

HIDROCONVERSION DE LA RADIACION SOLAR PARA APLICACIONES TERMICAS DE ALTA TEMPERATURA SIN EMISION DE SUSTANCIAS CONTAMINANTES

Guasumba José

Laboratorio de Investigaciones Científicas en Energías Renovables
Escuela Politécnica del Ejército, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Av. el Progreso S/N, Santa Clara, Sangolquí-Ecuador
Telefax: (593) 022 643 475 celular: (593) 99 832 736
e-mail: jguasumba@espe.edu.ec

Resumen

El presente proyecto, comprende la investigación y el desarrollo experimental de un concentrador parabólico esférico de 200 W térmicos, con diámetro de apertura de 1m, para la recolección y concentración de la radiación solar directa, mediante el uso del agua como medio óptico, y una envolvente en material acrílico transparente. La luz solar que se dirige en forma perpendicular hacia la pared de apertura del concentrador, es refractada en las capas tipo sandwich entre el agua y el acrílico, para reorientarse y transmitir un haz de radiación térmica de forma cónica que se disipa en el absorbedor, produciendo temperaturas superiores a los 400 °C. En este procedimiento de conversión de la energía solar, en energía térmica, no se produce emisión de sustancias contaminantes como en los procesos de combustión de los combustibles fósiles. La densidad energética obtenida, en la cámara de reacción, depende de la irradiancia solar, relación de concentración, y absortancia del absorbedor

Palabras claves: óptica geométrica, temperatura focal, irradiancia, razón de concentración, haz de radiación cónica.

Summary

The present project, there consists the research and the experimental development of the concentrating spherical parabolic one of 200 W thermal, with diameter of opening of 1m, for concentration of the solar direct radiation, by means of the use of the water like optical way, and the surrounding one in acrylic transparent material. The solar light that goes in perpendicular form towards the wall of opening of the concentrating one, is refracted in the caps sandwich among the water and the acrylic one, to there reorientate and to be transmitted a bundle of thermal radiation of conical form that vanishes in the absorbedor, producing temperatures superior to the 400 °C. In this procedure of conversion of the solar power, in thermal energy, there isn't produced emission of pollutant substances as in the processes of combustion of the fossil fuels. The energetic obtained density, in the chamber of reaction, depends on the solar irradiancia, relation of concentration, and the absorbedor's absortancia.

Introducción

Existen dentro del estado del arte, instalaciones solares térmicas de baja temperatura como el colector solar plano que tiene rendimientos de conversión del 40% al 60%, que si se acopla a una máquina térmica para generación de electricidad [1], su eficiencia no alcanzaría ni el 5%. En Europa están instalados más de 1000000 de m² de colectores planos [2], y sirven para la obtención de agua caliente sanitaria, en aplicaciones de baja temperatura inferiores a los 100°C. En el caso del Ecuador, existen desarrollos contruidos de manera artesanal, y que no se encuentran homologados para saber la calidad de materiales, durabilidad, eficiencia. En las aplicaciones de media temperatura de 100°C a 400 °C, se encuentran los concentradores parabólicos cilíndricos, y sobre los 400 °C, las lentes de Fresnel, torres de potencia, hornos solares, espejos parabólicos esféricos, donde su óptica de alta concentración necesita de materiales avanzados de alta reflectividad, difíciles de encontrarlos en el medio. Para que estas tecnologías de concentración por medios ópticos puedan ser implementadas, se necesita contar con radiación solar directa por lo menos unas 3 horas por día y valores de irradiancia dentro del rango de 500 a 1000 W/m², que se pueden obtener en los trópicos. En las zonas cercanas a la línea equinoccial, la dirección de la radiación solar directa, cae casi perpendicular, al plano horizontal, por lo que se pueden realizar importantes instalaciones para el aprovechamiento de este recurso. Sin embargo, es necesario que se considere la presencia de nubosidad intermitente, contaminación ambiental, influencia de microclimas, las mismas que reducirían las horas de utilizabilidad de los medios ópticos. A pesar de estas dificultades, es necesario propender de esta nueva iniciativa de conversión energética, que servirá para desarrollar aplicaciones de alta temperatura, utilizando para su fabricación, materiales ecológicos y aprovechando una energía inagotable y no contaminante como la solar térmica.

