar concentrator, and transforms it into thermal energy. The thermal power can be obtained by measuring the temperature of the calorimeter fluid as a function of time.

### Palabras clave

Energía solar térmica, eficiencia óptica, potencia térmica, calorímetro.

### Keywords

Thermal solar energy, optical efficiency, thermal power, calorimeter.

*Recibido:* 22 de Mayo de 2019  
*Aceptado:* 11 de Noviembre de 2019  
*Publicado:* 27 de Diciembre de 2019



Esta obra está bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional [http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es\\_AR](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_AR)

## 1. Introducción

El progreso económico mundial alcanzado en el último siglo ha sido consecuencia del fácil acceso al petróleo, carbón y gas natural. Desafortunadamente, el uso de estos combustibles ha incrementado la contaminación del medio ambiente y el cambio climático (Höök y Tang, 2013). El desarrollo de la vida humana depende en la actualidad del suministro de una gran cantidad de energía que se obtiene quemando combustibles fósiles. Estas fuentes de energía son limitadas, y su disponibilidad no está garantizada a tiempos prolongados, la continuidad de la civilización humana exige un suministro energético suficiente y continuo.

El uso de la energía solar es una alternativa puesto que el Sol puede suministrar la cantidad requerida por toda la población de la Tierra. Se sabe que la radiación solar incidente en el planeta entrega en una hora la energía total utilizada por los seres humanos en un año (Liu, Yu, y Liu, 2009).

Para utilizar la energía contenida en la radiación solar primero debe convertirse en una forma útil, como energía térmica o eléctrica. Actualmente se aprovecha la energía solar en dos formas principales: i) mediante la interacción de la luz solar con materiales semiconductores, con los cuales es posible aprovechar el efecto fotoeléctrico (paneles fotovoltaicos), ó ii) utilizando una tecnología capaz de concentrar los rayos solares en un receptor para transformarlos en energía térmica altamente aprovechable, es decir, con elevada exergía. Este sistema utiliza espejos concentradores para redirigir una gran área de luz solar sobre una pequeña área en donde es ubicado un artefacto receptor en el que se da lugar a la conversión a energía térmica, para luego utilizarse allí o ser transportada a otro sitio mediante el uso de un fluido que la contenga. Esta energía térmica puede consumirse como calor en un proceso o transformarse en energía eléctrica a través de un ciclo termodinámico.

Existen diferentes modos de enfocar los rayos del Sol, i) sistemas de enfoque longitudinal (cilindro parabólico y Fresnel longitudinal) en los que los espejos siguen al Sol a lo largo de un eje y ii) sistemas de enfoque radial (torre y disco parabólico), en los cuales los espejos siguen al Sol a lo largo de dos ejes. Aunque se sabe que en todos los sistemas la eficiencia varía con la ubicación, la hora del día y la estación del año, la mayor eficiencia óptica se obtiene con el disco parabólico, debido a que el eje óptico del colector siempre es paralelo a los rayos del Sol y el flujo energético que atraviesa el plano de apertura es máximo en cualquier posición diurna del astro.

Diferentes autores afirman que utilizando calorímetros en los que existe una variación constante de masa de un fluido que se calienta y midiendo el incremento de la temperatura luego de atravesar el calorímetro es posible de medir la potencia térmica entregada por el

colector (Rowe et al., 2015; Skouri, Bouadila, Ben Salah, y Ben Nasrallah, 2013; Willoughby, 1954). Estos equipamientos requieren de bombas de agua, refrigeradores, tanques y tuberías. Este trabajo presenta un método simplificado que permite evaluar la eficiencia de un prototipo de colector disco parabólico.

Además, el método demuestra que es posible obtener resultados confiables con los que dimensionar los equipos construidos de acuerdo a la potencia requerida.

## 2. Desarrollo

El sistema de colector solar disco parabólico consiste en dos componentes principales, el concentrador conformado por una superficie reflectante que se aproxima a un paraboloide de revolución, y el receptor ubicado en el área focal del espejo concentrador, (Figura 1).

Cuando el eje óptico del disco se alinea con el Sol, los rayos incidentes se reflejan hacia una misma región focal generando un área de alta exergía debido a la gran concentración de rayos, con temperaturas que pueden variar desde 400 °C hasta 2000 °C (Stine y Diver, 1994). Los sistemas disco parabólicos pueden ser usados en generación de energía distribuida, combinada con motores Stirling o bloques de energía de microturbinas (Stoffel, Renné, Myers, y Wilcox, 2010).

