

DISEÑO DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN POTENCIA MECÁNICA COMPUESTO POR UN CONCENTRADOR SOLAR Y UN MOTOR STIRLING

Jose Luis García Campuzano

Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, jgarci21@eafit.edu.co

Luis Santiago Paris Londoño

Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, lparis@eafit.edu.co

RESUMEN

Este proyecto consistió en el diseño, construcción y realización de pruebas de un sistema que permite la obtención de potencia mecánica a partir de energía solar. Dicho sistema está compuesto por un concentrador de rayos solares y un motor Stirling tipo beta. El concentrador solar es un disco parabólico de superficie brillante, que capta y refleja la mayor cantidad posible de luz solar y la enfoca en una región de área reducida. Este concentrador incrementa la energía en 103 veces. El motor Stirling convierte la energía térmica generada por el concentrador solar en potencia mecánica, la cual es de aproximadamente 8W.

Palabras claves: Energía solar, atlas radiación solar, concentrador solar, espejo parabólico, motor Stirling.

ABSTRACT

This project consisted in designing, manufacturing and testing a system which allows the obtaining of mechanical power from solar energy. Such a system is composed by a solar rays concentrator and a beta type Stirling engine. The solar concentrator is a bright surface parabolic dish, which harnesses and reflects the highest amount possible of solar light and focuses it into a reduced area. This concentrator increases the energy 103 times. The Stirling engine converts the thermal energy generated by the solar concentrator into mechanical power, which is about 8W.

Keywords: Solar energy, solar radiation atlas, solar concentrator, parabolic mirror, Stirling engine.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el consumo de energía proveniente de combustibles fósiles está ligado a una serie de factores económicos, sociales y ambientales que afectan cada vez más el pleno desarrollo de la vida en la tierra. El calentamiento global, la inestabilidad en los precios del petróleo y la contaminación del medio ambiente son solo algunos de los impactos generados por dichos factores.

Por lo anterior, hoy en día se está despertando a nivel mundial un especial interés hacia la generación de energía proveniente de fuentes alternativas, que siempre han estado disponibles en la naturaleza y que han sido subvaloradas debido al gran auge que siempre han tenido los combustibles provenientes de fuentes no renovables.

La energía solar además de proporcionar el 99.97% de la energía usada en la tierra para todos sus procesos naturales (UPME, 2005) y el hecho de que durante el presente año arrojará sobre la tierra cuatro mil veces más energía de la que será consumida por todo el planeta, representa una fuente que ha estado disponible desde hace millones de años y se cree que aún no ha alcanzado la mitad de su existencia (CENSOLAR, 2010).

Uno de los usos más comunes que da el hombre a la energía es el de realizar trabajo mecánico, y una forma de aprovechar la energía solar para lograr este tipo de tarea es mediante una máquina térmica llamada motor Stirling.

Gracias a que este tipo de máquina necesita una fuente de calor con alta temperatura y otra con baja temperatura para su funcionamiento, el motor Stirling representa una buena alternativa para la transformación de la energía solar teniendo como fuente de calor el Sol y como sumidero el medio ambiente.

2. ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA

Colombia por ser un país ubicado cerca de la línea del Ecuador se encuentra en una posición privilegiada en cuanto a la cantidad de radiación solar recibida por año, por esta razón no se ve afectado por el cambio del clima debido a las estaciones y presenta una gran capacidad de producción en este tipo de energía, contando con zonas que presentan hasta 6,5 Kwh/m² por día de luz (Delgado, 2007). La tabla 1 muestra la radiación solar en las diferentes regiones del país en términos de energía por unidad de área en un año.

Tabla 1. Radiación solar en Colombia por regiones (ISAGEN, 2005) .

REGIÓN DEL PAIS	Radiación Solar [KWh/m ² /año]
Guajira	2000 – 2200
Costa Atlántica	1800 – 2000
Orinoquía-Amazonía	1800 - 2000
Región Andina	1600 – 1800
Costa Pacifica	1400 – 1600

2.1 ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR

El Atlas de Radiación Solar, publicado por la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME), es un documento muy completo sobre las características que posee la radiación solar incidente en el país. Este atlas tiene como parte principal los mapas correspondientes a la radiación solar en las regiones del país para cada mes.