Definición del problema

En la actualidad, muy a pesar del vertiginoso avance de la tecnología, aun no se dispone de sistemas energéticos eficientes orientados al aprovechamiento de la energía solar térmica de alta temperatura, solo se cuenta con dispersos desarrollos a nivel experimental como el EURODISH, lente de Fresnel del CENIM [3], Hornos de Odeillo, y de la plataforma solar de Almería, que han requerido costosas inversiones para su puesta en marcha, y la utilización de materiales avanzados que originan una tremenda huella ecológica en su fabricación. Por esta razón, en la presente investigación se utiliza un medio óptico natural como es el agua, que al colocarle en una burbuja parabólica, refracta la luz solar de onda corta inferior a 0.3 μm , y lo concentra en el absorbedor, donde se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 2000°C, con diámetros de boca de 4m y superiores. Por otra parte, es necesario indicar que en Latinoamérica, no se han fortalecido las labores de investigación en el ámbito de la electricidad termosolar, que está despertando mucho interés en la comunidad científica mundial y en los medios productivos, en vista del cambio climático ocasionado por los gases de efecto invernadero, debido al uso indiscriminado de los combustibles fósiles: carbón, petróleo, gas natural, que a parte de ser deficitarios son contaminantes.

Objetivo

Desarrollar un nuevo dispositivo de conversión energética totalmente ecológico, que aproveche de forma eficiente las emisiones de luz directa con longitud de onda de 0.2 μm para concentrar en un foco de radiación térmica de alta temperatura que sobrepase los 400°C, para futuras aplicaciones de tipo industrial, académico y experimental.

Fundamentos teóricos

Radiación solar local:

Para determinar la radiación solar directa y difusa, que inciden sobre una superficie horizontal o inclinada, existen diversos procedimientos matemáticos muy complejos, con los que se obtienen valores de radiación aproximados, ya que se ven afectados por la presencia de microclimas, en las zonas de aprovechamiento. Para cuantificar la radiación global sobre superficie horizontal, se debe tomar en cuenta la radiación extraterrestre [4], que se define por:

$$H_e = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left(\left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \right) \quad (1)$$

Donde: H_e Radiación extraterrestre en $\text{kJ/m}^2\text{hr}$, I_{sc} Constante solar de $4871 \text{ kJ/m}^2\text{hr}$, n número de día del año, ϕ latitud, δ declinación, ω_s ángulo horario de la puesta de sol. Por otra parte, para determinar la duración del día N se utiliza:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2)$$

Según Page (1964), la irradiación global a nivel del suelo para superficie horizontal se determina con la siguiente expresión:

$$H_o = H_e \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (3)$$

Donde: H_o es la irradiación global diaria, media mensual sobre una superficie situada bajo la atmósfera, los coeficientes **a** y **b** dependen del tipo de clima, para el caso Ecuador [5], se tienen los siguientes valores:

Tabla 1 Coeficientes climáticos *a* y *b* para el Ecuador

Región	a	b
Sierra	0.25	0.45
Costa	0.28	0.54

La expresión:

$$K = a + b \frac{n}{N}$$

Se la conoce como índice de nubosidad, y permite calcular la radiación difusa H_d , partiendo de la irradiación global [6]

$$\frac{H_d}{H_o} = (1.39 - 4.027K + 5.531K^2 - 3.108K^3) \quad (4)$$

Para pasar la irradiación sobre superficie horizontal ha inclinada se utiliza el factor R_b , definido por:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (5)$$