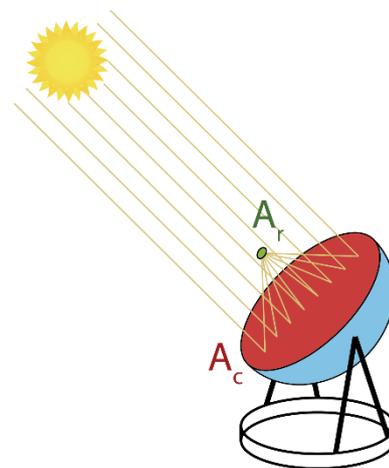


Figura 1. Esquema de la concentración de los rayos en un disco parabólico.

La superficie reflectante concentra un área incidente de luz solar  $A_c$ , definida por su plano de apertura, en un área de concentración  $A_r$ . Puede definirse entonces la razón de concentración (RCR) (Stine & Diver, 1994).

$$RCR = A_c/A_r \quad (1)$$

Esta relación cuantifica la concentración del colector teniendo como máximo teórico un valor de 11500, aunque en la práctica estos valores suelen encontrarse entre 1000 y 4000 para reflectores con espejos curvos (Álvarez, 2006; Lovegrove y Stein, 2012; Stine y Diver, 1994).

Se define la eficiencia óptica del sistema,  $\eta_o$ , como la relación entre la potencia térmica entregada al receptor por el concentrador y la potencia solar disponible en el área  $A_c$ . (Lovegrove y Stein, 2012; Winston, Miñano, y Benítez, 2007).

En el LOCE-UNLP se ha construido un concentrador tipo disco parabólico con un diámetro de 1,5 m, siendo  $A_c = 1,77 \text{ m}^2$  (Figura 2). El foco se encuentra en el eje óptico con una relación focal de 0,6, valor habitual para este tipo de concentrador.

La superficie óptica del concentrador fue construida con la composición de triángulos equiláteros, cada uno alineado con una guía láser y fijados entre sí con silicona. Debido a que cada espejo triangular actúa independientemente y sujeto a su propio error de alineación resulta complejo determinar  $\eta_o$ . Por esta razón se aborda esta dificultad en forma experimental.



Figura 2. Disco parabólico construido.

En la zona focal del concentrador se ubica el receptor capaz de capturar los rayos solares y transformarlos en energía térmica por absorción de radiación. En el ensayo, el receptor fue un calorímetro construido con materiales de elevado calor específico y aislado exteriormente para reducir las pérdidas térmicas.

El calorímetro contiene un fluido que absorbe la energía solar proveniente del concentrador solar parabólico, y la almacena como energía térmica.

La eficiencia óptica del sistema se obtiene midiendo la potencia térmica  $P_t$  transformada en el receptor de acuerdo con la expresión:

$$P_t = I_s \eta_o A_c - P_{pt} - P_{pr} \quad (2)$$

Donde  $I_s$  es la intensidad de la radiación solar solar,  $P_{pt}$  y  $P_{pr}$  son las pérdidas térmicas y reflectivas del calorímetro respectivamente.

La potencia térmica puede obtenerse al medir la temperatura del fluido del calorímetro en función del tiempo durante el funcionamiento del sistema colector, de acuerdo con la ecuación:

$$P_t = C \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

Donde  $dT$  es una variación infinitesimal de la temperatura interior del calorímetro durante una variación infinitesimal de tiempo  $dt$ . La capacidad calorífica  $C$  del calorímetro se considera constante en el intervalo de medición.

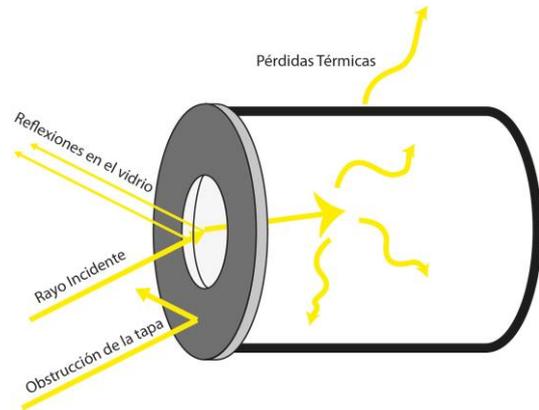


Figura 3. Balance de las transformaciones energéticas que ocurren en el calorímetro.