En la figura 1 se puede observar el promedio que ha tenido la radiación solar en las diferentes regiones de Colombia durante los últimos años (promedio multianual). La escala de colores va desde azul oscuro (intensidad mínima: 2,5 – 3,0 KWh/m²/día) hasta el color rojo (intensidad máxima: 6,5 – 7,0 KWh/m²/día).

2.2 ENERGÍA SOLAR EN MEDELLÍN

Tomando como guía el atlas de radiación solar de la UPME, se observa en el mapa que contiene la información de las radiaciones promedio de todo el año, que para la ciudad de Medellín la radiación promedio es de 4,0 a 4,5 KWh/m² al día.

También es posible saber el comportamiento para cada mes del año, de la radiación solar en Medellín (o en cualquier ciudad o región de Colombia) de acuerdo a la información obtenida en los mapas solares. Después de observar en los mapas respectivos, se obtiene el comportamiento de la radiación según muestra la figura 2.

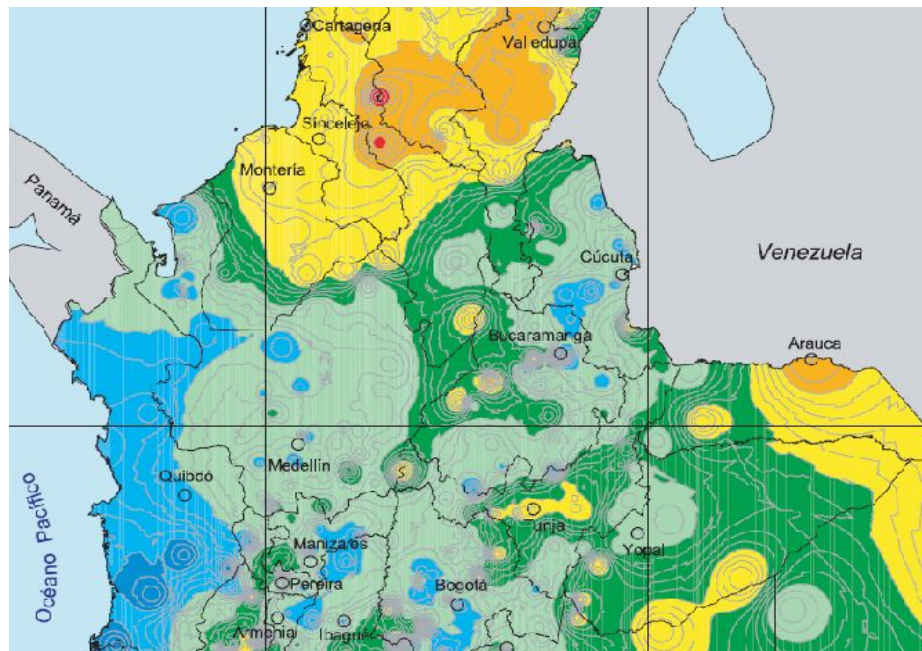


Figura 1. Porción del mapa de Colombia con la radiación promedio multianual (UPME, 2005).

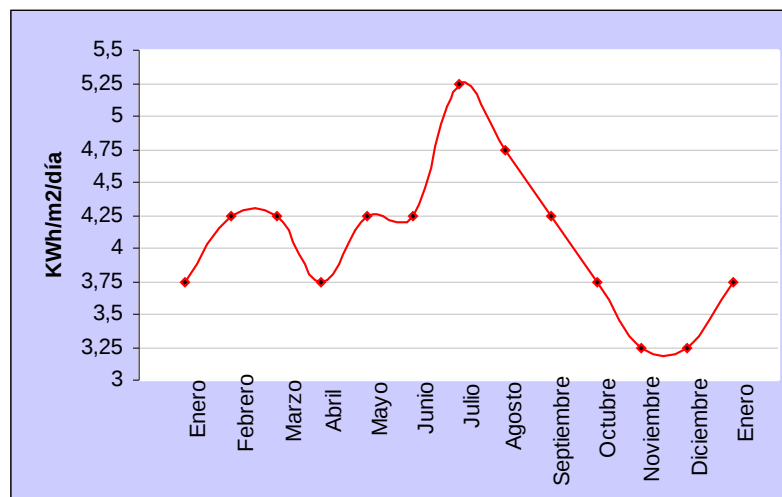


Figura 2. Radiación solar diaria promedio en Medellín para cada mes del año.

