

## COLECTOR SOLAR PDR DE PEQUEÑA MODULARIDAD

Durán Medina Pino, Barbosa Saldaña Juan Gabriel, Quinto Diez Pedro, Jiménez Bernal José Alfredo, Sánchez Silva Florencio  
Instituto Politécnico Nacional ESIME-Zacatenco  
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, LABINTHAP.  
Av. IPN s/n, UPALM Edif. 5, 3er piso, C.P. 07738 México, D.F.  
pinoduran@hotmail.com

### RESUMEN

Los colectores de concentración del tipo disco parabólico reflector (PDR) se manejan a gran escala para generación de energía eléctrica, sin embargo el desarrollo de esta tecnología a pequeña escala permite alcanzar elevados niveles de concentración para generación de energía térmica, con lo cual se podrían satisfacer necesidades de agua caliente en edificios, casa habitación o incluso en la pequeña industria. El proceso de construcción e integración del colector solar PDR de pequeña modularidad se realiza en cuatro partes: Dimensionamiento del disco parabólico; Diseño del sistema de control para un seguimiento solar; Diseño y construcción de los mecanismos para la sujeción y movimiento; Integración y pruebas de funcionalidad. El prototipo resultante es completamente funcional y alcanza temperaturas de hasta 400°C bajo clima parcialmente nublado. La temperatura en el punto focal presenta un comportamiento en tiempo real dependiente casi en su totalidad de la radiación solar incidente sobre el absorbedor.

Palabras claves: Concentración, Control, Disco, Parabólico, Seguimiento, Térmica

### INTRODUCCIÓN

La energía solar resulta una alternativa viable para solucionar los problemas energéticos que el uso de los combustibles fósiles conlleva. En la actualidad existe mucha información acerca del comportamiento de esta energía, en que magnitud se recibe en nuestro planeta y especialmente en México. Actualmente se siguen generando conocimientos y avances tecnológicos con el objetivo de lograr una mejor captación de la energía solar de forma cada vez más económica y eficiente, para esto se han desarrollado una serie de modelos experimentales y a partir de ellos se ha pretendido mejorarlos cada vez más, sin embargo, estas mejoras llevan consigo un inevitable incremento en los costos de fabricación.

Existen diversas tecnologías de colectores solares cuyas eficiencias dependen de la

capacidad de captación de radiación solar, siendo la más usada la del tipo colector plano, sin embargo, su concentración es relativamente baja comparada con otras tecnologías utilizadas a niveles industriales gigantescos, tal es el caso de los colectores de concentración, específicamente de disco parabólico reflector que de entre todos los tipos de colectores solares, éste presenta una vía de mayor eficiencia para la obtención de energía térmica ya que optimiza el uso de la radiación solar directa siendo ésta la fracción de la radiación total que aporta mayor cantidad de energía; de ésta forma es posible obtener un alto rendimiento logrando alcanzar temperaturas de hasta 1500 °C dependiendo del diseño (Kalogirou 2009).

Sin embargo, hasta ahora la tecnología de concentración se ha manejado a gran escala (de 5 a 7 m de diámetro) justificando así la demanda de energía eléctrica necesaria para mover el colector en dos ejes de rotación lo que

precisamente le da la posibilidad de alcanzar elevados niveles de concentración. La razón de generar un colector solar PDR de pequeña modularidad radica en hacer que la tecnología solar de concentración sea aplicable a satisfacer las necesidades de energía térmica para servicios y usos industriales de la pequeña y mediana industria así como de casa habitación, y deje de ser exclusiva de la producción de vapor para generación de potencia.

### DISCO PARABÓLICO REFLECTOR

Para definir las dimensiones del concentrador primero se establece la relación de concentración  $C$  siendo éste el factor por el cual se incrementa el flux de radiación sobre la superficie absorbadora de energía. El valor máximo de la relación de concentración  $C_{max}$  es función del ángulo de borde del disco  $\phi_r$  (Duffie 2009) cuya relación matemática es:

$$C_{max} = \frac{\text{sen}^2 \phi_r \cos^2 (\phi_r + 0.267 + \frac{\delta}{2})}{4 \text{sen}^2 (0.267 + \frac{\delta}{2})} - 1 \quad (1)$$

La dispersión angular  $\delta$  considera los errores angulares asociados a un seguimiento solar inapropiado, rugosidades inherentes a la superficie reflectora y mal conformado en la curvatura (Sol & Wieder 2003).