## 2.1 El calorímetro

El calorímetro (Figura 4) consiste de un reservorio cilíndrico de acero con orificios para colocar termocuplas con las que medir la temperatura interior, una entrada ciega y una entrada de agua. El dispositivo cuenta también con una válvula de seguridad y un manómetro.

El calorímetro posee en su cara expuesta al colector una tapa compuesta por un anillo de acero grueso de 0,18 m de diámetro externo y 0,09 m de diámetro interno, el orificio central es cerrado con una placa de vidrio de borosilicato de 0,02 m de espesor que permite la entrada de los rayos de luz solar.

La superficie externa del calorímetro se encuentra cubierta por un aislante de espuma de polietileno de 0,01 m de espesor. Esta cobertura polimérica está recubierta exteriormente por una lámina de aluminio reflectante para minimizar las pérdidas térmicas por emisión radiativa.

La capacidad calorífica del calorímetro  $C$ , se determinó tomando en cuenta las masas de acero, agua y vidrio, así como los calores específicos de cada material, resultando  $C = 15\,700 \pm 100 \text{ J/}^\circ\text{C}$ .

## 2.2 Obtención de las pérdidas de potencia térmica $P_{pt}$

Para obtener  $P_{pt}$  y verificar  $C$  de forma experimental se realizó un ensayo bajo condiciones controladas en un ambiente a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se agregó al calorímetro una cantidad medida de agua, se ubicó en su interior una resistencia de valor conocido  $R = 104 \pm 1 \text{ } \Omega$  y se aplicó un voltaje efectivo de corriente alterna  $U = 216 \pm 3 \text{ V}$ , entregando una potencia térmica  $P_t = 450 \pm 20 \text{ W}$ . Para medir la temperatura interna se utilizó un multímetro Pro'sKit Mt-1860 conectado a la termocupla tipo K con registros a intervalos de un segundo. Adicionalmente se realizaron medidas con una cámara termográfica Testo 875i para visualizar de forma precisa las zonas de pérdida térmica del calorímetro.

Alcanzada una temperatura de  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  se desconectó la resistencia y se midió la disminución de la temperatura vs tiempo para evaluar las pérdidas térmicas.



Figura 4. Calorímetro recubierto con aislante.

Los datos obtenidos durante la etapa de calentamiento del calorímetro por la resistencia y la etapa enfriamiento respectiva fueron analizados con el software OriginPro 2016.

En la curva de enfriamiento (Figura 5), pueden diferenciarse dos zonas; 1e) zona caliente con pérdidas térmicas predominantes y comportamiento no lineal, 2e) zona con comportamiento quasi-lineal. Con los datos de la zona 2e) se realizó una iteración de mínimos cuadrados, obteniéndose una recta de pendiente  $b_{pt}$ . Aplicando la ecuación (3) se obtuvo un valor para la pérdida de potencia térmica  $P_{pt} = 62,5 \pm 0,5$  W.

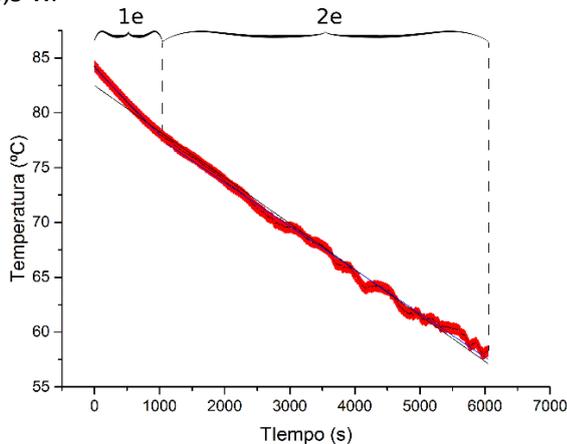


Figura 5. Variación de la temperatura vs tiempo durante el enfriamiento del calorímetro.