3. CONCENTRADOR SOLAR

Generalmente la energía solar directa es concentrada por medio de lentes ó espejos. En este proyecto se eligió usar espejos o superficies reflectoras como medio de concentración de radiación, ya que los lentes son más costosos y absorben mayor energía debido al paso del rayo de luz a través de este. Por su parte los espejos concentran la energía por reflexión y su absorción de energía es mínima (Wieder, 1982a).

3.1 ESPEJOS PARABÓLICOS

Los espejos parabólicos tienen la propiedad de que todos los rayos que llegan paralelos al eje óptico y , al ser reflejados, pasan por el foco f (figura 3). Los espejos esféricos se comportan de igual forma cuando corresponden a una pequeña sección de esfera (Serway, 1997).

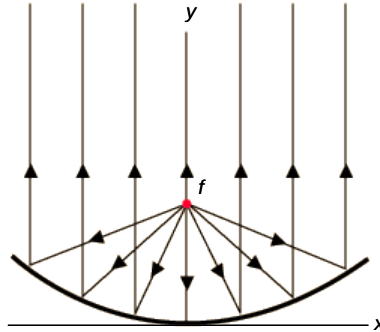


Figura 3. Corte en dos dimensiones de un espejo parabólico.

En la realidad los rayos no coinciden literalmente en un punto, sino más bien, en una región con un área determinada. La relación entre el área de captación del concentrador y el área a la cual es redireccionada la radiación, se le conoce como *radio de concentración* (CR) y se expresa matemáticamente según la ecuación 1 (Wieder, 1982b).

$$CR = \text{Área de captación} / \text{Área de la imagen} \quad \text{EC. 1}$$

El concentrador usado en este proyecto es un disco parabólico metálico, el cual se obtuvo de un receptor de televisión satelital. La superficie de este disco se sometió a varios procesos de brillado con el fin de obtener la mayor reflexión de luz solar posible. El perímetro de este concentrador describe la geometría de una elipse con 70 cm de longitud en su eje mayor y 60 cm en su eje menor (figura 4).

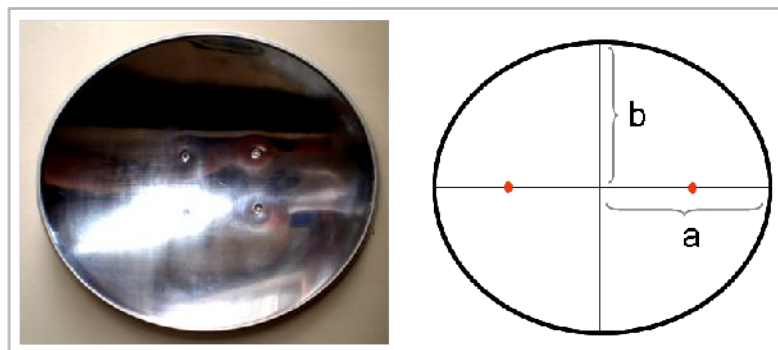


Figura 4. Disco parabólico usado como concentrador solar.

Debido a que este concentrador no es literalmente un espejo, su capacidad para reflejar la luz solar es menor (su factor de reflexión está entre 60% y 65%). La imagen proyectada por este concentrador es un círculo de 5 cm de diámetro aproximadamente. Los valores correspondientes a sus dimensiones y el cálculo de su radio de concentración se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2. Área de captación, área de la imagen proyectada y CR del concentrador solar.

a (m)	b (m)	Área Captación (m ²)	Área Proyección (m ²)	Radio Concentración
0,335	0,295	0,310	0,002	158,160

Multiplicando el radio de concentración (158,16) por el factor de reflexión del concentrador (0,65), se obtiene que el incremento real en la energía solar es de **103** veces aproximadamente.