En la Fig. 1 se muestra una gráfica  $\phi$  contra  $C_{max}$  para los casos ideal sin considerar  $\delta$  y real, se observa que para los colectores de concentración PDR se alcanza el máximo valor de concentración cuando  $\phi_r = 45^\circ$  pero el ángulo de dispersión reduce significativamente la cantidad de radiación sobre la superficie absorbadora.

A partir del valor de  $\phi_r = 45^\circ$  y  $C_{max} = 280$ , en la Tab. 1 se proponen diversos diámetros para el disco, calculando para cada uno de ellos la distancia focal  $f$ , así como el radio de borde  $r_r$  y el ancho de imagen focal  $W$ , necesarios para mantener  $\phi_r$  en  $45^\circ$ . Estos parámetros geométricos se muestran gráficamente en la Fig. 2.

Diámetros menores a 1 m proporcionan imágenes focales muy pequeñas como para considerar la construcción de un intercambiador de calor funcional. Diámetros de 1.75 m en adelante se consideran demasiado grandes para cumplir con el criterio de pequeña modularidad. Por tanto, el diámetro de disco propuesto para la construcción del disco parabólico queda definido en un valor de 1.5 m ya que su correspondiente ancho de imagen de casi 5 cm permitirá colocar sobre su punto focal un dispositivo de intercambio de calor que resulte en un buen aprovechamiento de la radiación solar.

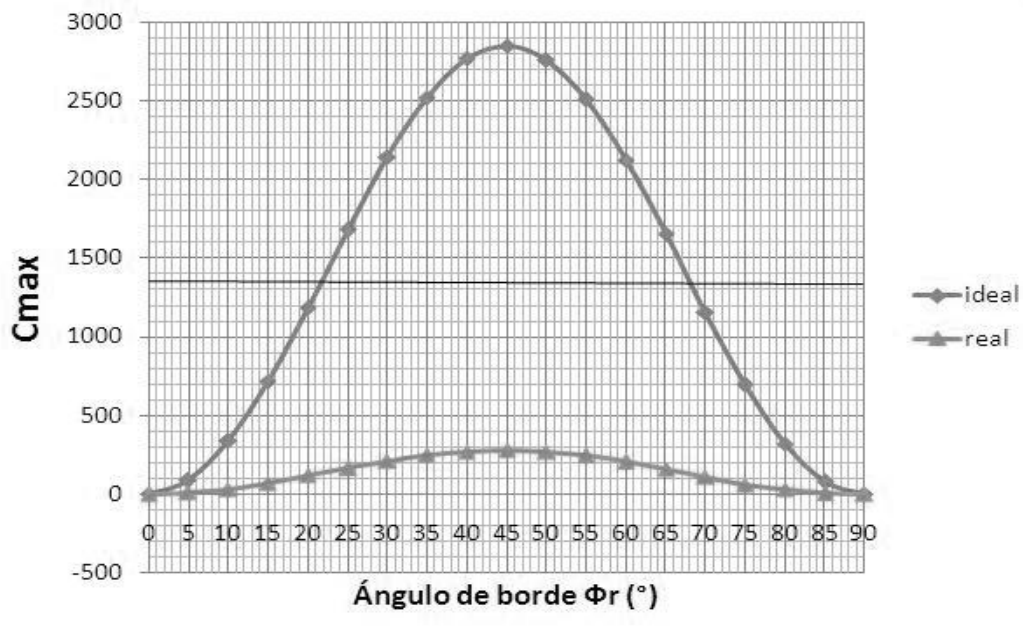


Figura 1. Relación de concentración máxima para colectores PDR.

Diámetro de disco, a	Distancia focal, f	Radio de borde, $r_r$	Ancho de imagen focal, W
m	m	m	m
0.5	0.302	0.354	0.015
0.75	0.453	0.530	0.022
1	0.604	0.707	0.030
1.25	0.754	0.884	0.037
<b>1.5</b>	<b>0.905</b>	<b>1.061</b>	<b>0.045</b>
1.75	1.056	1.237	0.052
2	1.207	1.414	0.060
2.25	1.358	1.591	0.067
2.5	1.509	1.768	0.075
3	1.811	2.121	0.089

Tabla 2. Variación de parámetros geométricos del disco parabólico.