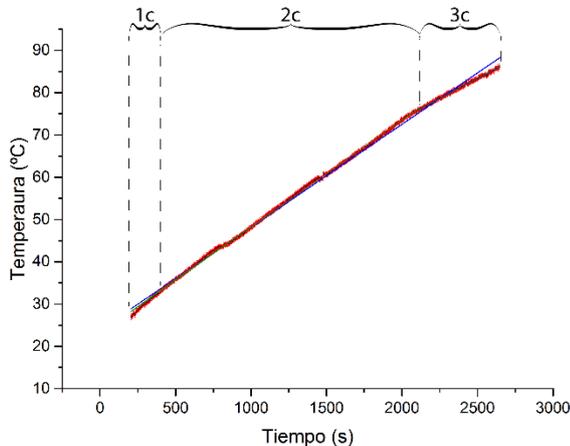


Figura 6. Variación de la temperatura vs tiempo durante el calentamiento del calorímetro.

En la Figura 6 se representa la variación de la temperatura del calorímetro en función del tiempo de calentamiento, diferenciándose tres zonas: 1c) al comienzo de la experiencia con bajas pérdidas térmicas, 2c) una zona intermedia donde el comportamiento es quasi-lineal y las pérdidas de potencia térmica pueden asumirse constantes ( $P_{pt} = 62,5 \pm 0,5$  W) y 3c) un segmento donde las pérdidas de potencia térmica son predominantes y su comportamiento no es lineal.

Recurriendo a la regresión lineal con los datos de la representación en zona 2c se obtiene una recta con pendiente  $b_{cal}$  que utilizada en la expresión

$$P_t = C_{exp} b_{cal} - P_{pt} \quad (4)$$

permite obtener la capacidad calorífica experimental  $C_{exp} = 15\,500 \pm 800$  J/°C, coincidente dentro del rango de incertidumbre con el valor de C ya calculado.

### 2.2.1 Termografía

Se realizaron medidas con una cámara termográfica Testo 875i con las que se observaron distintas zonas calientes del calorímetro. En la Figura 7 se muestra una imagen termográfica al comienzo del calentamiento, el calorímetro se encuentra a temperatura ambiente y las pérdidas térmicas nulas. Mientras que en la Figura 8 se muestra una imagen termográfica del calorímetro a tiempos prolongados de calentamiento. Se observan las diferentes zonas de fuga térmica, y aunque el aislante funciona de forma adecuada, las múltiples zonas expuestas comienzan a calentarse emitiendo radiación. La mayor zona de pérdidas térmicas se encuentra en la tapa del calorímetro, región que no puede ser aislada debido a su exposición a la radiación concentrada durante la evaluación del colector solar.



Figura 7. Imagen termográfica al comienzo del experimento.

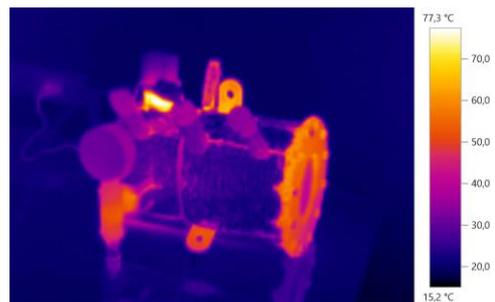


Figura 8. Imagen termográfica del calorímetro a tiempos prolongados de calentamiento.

### 2.3 Pérdidas por reflexión de la tapa

Para conocer el valor de la potencia reflejada por el vidrio ( $P_{pr}$ ) se considera el máximo ángulo de incidencia de la parábola en  $46^\circ$ . Utilizando las fórmulas de Fresnel y Snell (Hecht, 2002) es posible determinar la fracción de radiación solar reflejada por el vidrio de borosilicato que ocurre en la primera y segunda superficie, resultando en 4.6 y 0.6 % respectivamente.

Se hace notar que la absorción de potencia radiativa en la transmisión de los rayos solares a través del vidrio no es considerada como una pérdida de potencia térmica debido a que ésta contribuye al aumento de la temperatura del calorímetro.

### 2.4 Consideraciones del área receptora

El diámetro de la ventana de ingreso de los rayos influye directamente en el valor de la eficiencia óptica, siendo que, para áreas menores a la zona focal, a mayor diámetro más rayos contribuyen al aumento de la temperatura interna. Sin embargo, debe tomarse en consideración que al aumentar el área receptora se reduce la razón de concentración de acuerdo a la ecuación (1).

En el presente trabajo se utiliza un diámetro de ventana de 0,09 m que es coincidente con la ventana de ingreso de rayos del receptor de un motor tipo Stirling que será utilizado con el colector. Para el disco parabólico estudiado se tiene un RCR = 280.