Siendo la irradiación H_b , la diferencia entre global y difusa

$$H_b = H_o - H_d$$

Por lo que la irradiancia directa sobre superficie inclinada es:

$$H_B = H_b R_b$$

Comportamiento óptico de la lente de agua:

Para explicar el índice de refracción en este tipo de medio, se realiza un esquema de superficies compuesto por acrílico, agua, y acrílico donde se observa que la luz sufre interferencias para atravesar los diferentes las sustancias [7]

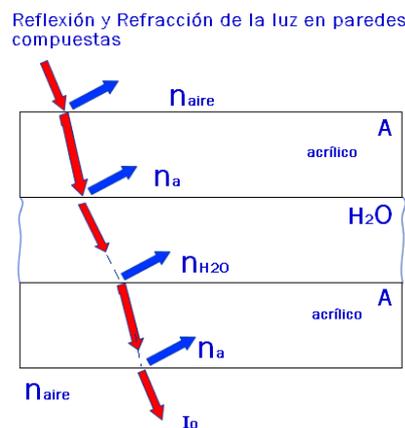


Figura 1 Modelo para análisis de reflexión y refracción de la luz

En forma matemática el índice de refracción para este caso, se expresa así:

$$n_c = \left(\frac{n_a}{n_{H2O}} \right)^2 \quad (6)$$

Donde: n_a Índice de refracción del acrílico, n_{H2O} índice de refracción del agua. La ecuación para determinar el foco óptico de la lente dada por el fabricante [8], se determina por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{f} = (n_c - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (7)$$

Donde: f Foco óptico, r_1 radio de la superficie de apertura, r_2 radio de la parábola, n_c índice de refracción para paredes compuestas.

Volumen del paraboloido [9]

Para hallar el volumen de un paraboloido de revolución, se necesita restar el volumen del cilindro de diámetro **D** y altura **c**, con el volumen de la región que se encuentra bajo el paraboloido. El modelo geométrico para hallar la fórmula de cálculo del volumen para la región interna, entre cilindro y paraboloido, se presenta a continuación.

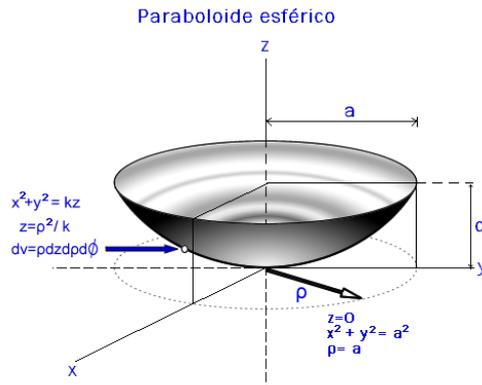


Figura 2 Paraboloido de revolución

Entonces, el volumen buscado es cuatro veces el volumen mostrado en el corte de la Figura 2

$$V = 4 \int_0^{\pi/2} \int_{\rho=0}^a \int_{z=0}^{\rho^2/k} \rho dz d\rho d\phi \quad (8)$$

Al restar el volumen del cilindro con el de la región, se obtendrá el valor para el volumen del paraboloido de revolución.

Análisis térmico [10]

La máxima temperatura que se puede alcanzar en los colectores planos es de 100 °C, la eficiencia de Carnot de una máquina térmica que opere a esta temperatura y la del ambiente es del 20 por ciento. En cambio al trabajar con concentradores que operen a temperaturas sobre los 300 °C, la eficiencia de Carnot se incrementa al doble.