4. MOTOR STIRLING

Un motor Stirling como cualquier máquina térmica comprende los cuatro procesos básicos de compresión, calentamiento, expansión y enfriamiento. A diferencia de los motores de combustión interna, en este motor el gas que realiza el trabajo nunca abandona las fronteras del sistema y su funcionamiento se basa en la expansión y compresión de este, por medio de su calentamiento y enfriamiento respectivamente.

La configuración más básica de estos motores consiste en un juego de pistones, intercambiadores de calor y un elemento llamado “regenerador”. El fluido puede ser aire (más común), helio, hidrogeno o nitrógeno. Los pistones son organizados de tal forma que ambos crean un cambio en el volumen del fluido de trabajo y establecen un flujo neto hacia los intercambiadores de calor, de esta forma el calor es absorbido de una fuente exterior para crear energía mecánica y luego regresado al ambiente a través de su parte de baja temperatura (Martini, 1983). La figura 5 muestra el esquema básico del motor *Stirling tipo beta*, elegido para la transformación de la energía térmica en potencia mecánica.

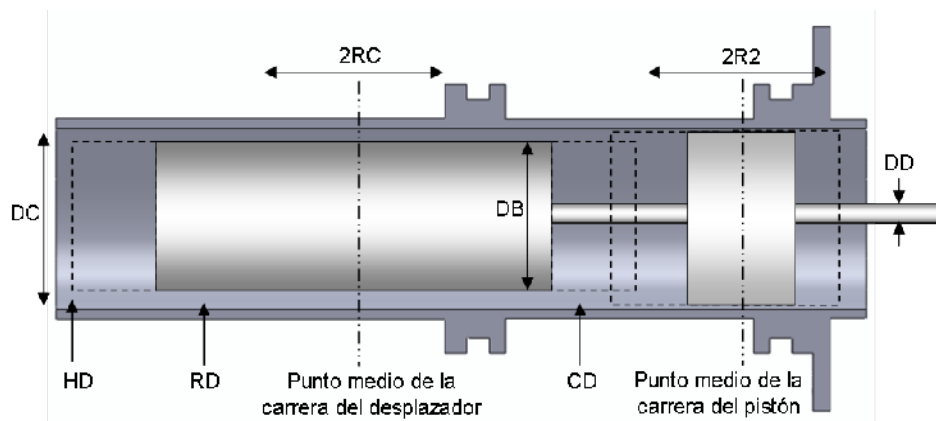


Figura 5. Partes del motor tipo Beta para analizar con el ciclo Schmidt.

- DB = Diámetro del desplazador.
- DD = Diámetro del eje del desplazador.
- DC = Diámetro interior del cilindro.
- HD = Volumen muerto en la zona de alta temperatura, (cm³).
- 2RC = Carrera del desplazador, (cm).
- RD = Volumen muerto del regenerador, (cm³).
- CD = Volumen muerto en la zona de baja temperatura, (cm³).
- 2R2 = Carrera del pistón de potencia, (cm).

4.1 DISEÑO DEL MOTOR

Las dimensiones del motor mostradas en la figura 5 se modificaron reiteradamente, con el fin de hallar la configuración que permitiera al motor entregar una cantidad mayor de trabajo por ciclo. El trabajo se obtuvo usando como base de cálculo el *ciclo Schmidt* para motores Stirling, en el cual el pistón de potencia y el pistón de desplazamiento se mueven sinusoidalmente. El proceso que permitió encontrar la mejor opción de diseño del motor, se resume en el diagrama de la figura 6.