### 2.5 Evaluación del colector

Para determinar la eficiencia del colector, el calorímetro se posiciona a 0,87 m del ápice del concentrador de forma tal que su ventana coincide con la zona de mayor concentración de rayos solares (Figura 9).

Las experiencias fueron realizadas en días diáfanos que contaran con baja humedad relativa para evitar la dispersión de los rayos solares que ésta produce.



Figura 9. Colector alineado, con el calorímetro a 0,87 m de su ápice, durante la realización de las experiencias.

La temperatura interna fue medida mediante un adquisidor de datos y una termocupla tipo K a intervalos de un segundo.

El calorímetro con agua como fluido se deja reposar algunos minutos para lograr el equilibrio térmico al comienzo de cada experiencia. Luego, el colector se orienta al Sol y se sigue su posición continuamente para alcanzar la máxima concentración de rayos.

Se realizaron trece experiencias con el calorímetro como receptor y el disco parabólico descrito como concentrador durante el comienzo del otoño en la ciudad de La Plata.

Los valores de intensidad de radiación solar global durante las experiencias fueron provistos por una estación meteorológica modelo Davis Vintage Pro 2 ubicada en el predio donde se realiza el experimento. Los datos de  $I_s$  con su corrección por ángulo de incidencia fueron utilizados en la ecuación (2) para calcular la eficiencia del colector.

## 3. Resultados y Discusión

Fue medido el valor de  $P_{pt} = 62,5 \pm 0,5$  W. del calorímetro utilizado en el ensayo, siendo este pequeño en comparación con la potencia térmica total. Este valor podría hacerse más pequeño mejorando la aislación de las partes expuestas del calorímetro, pudiendo agregarse material cerámico en la zona expuesta al colector.

También fue corroborado mediante ensayo el valor  $C_{exp} = 15\,500 \pm 800$  J/°C, siendo que era próximo al valor  $C = 15\,700 \pm 100$  J/°C, se ha utilizado este último al ser un valor más preciso.

Para los rangos de temperaturas propuestos la representación T versus t muestra un comportamiento lineal en las distintas experiencias realizadas, con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de  $0,998 \pm 0,001$  (Figura 10).

En la Tabla I se muestran los valores de los parámetros más relevantes de las experiencias realizadas. En las trece experiencias se observa valores similares de  $\eta_{op}$  a pesar la variabilidad existente de  $I_s$  entre ellas. No se observa una correlación entre las variaciones de  $I_s$  y la variación de  $\eta_{op}$ .

La eficiencia óptica promedio  $\eta_{op}$  para el colector estudiado, es  $0,71 \pm 0,02$ . La desviación estándar (0,02) de los valores de  $\eta_{op}$  resultan aceptable dada la sencillez del método.

Teniendo el valor de  $\eta_{op}$  ahora puede estimarse la cantidad de potencia térmica que el colector podrá brindar en su zona focal en función de la radiación solar directa disponible para una cierta localización, pudiendo utilizarse modelos meteorológicos como el año solar típico para calcular la energía anual producida por el artefacto o el dimensionamiento de la potencia del motor Stirling.

Se hace notar que la radiación solar descrita en la Tabla I, es la radiación solar global que resulta de

sumar la radiación solar directa y la radiación solar difusa. De utilizarse datos de radiación solar directa los valores medidos de eficiencia podrían ser superiores a los determinados en las experiencias. Se propone en futuras experiencias obtener esta medida mediante un pirheliómetro, instrumento utilizado en la medición de radiación solar directa.

Para ensayar discos parabólicos de mayor tamaño se propone añadir un sistema de agitación interna y realizar las mediciones de temperatura con varias termocuplas ya que el calorímetros a utilizar será de mayores dimensiones que el descrito en este trabajo.

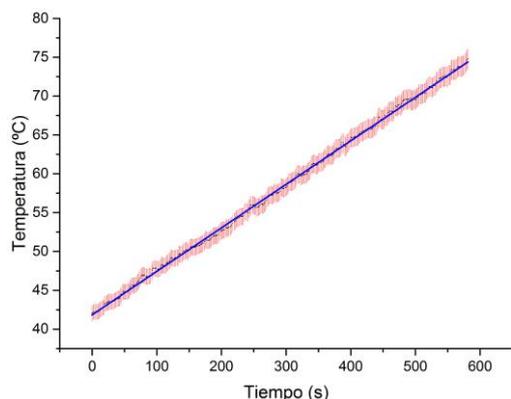


Figura 10. Representación de la variación de temperatura con el tiempo de calentamiento del calorímetro con radiación solar. Se proporcionan los resultados de la regresión lineal.