Balance de energía

Realizando un balance de energía, se puede determinar que los concentradores son más eficientes que los colectores planos. El calor útil entregado al fluido de proceso que puede ser agua o aceite térmico, está dado por la energía recibida por el absorbedor menos las pérdidas de calor al medio ambiente es decir:

$$q_u = q_{abs} - q_p = q_{abs} - U_c (T_c - T_a) A_r \quad (9)$$

Donde la energía recibida por el absorbedor está dada por:

$$q_{abs} = \eta_o A_a H_b \quad (10)$$

Siendo: A_a área de apertura del concentrador, A_r área del absorbedor, H_b radiación solar directa incidente sobre el colector, T_a temperatura ambiente en °C, T_c temperatura del absorbedor en °C, U_c coeficiente global de transferencia de calor y η_o eficiencia óptica. Además, la eficiencia instantánea del colector es:

$$\eta_c = \frac{q_u}{H_b A_a} \quad (11)$$

Eficiencia óptica [7]

El paraboloide de revolución es una superficie producida al girar una parábola alrededor de su eje. La eficiencia óptica de una lente de agua, se determina por:

$$\eta_o = \rho_L \tau_a \alpha_a \gamma F k_s f_t \quad (12)$$

τ_a Transmitancia de la cubierta del absorbedor, ρ_L Reflejancia de la lente, α_a absorptancia del absorbedor, γ imperfecciones en la superficie y dispersión de la radiación directa, F fracción de apertura no sombreada, k_s factor de suciedad, f_t error en el seguimiento. Todos estos parámetros son adimensionales y sus valores típicos son del orden de 0,90 a 0,95 con excepción de ρ_R cuyo valor está entre 0,75 y 0,85 según la calidad de medio óptico semitransparente.

Razón de concentración

Es la razón entre el área de apertura y el área del absorbedor, es decir $R_c = \frac{A_a}{A_r}$

Temperatura focal [7]

Para el caso de concentradores en forma de lente, que utilizan el agua como medio óptico, se puede alcanzar enormes temperaturas en el foco, que dependen de la razón de concentración, la calidad de materiales, y la irradiancia directa incidente sobre la superficie colectora. A continuación, se muestra la expresión matemática desarrollada en la presente investigación.

$$T_f = \sqrt[4]{\frac{R_c H_b \tau_a \rho_L \alpha_a \gamma F k_s f_t}{\epsilon_a \sigma}} \quad (13)$$

Donde: T_f Temperatura focal en °K, R_c razón de concentración, H_b irradiancia, ϵ_a emisividad del recubrimiento del absorbedor, σ constante de Stefan- Boltzmann.

Desarrollo experimental

Equipo utilizado:

En esta investigación sobre energía solar térmica de alta temperatura se utilizaron los siguientes instrumentos: Lente parabólico de 1m de diámetro, con capacidad de

almacenamiento de 20 litros de agua, sensor de temperatura tipo laser de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, medidor de radiación solar indirecta de 43 Wp , indicador de temperatura ambiente, balanza electrónica de 30 Kg . En la Figura 3 se muestran los dispositivos térmicos fijo y móvil.

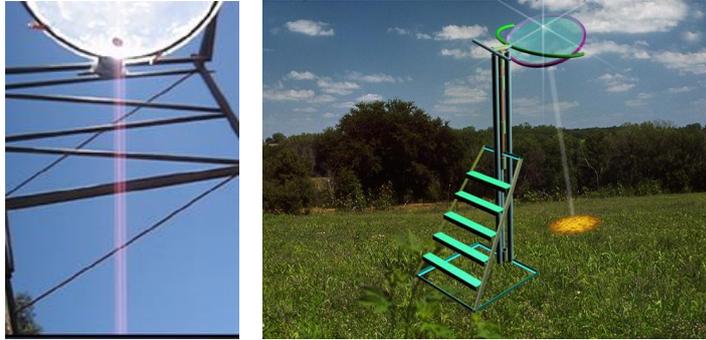


Figura 3 *Lente de agua para concentración de radiación solar directa*

Procedimiento:

Para la ejecución de las pruebas de calentamiento con radiación concentrada, utilizando un medio óptico natural como es el caso del agua, se tiene que, calibrar los instrumentos de medición, pesar el fluido y colocarlo en el casquete parabólico, orientar la superficie plana, hasta que el eje normal se encuentre paralelo con la dirección de la radiación solar directa, a continuación, realizar la toma de datos de la temperatura ambiente, pared del absorbedor, Irradiancia solar.