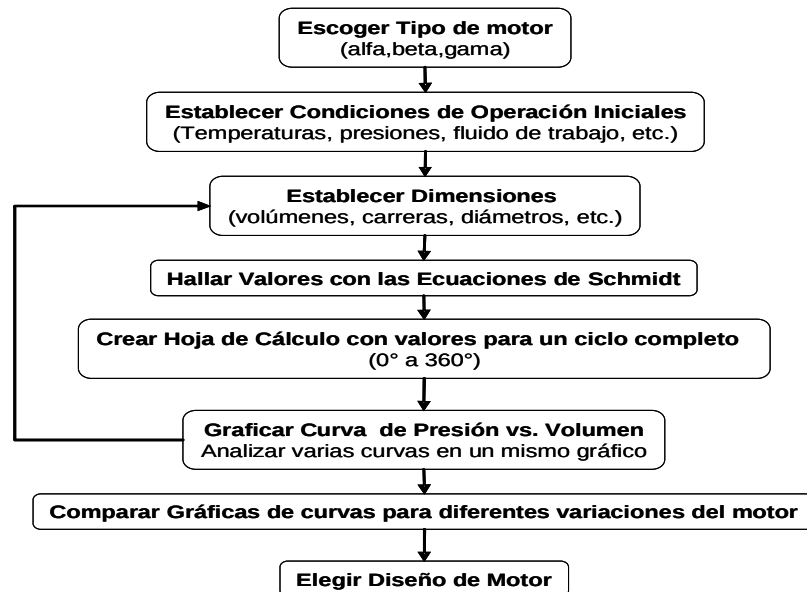


Figura 6. Diagrama del proceso seguido para el diseño del motor.

4.2 MODELACIÓN GEOMÉTRICA

Después de haber realizado los cálculos termodinámicos y tener claras las dimensiones del motor, el siguiente paso fue crear un modelo 3D (figura 7) que permitiera el análisis de cada una de sus piezas y como se relacionarían estas entre sí. El diseño de la geometría de las piezas se basó en el libro *Stirling and Hot Air Engines* (Darlington y Strong, 2005) y con el programa CAD SOLIDWORKS se modelaron las piezas, se creó el ensamble de estas y luego se simuló su movimiento para analizar el comportamiento mecánico del motor, para finalmente elaborar los planos de taller para su manufactura.

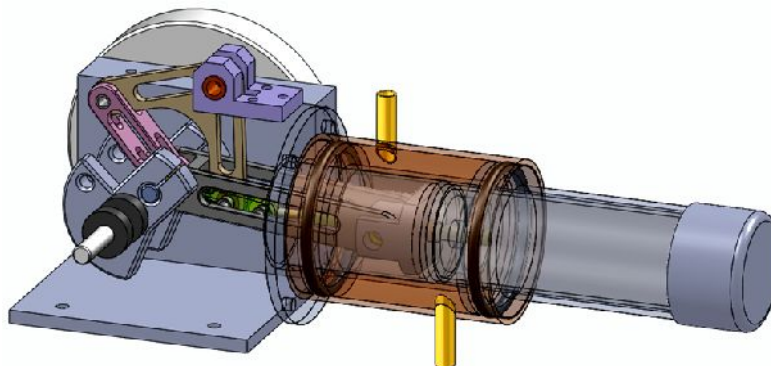


Figura 7. Modelo parcial 3D del motor.

4.3 MANUFACTURA DEL MOTOR

Los materiales seleccionados para la elaboración de cada pieza, dependen de la función que esta vaya a desempeñar dentro del motor y de su interacción con los demás componentes. Entre los materiales presentes en el motor se encuentran Hierro gris, aluminio, Acero A36, bronce fosforado, cobre, acero inoxidable y latón. La manufactura de las piezas se realizó en su totalidad en el laboratorio de Modelos de la universidad EAFIT, por medio de máquinas herramientas como torno, fresadora, taladro y cortadora de plasma. En la tabla 3 se nombran algunas piezas junto con el material y herramientas utilizados en su fabricación. Las figuras 8, 9 Y 10 muestran el sistema de transmisión de potencia, el motor terminado y el sistema final ensamblado respectivamente.

Tabla 3. Material y máquinas algunas piezas del motor.