Tabla I. Valores de los parámetros más relevantes de las experiencias realizadas.

Nº Medida	$P_i$ [W]	$I_s$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\eta_{op}$
1	927 ± 3	870 ± 10	0,69 ± 0,01
2	919 ± 3	860 ± 10	0,70 ± 0,01
3	942 ± 3	840 ± 10	0,73 ± 0,02
4	978 ± 4	811 ± 10	0,78 ± 0,02
5	820 ± 3	803 ± 10	0,67 ± 0,02
6	861 ± 2	880 ± 10	0,64 ± 0,02
7	893 ± 3	880 ± 10	0,66 ± 0,01
8	890 ± 3	870 ± 10	0,67 ± 0,01
9	918 ± 4	850 ± 10	0,71 ± 0,01
10	889 ± 3	830 ± 10	0,70 ± 0,01
11	855 ± 3	790 ± 10	0,71 ± 0,02
12	867 ± 3	740 ± 10	0,77 ± 0,02
13	912 ± 3	770 ± 10	0,77 ± 0,02
		<b><math>\eta_{op}</math> Promedio</b>	<b>0,71 ± 0,02</b>

#### 4. Conclusiones

La medición de la eficiencia óptica del disco parabólico, con un método sencillo que usa un calorímetro de masa constante, ha demostrado ser adecuado para evaluar concentradores disco parabólicos.

El calorímetro empleado no mostró pérdidas térmicas significativas y la velocidad del calentamiento fue adecuada para el concentrador estudiado, sin embargo, se recomienda agitación interna y mejoras en el revestimiento aislante para concentradores de mayor envergadura.

El concentrador bajo estudio tuvo una eficiencia óptica de  $0,71 \pm 0,02$ , valor aceptable considerando que fueron usados en su construcción espejos planos.

La potencia térmica entregada es cercana al kilowatt en la zona de concentración., por lo que se recomienda el uso de un motor Stirling de 100We de producción para este equipo.

El equipo experimental propuesto se puede aplicar en ensayos de prototipos de diferentes geometrías, mostrando resultados con baja dispersión de datos

#### 5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Sismología e Información Meteorológica de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP por los datos meteorológico, a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires CICPBA por financiación, a la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata UTN- FRLP y a la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP por los espacios físicos brindados para realizar el presente estudio.

#### Referencias Bibliográficas

- Romero Álvarez, M. (2006). Introducción a la energía solar termoeléctrica. Madrid, España, CIEMAT
- Hecht, E. (2002). *Optics*. Boston: Addison-Wesley.
- Höök, M., & Tang, X. (2013). Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy Policy*, 52, 797-809. doi: 10.1016/J.ENPOL.2012.10.046
- Liu, Q. Yu, G., & Liu, J. J. (2009). Solar Radiation as Large-Scale Resource for Energy-Short World. *Energy & Environment*, 20(3), 319-329. doi: 10.1260/095830509788066466
- Lovegrove, K., & Stein, W. (2012). *Concentrating solar power technology. Principles, developments and applications*. UK: Woodhead Publishing.
- Rowe, S. C., Groehn, A. J., Palumbo, A. W., Chubukov, B. A., Clough, D. E., Weimer, A. W., & Hischer, I. (2015). Worst-case losses from a cylindrical

calorimeter for solar simulator calibration. *Optics Express*, 23(19), A1309-A1323. doi: 10.1364/OE.23.0A1309

Skouri, S., Bouadila, S., Ben Salah, M., & Ben Nasrallah, S. (2013). Comparative study of different means of concentrated solar flux measurement of solar parabolic dish. *Energy Conversion and Management*, 76, 1043-1052. doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.058

Stine, W. B., & Diver, R. B. (1994). *A compendium of solar Dish/Stirling technology*. California: Sandia National Laboratories. Recuperado de <https://www.osti.gov/servlets/purl/10130410>

Willoughby, A. B. (1954). Absolute water flow calorimeter for the measurement of intense beams of radiant energy. *Review of Scientific Instruments*, 25(7), 667-670. doi: 10.1063/1.1771155