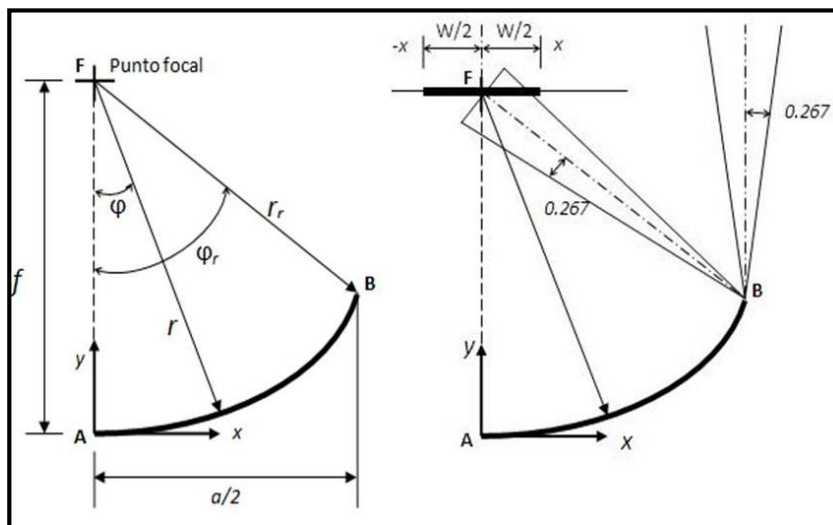


Figura 2. Parámetros geométricos de un disco parabólico reflector.

La fabricación del disco resultante en la Fig. 3 se realizó en fibra de vidrio con un recubrimiento de papel reflejante Mylar con 0.85 de reflectividad. Respecto al punto focal o receptor, éste cuenta con un modo de sujeción tipo tripie en el cual se pueden colocar materiales absorbentes circulares de hasta 15 cm de diámetro, sin embargo para el caso particular del presente trabajo, el absorbente fue maquinado a partir de una barra circular de aluminio de 5 cm de diámetro.

### SISTEMA DE CONTROL

El motor necesario para la rotación axial de los ejes de movimiento del colector debe proporcionar un torque capaz de mover por lo menos 30 kg para elevación y el doble para acimut, por otra parte debido al movimiento paulatino del Sol a lo largo del día, no se requiere una gran potencia. Dado que se requiere un gran torque a una baja velocidad y una transmisión de movimiento unidireccional del motor hacia la masa del colector, se considera un

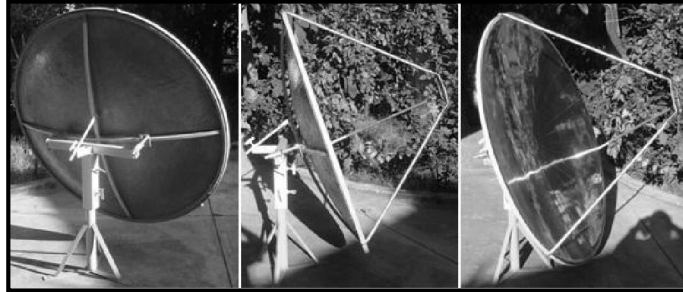


Figura 3. Disco reflector con tripie de sujeción para el elemento absorbedor.

motor del tipo sinfín-corona automotriz o wipermotor. Para el control de movimiento de cada motor se propone una estrategia de control en lazo abierto, como se observa en la Fig. 4, en donde haciendo uso de las relaciones matemáticas que determinan la posición del Sol en cualquier día del año a cualquier hora del día (Duffie 2009), se genera un algoritmo que permite el accionamiento de dos motores de corriente directa, uno para movimiento de elevación (0 a 90°) y otro para movimiento acimutal (0 a 180°), de forma que para obtener un grado de movimiento en cada eje de rotación el motor correspondiente debe dar media revolución.

El cambio de orientación del colector se establece para cada 5 min, cumpliendo así con dos propósitos, el primero es que el movimiento de orientación del colector sea casi continuo procurando que la mayor cantidad de radiación

sea reflejada dentro del receptor, y el segundo, se evita que el colector tenga movimientos bruscos que generan errores de enfoque en la captación de la radiación sobre el receptor.