Plano No.	Nombre de la pieza	Material	Máquinas Utilizadas
1	Cilindro fundición	Hierro Gris	Torno y Rectificadora
2	Pistón de potencia	Hierro Gris	Torno y Rectificadora
3	Pistón de desplazamiento	Aluminio	Torno
4	Tapón cilindro	Hierro Gris	Torno
5	Camisa refrigeración	Tubería Cobre	Torno y Taladro



Figura 8. Sistema completo de transmisión de potencia.

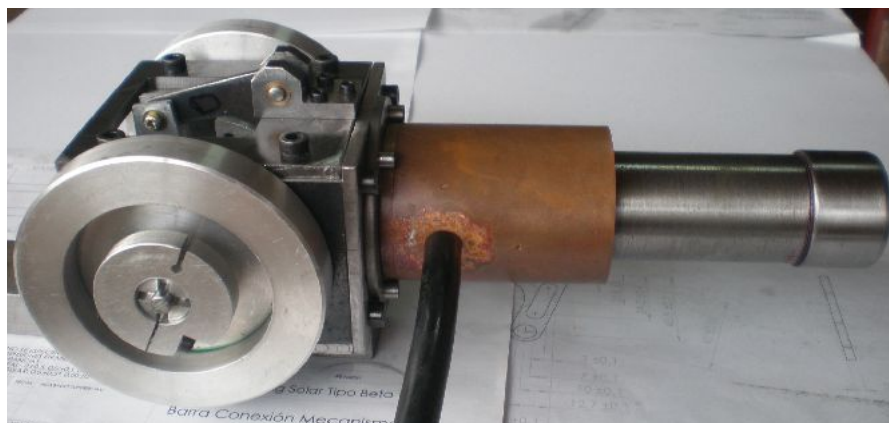


Figura 9. Motor terminado completamente y ensamblado.



Figura 10. Sistema final ensamblado.

5. PRUEBAS

Las pruebas para determinar las características del sistema se hicieron primero en cada uno de los componentes (concentrador y motor) y luego se evaluó el sistema en conjunto.

El concentrador solar se sometió a diferentes intensidades de radiación solar y se tomaron las temperaturas de captación y concentración. El valor máximo en la zona de concentración fue de 233°C para un valor de 36°C en la zona de captación.

En el motor se realizaron mediciones en las zonas de alta y baja temperatura, al mismo tiempo que se medían sus RPM, para estimar el valor de su potencia. Para la zona de baja temperatura del motor se utilizó como refrigerante agua a temperatura ambiente, mientras que el fluido de trabajo en el interior del motor fue aire a presión atmosférica (0,085 MPa en Medellín).

Antes de acoplar el motor al concentrador, se probó su desempeño con gas natural como fuente de calor en una estufa de gas casera. La potencia máxima entregada por el motor en esta prueba fue de 7,74 W a 859 RPM, 300°C en la zona de alta temperatura y 36°C en la zona de baja temperatura.

El motor Stirling se ubicó de manera que su zona de alta temperatura coincidiera con la región de alta intensidad del concentrador solar. El resultado del comportamiento del sistema acoplado (Concentrador-Motor) se muestra en la tabla 3.

En las pruebas realizadas al motor se observa que este empieza a funcionar solo a partir de los 175°C en la zona de alta temperatura. La potencia y torque obtenidas se hallaron por medio de la medición directa de las diferentes temperaturas, la medición directa de las RPM y aplicando la ecuación de *Beale*. La bibliografía investigada garantiza que esta ecuación ofrece una buena aproximación a datos de medición reales para hallar la potencia del motor.

Tabla 3. Datos obtenidos del sistema completo.