Por otra parte, se deben mitigar los riesgos físicos inherentes al experimento, producidos por radiación, calor, alta temperatura, y luminosidad mediante el uso de equipo de protección adecuado.

Resultados Obtenidos:

En lo que tiene que ver con la óptica geométrica, se puede indicar que la luz incidente sobre el plano superior de la lente, se refracta en el interior de la cámara de agua para formar un haz de radiación cónico de alta temperatura que se disipa en la cámara de reacción o absorbedor, la forma de este haz luminoso, donde la temperatura se incrementa conforme se aleja de la lente, se puede observar en la Figura 4, que se muestra a continuación.



Figura 4 *Haz de radiación concentrada que se dirige hacia el absorbedor*

Para realizar los cálculos de la energía disponible, calor útil, eficiencia de conversión, entre otros parámetros, se deben tomar los datos de temperatura, del ambiente, concentrador, absorbedor, y el amperaje que varía en forma lineal con la irradiancia.

En la Tabla 2, que se observa a continuación, se puede indicar que los valores más representativos de temperatura en el absorbedor 426°C, así como también la irradiancia directa 706,52 W/m², se consiguen a las 13:00 horas, es decir con un ángulo horario de -15°.

Tabla 2 Datos de prueba del bio concentrador solar

Orden	Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura del concentrador (°C)	Temperatura del absorbedor (°C)	Irradiancia medida (W/m ²)
1	12:00	23,3	19	370	676,63
2	12:15	23,2	19	378	682,07
3	12:30	23,2	20	383	684,78
4	12:45	23,5	20	392	690,22
5	13:00	23,2	21	426	706,52
6	13:15	23,4	22	411	701,09
7	13:30	23,4	22	397	692,93
8	13:45	23,3	23	343	665,76
9	14:00	22,8	24	328	657,61
10	14:15	22,8	25	319	649,46

Fuente: Guasumba J., Prado D., Sangolquí, 2008

Para una irradiancia promedio de 698,91 W/m², calculados mediante el procedimiento de Page en el mes de Agosto se obtuvieron los siguientes resultados:

Eficiencia óptica: 47,4 %
 Calor útil: 200 W térmicos
 Temperatura focal: 617,1°C

Análisis de resultados:

Para verificar la variación de temperatura en el absorbedor, se muestra la Figura 5, donde el perfil de temperatura tiene pendiente positiva hasta las 13:00 horas y luego comienza a descender por el incremento de la velocidad del viento que le ocasiona una mayor pérdida por convección y la reducción de la irradiancia solar directa.

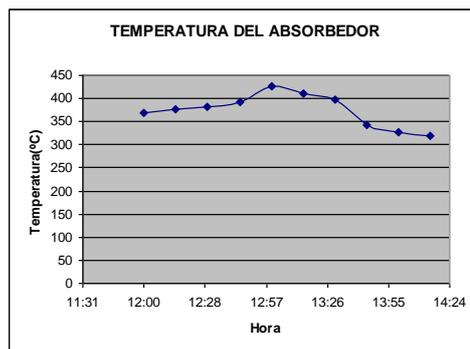


Figura 5 Perfil de temperatura del absorbedor

En la Figura 6, se muestra el perfil de irradiancia solar local, donde la curva cambia de concavidad alrededor de las 13:00 horas y comienza a descender en forma paulatina, lo que indica la disminución de la radiación solar por efecto de la inclinación de los rayos solares, y el aumento del espesor de la capa atmosférica donde las sustancias del aire, interactúan con la radiación solar y que han sido estudiados en los modelos de difusión de Rayleigh y Mie.

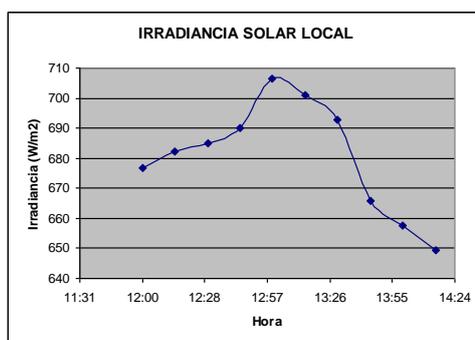


Figura 6 Irradiancia en torno al medio día solar

Conclusiones:

- El concentrador de forma parabólica que utiliza agua como medio óptico, permite alcanzar altas temperaturas, sobre los 400 °C, en el absorbedor. Dependiendo del diámetro del colector, distancia a lo largo del eje focal, y de la razón de concentración, esta puede alcanzar varios miles de grados centígrados.
- Para el desarrollo de un lente de vidrio de 1 m de diámetro se requiere alta tecnología y un derroche energético en los procesos de fabricación y pulido, por lo que, la lente de agua es una alternativa económica y factible técnicamente, para alcanzar altas temperaturas sin emisión de contaminantes.
- Si para obtener 100 W de forma convencional se deben quemar 10,41 Kg de carbón por hora, este dispositivo de 200 W, evita la combustión de 93,69 Kg de carbón por cada 4,5 horas de funcionamiento por día, con la consecuente eliminación de emisiones de CO₂
- Este nuevo sistema energético puede ser utilizado para aplicaciones de alta temperatura: obtención de vapor sobrecalentado, fusión de materiales ligeros, mejoramiento superficial de materiales, generación de electricidad mediante el acoplamiento de un motor Stirling tipo alfa o beta. Para modelos de utilidad, el diámetro del concentrador debe ser mayor a 4m.

Reconocimientos

Numerosas personas, han contribuido con informacion referente a las aplicaciones de la energía solar térmica de alta temperatura. En especial deseo agradecer a los Señores Dr. Alfonso Vásquez, del CENIM, Dr. Valeriano Ruiz Hernández, Dr. Isidoro Lillo Bravo de la Universidad de Sevilla-España, Dr. Víctor Cárdenas, Profesor Politécnico de la EPN, por su motivación y apoyo en las investigaciones científicas; a mis alumnos de la Maestría en Energías Renovables y de Ingeniería Mecánica de la ESPE. Agradezco a la Unidad de Gestión de la Investigación UGI, y al Vicerrectorado de Investigación de la ESPE, por el apoyo recibido para la realización de este proyecto relacionado con el uso de la energía solar térmica de alta temperatura, al Centro de Investigaciones Científicas Tecnológicas y Ambientales CITECNIA Corp., por su infraestructura y equipamiento facilitado.

BIBLIOGRAFÍA

1. Wilson, J., *La Energía Solar*, Editorial Alambra, Madrid, 1982
2. Bent, Sorensen, *Renewable Energy, its physics, engineering use environmental impacts, economic and planning aspects*, second edition, academic press, 2000, London
3. Vásquez, A., *Aplicaciones de la energía solar concentrada para el mejoramiento superficial de materiales*, COBIM, 2004
4. Duffie, John, *Solar Energy Thermal Processes*, John Wiley & Sons, 1974
5. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, *Coeficientes Climáticos*, 2000
6. Jutglar, Lluís, *Energía Solar*, Ediciones CEAC, 2004
7. Guasumba, José, *Fotobioconversión Natural de la Radiación Solar Térmica*, Quito, 2008
8. Henry, Perkins. *Física General*, 3ª Edición, Editorial Hispanoamericana, México, D.F.
9. Murray, R., *Matemáticas Superiores para Ingenieros y Científicos*, Mc Graw Hill, Bogotá, 1975
10. Almanza, Rafael, *Ingeniería de la Energía Solar*, El Colegio Nacional, México, 1994