El módulo de control diseñado contiene toda la electrónica de control, electrónica de potencia, micro controlador y variador de velocidad necesarios para alojan los algoritmos de control y obtener una respuesta del sistema de seguimiento.

### SISTEMA MECÁNICO

Se diseñó un reductor de velocidad conformado por el acoplamiento de diferentes engranes llamados conductores y conducidos.

Con el fin de que la caja no sea muy pesada ni robusta se propone un diseño de 4 engranes como el que se muestra en la Fig. 5.

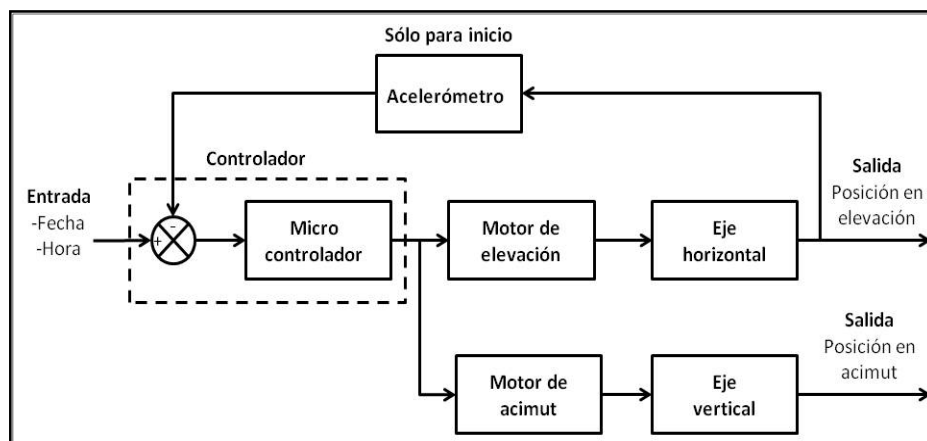


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema de control.

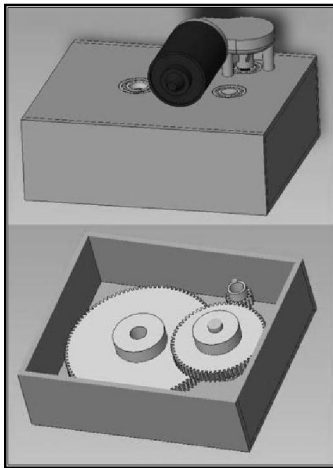


Figura 5. Diseño final de la caja de engranes.

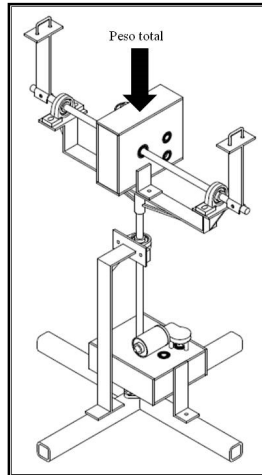


Figura 6. Estructura de soporte del colector.



Figura 7. Estructura de soporte del colector.

Siguiendo el criterio de pequeña modularidad, se diseña un nuevo sistema de soporte mostrado en la Fig. 6 que concentra todo el peso del colector justo sobre el eje vertical de manera que no exista un desbalance de peso durante el movimiento del colector ocasionado tal vez por el propio disco reflector o las cajas de engranes siendo estos dos componentes los más pesados.

La integración del disco parabólico reflector, sistema de control y sistema mecánico se muestra en la Fig. 7, conformando así el prototipo final de colector solar PDR.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la medición de la radiación total sobre una superficie horizontal se utilizó un medidor de radiación total en  $W/m^2$  calibrado para el

espectro solar bajo condiciones normales de prueba, es decir espectro para una masa de aire de 1.5 (AM1.5), con  $GT = 1000 W/m^2$  (a  $25^\circ C$ ), que es similar a la luz del Sol directa al mediodía en el centro de Europa. A partir de esta medición de radiación total, se obtuvo la radiación directa normal al plano de apertura del colector, a partir del modelo matemático de la correlación de Erbs.

Para la obtención de la temperatura alcanzada sobre el elemento absorbedor, se utilizó un termopar tipo J, clase 2, calibrado para un rango de temperaturas de  $-40$  a  $750^\circ C$ . El termopar en todo momento se mantiene en contacto directo con el elemento absorbedor sin que éste último cuente con algún tipo de aislamiento térmico.

Ciudad de México, México	Latitud $19.5^\circ$ Norte Longitud estándar $-90^\circ$ Longitud local $-99^\circ$
Tiempo normal	10:30 a 16:00 hrs
Ángulo horario $\omega$	$-46$ a $37^\circ$
Prueba 1	13/09/2012 Clima nublado
Prueba 2	14/09/2012 Clima parcialmente nublado

Tabla 2. Condiciones de pruebas experimentales.

## Colector Solar PDR de pequeña modularidad

Se realizaron dos pruebas experimentales en la misma zona geográfica para los mismos intervalos de tiempo como se especifica en la Tab. 2.

radiación total que indica un predominio de la radiación difusa sobre la radiación directa.

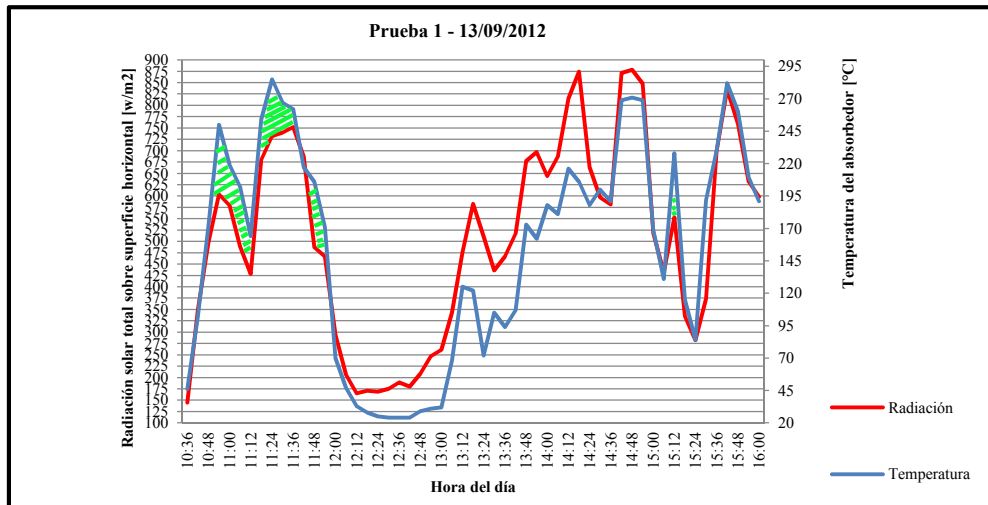


Figura 8. Gráfica de datos experimentales obtenidos para la prueba 1.

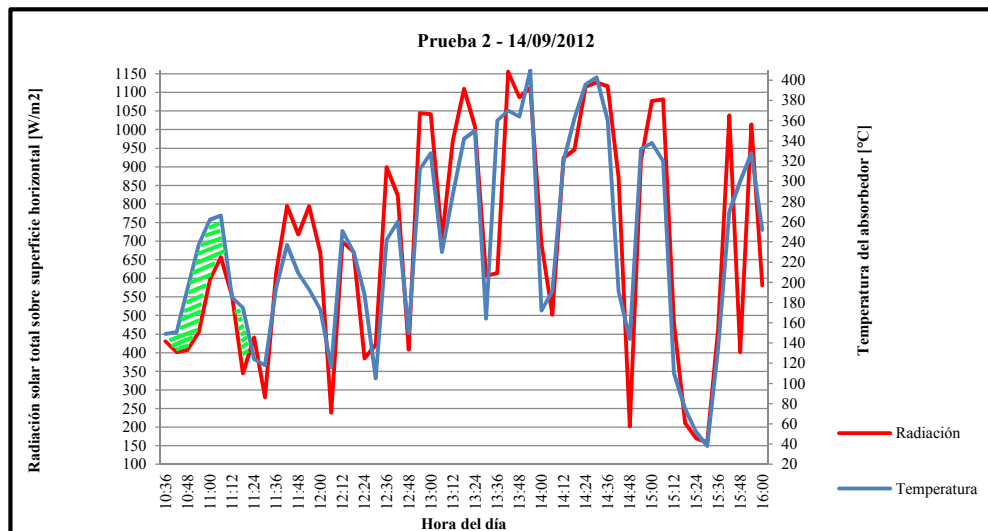


Figura 9. Gráfica de datos experimentales obtenidos para la prueba 2.

Los datos experimentales de radiación y temperatura en el absorbedor en función del tiempo mostrados en las Figs. 8, 9, 10 y 11 dan razón cuantitativamente de las condiciones climatológicas en los que fueron tomados, clima nublado y parcialmente nublado, esto mediante la comparación de las componentes de la

Considerando sólo los datos de las gráficas en las Figs. 8 y 9, se muestra claramente una relación directamente proporcional entre la radiación total y la temperatura alcanzada por el absorbedor en el punto focal. Los picos indican puntos de muestreo que pueden considerarse como instantes de claridad solar, son en estos puntos donde se alcanzan los máximos valores

de temperatura. Sin embargo, los decrementos abruptos de la misma se traducen no sólo como instantes donde las nubosidades interfieren con el paso de la radiación solar sino que también se tiene la existencia de corrientes de aire que aceleran la transferencia de calor por convección generando pérdidas de calor en el elemento absorbedor.

A partir de las mediciones de radiación, se obtiene una estimación de la radiación solar directa incidente de forma normal al plano de apertura del concentrador, a partir de la cual se calcula el flux absorbido en el punto focal que a su vez servirá para futuras estimaciones de energía útil las cuales podrán ser sujetas a comprobación experimental.

Las Figs. 10 y 11 presentan gráficamente la variación de radiación solar directa  $I_b$ , radiación solar directa normal al plano de apertura del disco  $I_{b,a}$  y la radiación solar reflejada sobre el punto focal  $S$ , a lo largo del período de muestreo para cada día de prueba, en ellas se aprecia la continuidad de la misma relación proporcional entre la radiación total registrada y el flux absorbido en el punto focal que en última instancia se traduce en la variación de temperatura mostrada en el absorbedor.

En la prueba 1, la mínima temperatura alcanzada fue de 24 °C entre 12:30 y 12:42 hrs, mientras que la máxima fue de 282 °C a las 15:42 hrs. En la prueba 2, la mínima temperatura alcanzada fue de 38 °C a las 15:30 hrs, mientras que la máxima

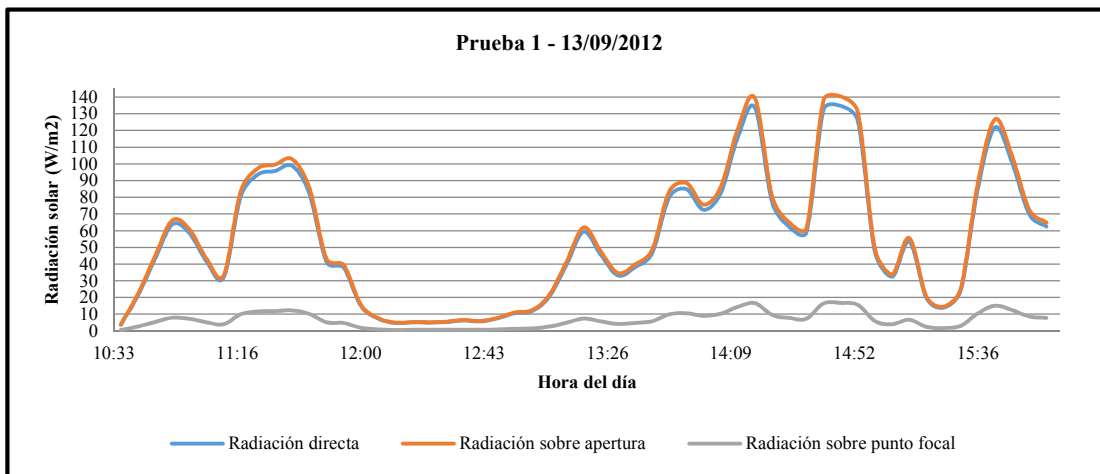


Figura 10. Comparativa entre la radiación directa, radiación sobre el plano de apertura del concentrador y radiación sobre el punto focal para la prueba 1.

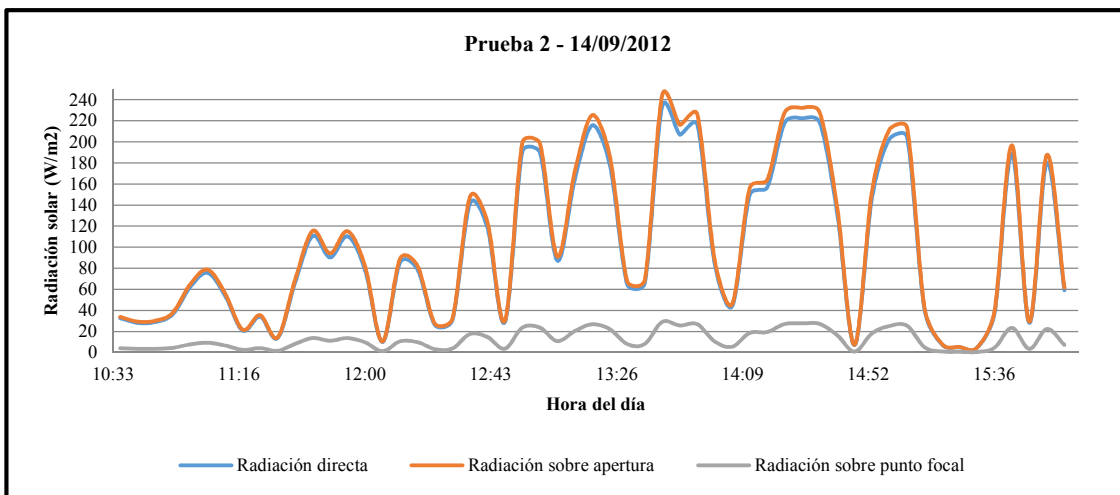


Figura 11. Comparativa entre la radiación directa, radiación sobre el plano de apertura del concentrador y radiación sobre el punto focal para la prueba 2.

fue de 410 °C a las 13:54 hrs. Estos valores mínimos y máximos de temperatura del absorbedor se asocian directamente a los mínimos y máximos de radiación solar incidente registrados en el medidor de radiación. Por lo cual se puede mencionar que el punto focal tiene un comportamiento en tiempo real que depende en su mayor parte de la radiación solar incidente.

Se puede estimar que el intervalo de operación del colector muestra un amplio rango de aplicación debido a las temperaturas que se pueden alcanzar, registrándose rangos de temperatura de más de 400° C lo que hace del dispositivo PDR una fuente de energía de alta calidad según el objetivo general de este estudio.

### **CONCLUSIONES**

El prototipo es funcional y cumple completamente con el objetivo planteado. Se logró aplicar la tecnología de colectores solares PDR a una escala menor que la usual, de forma que pueda instalarse en casa habitación o en la pequeña empresa, cumpliendo así con el criterio de pequeña modularidad.

Para el caso específico de diseño de los colectores PDR, la elección del diámetro adecuado depende en primera instancia de conocer el ángulo de borde que proporciona la máxima concentración. Una vez conocido, este ángulo debe mantenerse constante para asegurar la máxima concentración y a continuación se podrá variar libremente las dimensiones que más convengan respecto a las características geométricas de la parábola: distancia focal, concavidad y diámetro.

La radiación solar directa incidente de forma perpendicular o normal al plano de apertura es en todo momento mayor a la radiación directa sobre un plano horizontal, esto demuestra que funciona el sistema de control propuesto y que efectivamente se está siguiendo la trayectoria del movimiento aparente del Sol. El sistema se posicionará en dirección al Sol sin importar la obstrucción de la radiación solar ya sea por nubosidades, edificios, árboles o cualquier otro objeto que genere sombra.

El error por dispersión angular considerado permitió dimensionar un ancho de imagen focal adecuado de forma que la radiación solar reflejada por el disco se concentra casi en su totalidad dentro del área absorbidora.

Aunque las pruebas se realizaron durante días nublados, en el punto focal se lograron obtener magnitudes significativas de temperatura por lo que en días claros se podrían esperar magnitudes de hasta 600 °C o más.

### **BIBLIOGRAFÍA**

S. Kalogirou. “Solar energy engineering processes and systems”. Academic Press, 2009.

Duffie J. A., Beckman W.A., “Solar Engineering of Thermal Processes”, 3rd. ed., Ed. Wiley, 2009.

Sol – Wieder, “An introduction to solar energy for Scientists and Engineers”, Fairleigh Dickinson University, Ed. Wiley, 2003.