Temperatura Captación (°C)	Temperatura Concentración TH(°C)	TL (°C)	RPM	Torque (N*m)	Potencia (W)
25,2	25,0	25,4	0	0	0
26,4	31,1	25,6	0	0	0
27,3	37,2	26,8	0	0	0
28,3	43,4	26,2	0	0	0
29,5	49,5	27,5	0	0	0
30,6	55,7	28,8	0	0	0
31,4	61,8	28,5	0	0	0
32,9	68,0	28,3	0	0	0
33,7	109,2	29,1	0	0	0
34,2	150,5	30,4	0	0	0
35,5	175,0	31,3	800	0,081	6,78
35,4	191,7	31,7	842	0,082	7,24
36,8	233,0	32,7	844	0,083	7,35

5.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Respecto a la medición de las temperaturas del concentrador, se observa que el valor en la zona de captación es muy similar al de la zona de proyección para valores de temperatura bajos, sin embargo a medida que se capta mayor radiación directa el incremento de la temperatura en la zona de concentración crece de manera considerable.

El motor se estabiliza en las 844 RPM alrededor de los 233°C. Después de estos valores, los incrementos de temperatura dieron como resultado un descenso gradual en las RPM hasta que el motor se detuvo por completo.

La potencia entregada por el motor es de 8W aproximadamente lo cual es cercano a lo esperado, sin embargo hay varios factores que se pueden mejorar tanto en el sistema de concentración (utilizar una superficie con mayor capacidad de reflexión de la luz) como en el motor (mejorar ajustes y tolerancias en su manufactura); y de esta forma optimizar el desempeño del sistema.

En el sistema completo acoplado el comportamiento del motor es similar al observado en las pruebas individuales, llegando a alcanzar una potencia máxima de 7,5W a una temperatura máxima de 233°C. Este desempeño también puede mejorar en una época del año en la que se pueda captar una mayor radiación solar y bajo unas condiciones climáticas más favorables.

6. CONCLUSIONES

La investigación sobre las características que posee la energía solar en Colombia permitió establecer que existe un gran potencial de explotación, ya que el país se encuentra en una posición geográfica privilegiada y cuenta con zonas de muy alta intensidad de radiación solar como La Guajira, en donde alcanza valores promedio de 6,0 a 6,5 KWh/m² por día.

A nivel local, Medellín cuenta también con un alto potencial de energía solar, observándose un valor de radiación promedio de 4,0 a 4,5 KWh/m² por día. Esto significa que una casa en la ciudad podría auto abastecerse por medio de la energía solar, si cuenta con la tecnología adecuada para su transformación.

Los materiales usados en la manufactura del motor Stirling se obtuvieron a nivel local y este *se construyó en su totalidad* en el laboratorio de Proyectos Metal Mecánicos y el laboratorio de Máquinas Herramientas de la universidad. Esto demuestra que se cuenta con las instalaciones y la tecnología adecuadas para desarrollar proyectos de ingeniería de este tipo.

La importancia de este proyecto, además de los resultados obtenidos, radica en que se concibió como un primer paso hacia el desarrollo de tecnologías para la obtención de energías limpias y económicas, que contribuyan a satisfacer las necesidades energéticas del país y que puedan competir con las tecnologías ofrecidas actualmente a nivel internacional.

REFERENCIAS

- CENSOLAR, Centro de Estudios de la Energía Solar. La energía solar [en línea]. Sevilla (España). Disponible en Internet: <http://www.censolar.es/menu2.htm>.
- Darlington, R. y Strong, K. (2005). *Stirling and Hot Air Engines: Designing and Building Experimental Model Stirling Engines*. Crowood Press.
- Delgado, E. (2007) Aspectos teóricos en el diseño de colectores solares. *Avances Investigación en Ingeniería*, 6(6), 67-73.
- ISAGEN S.A. (2005) *Fuentes No Convencionales de Generación de Electricidad*. Colombia: ISAGEN.
- Martini, W. (1983) *Stirling Engine Design Manual. Second Edition*. Washington D.C: U.S. Department of Energy.
- Serway, R. (1997) *Física. Tomo II. 4 ed.* México D.F: McGraw-Hill.
- UPME, UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Atlas de Radiación Solar de Colombia [en línea]. Bogotá, 2005. Disponible en Internet: www.upme.gov.co/Atlas_Radiacion.htm.
- Wieder, S. (1982) *An Introduction to Solar Energy for Scientists and Engineers*. EEUU: John Wiley & Sons.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito.