



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

**REVISTA CIENTÍFICA de las
FUENTES RENOVABLES de ENERGÍA**

15



| | |
|--|-----------|
| Aplicaciones de la elipsometría espectroscópica y su uso en la caracterización de materiales utilizados en la captación de energía solar..... | 1 |
| Validación y ajuste de modelos de radiación solar directa para la ciudad de Bogotá a partir de datos experimentales tomados en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas..... | 15 |
| Desarrollo de catalizadores anódicos para celdas de combustible directas de etanol, propano y metano..... | 37 |
| Análisis térmico de un tubo absorbedor compuesto..... | 54 |
| Diseño de un horno solar tipo caja optimizado para la región intertropical..... | 70 |
| Resultados preliminares de la evaluación de los potenciales energéticos eólico y solar en la franja fronteriza del Estado de Nuevo León, México..... | 82 |

Aplicaciones de la elipsometría espectroscópica y su uso en la caracterización de materiales utilizados en la captación de energía solar

Applications of Spectroscopic Ellipsometry and Its Use in the Characterization of Materials Used in Solar Energy Capture

Barrera, C. E1.; F. J. C. Martínez¹
R. Vázquez-Rodríguez¹ y M. Ortega²

¹Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica,
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. Rafael Atlxco No. 186,
Col. Vicentina, México, D. F. 09340, México.

²Centro de Investigación y Estudios Avanzados de IPN. CINVESTAV,
México D. F.

Resumen

Sin duda alguna, el uso de recubrimientos selectivos en los dispositivos de captación de energía solar es preponderante y repercute de manera considerable en la eficiencia del funcionamiento de dichos dispositivos; de esto se deriva la importancia de conocer, de manera detallada, el comportamiento óptico de los materiales utilizados o de posible aplicación en esta área. Para el caso de la energía solar fotovoltaica es importante conocer las propiedades ópticas fundamentales, índice de refracción n y coeficiente de extinción k , de las películas semiconductoras, en un rango considerable de longitudes de onda, así como su estructura de bandas y espesor. Estos parámetros pueden ser determinados mediante el uso de la técnica de caracterización denominada elipsometría espectroscópica. En este trabajo se presentan algunas de las aplicaciones de la elipsometría espectroscópica (SE) y su relación con el uso y aprovechamiento de la energía solar; se muestra la utilidad de la SE como una técnica de caracterización sofisticada de materiales utilizados, por ejemplo, recubrimientos en los dispositivos de captación de energía solar, como pueden ser, específicamente, los usados para la captación de energía solar térmica; es decir, los colectores y concentradores solares. Se presenta una breve introducción de cómo se determinan las propiedades ópticas de los materiales aplicados, como recubrimientos en forma de películas delgadas, además de su espesor mediante la técnica de SE; asimismo, los resultados obtenidos son corroborados utilizando diferentes técnicas de caracterización como análisis por microscopia de fuerza atómica (AFM), análisis por reflectometría, espectroscopia fotoelectrónica por rayos X (XPS), etc. Estos y otros aspectos son considerados y se ejemplifican mediante estudio de películas de Co_3O_4 y mezclas de óxidos de Co:Fe depositados en acero inoxidable; se muestran los resultados obtenidos mediante el análisis por elipsometría espectroscópica haciendo notar la utilidad del uso de esta técnica en la caracterización de las superficies de interés.

Palabras clave: Elipsometría espectroscópica, películas delgadas, captación de energía solar

Abstract

Undoubtedly, the use of selective coatings in solar energy capturing is predominant and considerably influences the efficient operation of these devices; thus it is necessary to know in detail the optical performance of the materials that could be applied in this area. In the case of solar photovoltaic energy, it is important to know the main optical properties, refraction index n , extinction coefficient of the semiconductor layers k , in a significant range of wavelengths, as well as its band structure and thickness. These parameters can be determined through the use of the characterization technique known as spectroscopic ellipsometry. This paper presents some of the applications of spectroscopic ellipsometry (SE) and its relationship with the use and exploitation of solar energy, the benefits derived from SE are shown as a sophisticated technique of materials used as coatings of solar-energy capturing devices as could be specifically those used for thermal solar energy, for example, solar collectors and concentrators. A brief introduction on how optical properties are determined, applied as coatings in the form of thin layers, as well as its thickness through SE technique, in addition to this, the results obtained are confirmed using different characterization techniques as analysis by atomic strength microscopy (AFM), reflectometry analysis, photoelectronic spectroscopy by X rays (XPS), etc. These and other aspects are considered and are exemplified through the study of layers of Co_3O_4 and mixtures of Co:Fe oxides deposited on stainless steel, results obtained are here shown through the analysis made by photoelectronic spectroscopy, observing the effectiveness of using this technique in the characterization of surfaces to be treated.

Keywords: Spectroscopic ellipsometry, thin films, solar energy capture

Introducción

En esta sección se describe el uso de la elipsometría como una técnica precisa y exacta para la caracterización de películas delgadas, sustratos o sistemas película-sustrato. Se presenta un breve desarrollo histórico de la elipsometría y los principios básicos necesarios para comprender cómo trabaja un elipsómetro. Hay muchos ejemplos de estudios realizados enfocados en el tema de la ciencia de materiales, y algunos de los que se analizan son: medidas de espesor, propiedades ópticas y modelado de superficies rugosas.

La elipsometría (reflexión elipsométrica) mide los cambios en el estado de polarización de la luz, después de haber sido reflejada desde alguna superficie. El hecho de que sean medidos los cambios del estado de polarización, en lugar de la intensidad absoluta de la luz, hace de la elipsometría una técnica altamente sensible a la presencia de finas capas de apenas algunos cuantos angstroms (Å). Como una herramienta no invasiva ni destructiva, la elipsometría requiere solamente de una fuente de luz de baja potencia y, en consecuencia, no afecta la mayoría de los procesos, lo que la hace una herramienta conveniente para estudios *in situ*.

Conceptos básicos

Para iniciar el tratamiento de la teoría básica de la elipsometría, se debe mencionar en principio la teoría de J. C. Maxwell, la cual expone que la luz es una onda representada por dos vectores mutuamente perpendiculares: E , la amplitud del campo eléctrico; B , la amplitud del campo magnético, y ambos, E y

B , son perpendiculares a la dirección de propagación z . La onda electromagnética se describe por su amplitud y frecuencia en su forma compleja, como sigue:

$$E = E_0 e^{i(qz - \omega t)} \quad (1)$$

Donde:

E_0 : Máxima amplitud de E que se propaga en la dirección $+z$.

ω : Frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$).

t : Tiempo.

q : Número de ondas ($q = 2\pi/\lambda$).

Después de incluir el término de la fase en la ecuación (1) tenemos:

$$E = E_0 \cos(qz - \omega t + \delta) \quad (2)$$

El vector E es representado por una superposición de los dos componentes, E_x y E_y , que son ortogonales a la dirección de propagación $+z$ ($E_z = 0$):

$$E_x = E_{01} \cos(qz - \omega t + \delta), E_y = E_{02} \cos(qz - \omega t + \delta) \quad (3)$$

Donde:

δ_x y δ_y : Constantes de fase.

E_{01} y E_{02} : Amplitudes de las componentes (x, y) de E .

Polarización de la luz

La variación con el tiempo de la orientación de E a lo largo de la dirección de propagación en un lugar fijo es llamada polarización. Cualquier fuente de luz ordinaria es conocida como no polarizadora, porque E oscila aleatoriamente en un plano perpendicular a la dirección de propagación. Una de las formas más comunes de producir luz linealmente polarizada a partir de luz no polarizada, es usando un polarizador (Fig. 1).

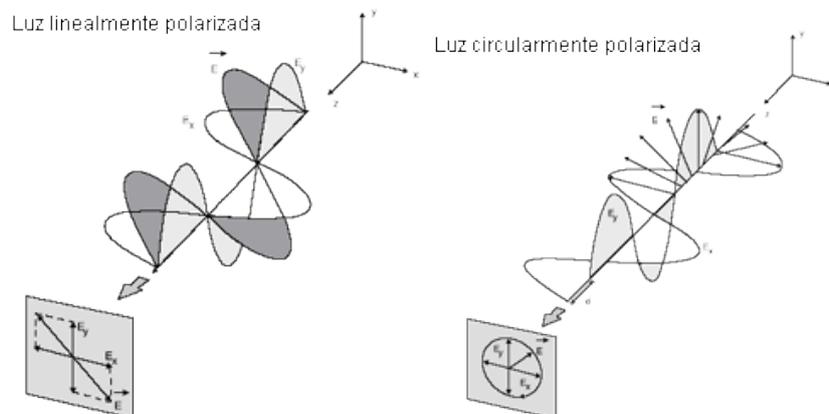


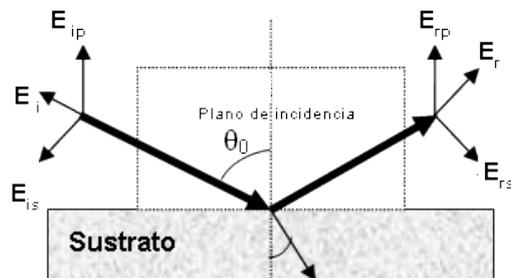
Fig. 1. Polarización lineal de la luz y polarización circular izquierda.

Considere la figura 1, la luz con dos acimuts arbitrarios propagándose en la dirección $+z$. Si δ ($\delta = \delta_y - \delta_x$) es un múltiplo de $\pm\pi$ ($\delta = m\pi$; $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), la onda que se propaga está linealmente polarizada. Si las amplitudes de los componentes E_x y E_y son iguales

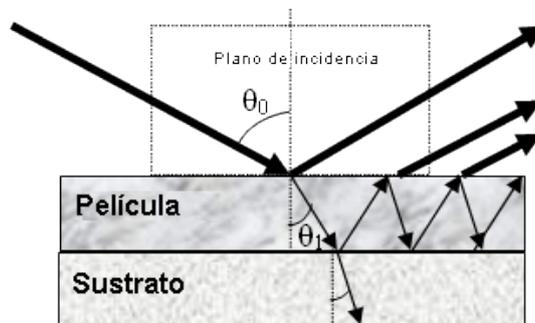
($E_{01} = E_{02} = E_0$), y δ es un múltiplo de $\pm\pi/2$ ($\delta = m\pi/2$; $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), se dice que la onda está polarizada circularmente a la derecha, o polarizada a la izquierda cuando E gira en el sentido de las manecillas del reloj o a contrasentido de éstas, respectivamente. En el caso de luz elípticamente polarizada, la resultante E gira y cambia en magnitud, de tal manera que el extremo final del vector de E dibuja una elipse.

La luz elípticamente polarizada puede ser producida por la reflexión desde una superficie plana, o usando elementos polarizador/compensador. Con esta reflexión se asocia un cambio de fase de las componentes de E , paralelo (E_p) y perpendicular (E_s) al plano de incidencia de la luz.

La figura 2 ilustra cómo un rayo de luz linealmente polarizada incide (i) en una superficie desnuda, y que en una superficie cubierta con una película es reflejada (r). El plano de incidencia incluye el rayo incidente y la normal a la superficie de la muestra de N . Las componentes paralela (E_p) y perpendicular (E_s) al plano de incidencia están fuera de fase después de reflexión, y ambas, fase y amplitud de la luz reflejada, cambian en una manera distinta en dependencia de las propiedades ópticas de la superficie.



a)



b)

*Fig. 2. Reflexión de luz polarizada:
a) Superficie desnuda. b) Superficie cubierta con película.*

Las mediciones por elipsometría permiten cuantificar la diferencia de fase entre E_p y E_s , mediante el parámetro Δ , y el cambio en la proporción de sus amplitudes, el cual está dado por $\tan(\Psi)$. Para una superficie reflejante desnuda, las formas Δ y Ψ son:

$$\Delta = \delta_{rp} - \delta_{rs}, \quad \tan \Psi = \frac{|r_p|}{|r_s|} \quad (4)$$

Donde r_p , y r_s , son los coeficientes Fresnel para los componentes p y s de la luz. Las expresiones para r_p y r_s consideran una interacción sencilla entre el medio 0 (ambiente), con un índice de refracción complejo N_0 , y el medio 1 (sustrato) con un índice de refracción complejo N_1 , como sigue:

$$r_{01p} = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = |r_p| e^{i\delta_{rp}} = \frac{N_1 \cos \theta_0 - N_0 \cos \theta_1}{N_1 \cos \theta_0 + N_0 \cos \theta_1} \quad (5)$$

Una expresión similar puede ser escrita para r_s , donde δ_{rp} y δ_{rs} son los cambios fase para los componentes p y s . El coeficiente de reflexión total (reflectancia) para una superficie cubierta de película (sencilla) en el ángulo de incidencia, θ_0 , es R:

$$R_p = |r_p|^2, \quad R_s = |r_s|^2 \quad (6)$$

Que para interfaces múltiples (así como ambiente/película/sustrato) está dado por:

$$R_p = \frac{r_{01p} + r_{12p} e^{i2\beta}}{1 + r_{01p} r_{12p} e^{i2\beta}} \quad (7)$$

Una expresión similar puede ser escrita por R_s , donde β expresa el espesor de película (L) y el índice de refracción complejo a una longitud de onda de luz incidente λ :

$$\beta = 2\pi \frac{L}{\lambda} N_1 \cos \theta \quad (8)$$

El cambio resultante en la polarización, después de la reflexión desde una superficie, puede ser medido con un coeficiente de reflexión complejo r :

$$\rho = \tan(\Psi) e^{i\Delta} = \frac{r_p}{r_s} \quad (9)$$

Mientras que para un modelo multicapas (sustrato/película/ambiente, por ejemplo) r se obtiene como:

$$\rho = f(N_0, N_1, N_2, \lambda, L_1, \theta_0) \quad (10)$$

Donde N_0 , N_1 y N_2 son los índices de refracción para el ambiente, película y sustrato, respectivamente. Usualmente, N_0 , λ y θ son conocidos; N_2 puede ser obtenido de manera independiente, y N_1 y L_1 también pueden ser obtenidos. El índice refractivo complejo N representa las partes real e imaginaria del índice de refracción:

$$N = n + i k \quad (11)$$

Donde n es el índice refracción y k el coeficiente de extinción, el cual describe un cambio en la velocidad de fase y amplitud, respectivamente, de la onda electromagnética propagándose por un medio. Para materiales transparentes debido a las altas profundidades de penetración de la luz, los valores de k son muy cercanos a cero y $N = n$. Sin embargo, para muchos otros materiales, n y k no son parámetros constantes, pero sí dependientes de λ , en un efecto conocido como dispersión. La profundidad de penetración, W , es definida como la distancia a la cual la magnitud del campo eléctrico disminuye $1/e$ de su valor original:

$$W = \frac{c}{2\omega k} = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (12)$$

El inverso de W se llama coeficiente de absorción, α .

Otro parámetro físico importante obtenido por la elipsometría es la función dieléctrica compleja, ϵ , que correlaciona las propiedades ópticas y eléctricas de los materiales, y provee una estimación sensible de las condiciones de la superficie. Así obtenida por la elipsometría, ϵ es expresada en términos de coeficiente de reflexión complejo, ρ , para un simple modelo óptico ambiente/película (f) /sustrato (s):

$$\frac{\epsilon_s}{\epsilon_f} = \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \quad (13)$$

Esta ecuación es aplicada para sustratos homogéneos e isotrópicos. Para una capa sobre un sustrato, ϵ es representado por $\langle \epsilon \rangle$, la función constante pseudodieléctrica con partes real e imaginaria, en donde los paréntesis angulares indican una mezcla:

$$\langle \epsilon \rangle = \langle \epsilon_1 \rangle + i \langle \epsilon_2 \rangle = N^2; \quad \epsilon_1 = n^2 + k^2; \quad \epsilon_2 = 2nk \quad (14)$$

El espectro de ϵ es de particular importancia porque indica la absorción de un medio a través de la constante k . Una discusión más amplia se verá posteriormente con ejemplos.

Preparación de películas de Co_3O_4 y óxidos de Co:Fe

Se ha demostrado que las películas a base de cobalto negro presentan propiedades ópticas interesantes, y de ello se deriva el interés que despiertan para aplicaciones de captación de energía solar fototérmica; en esta sección se consideran muestras de Co_3O_4 y mezclas de Co:Fe para ejemplificar las posibilidades de la SE como una técnica potente de análisis y caracterización de superficies; y se analizan dichas muestras mediante distintas técnicas de caracterización para verificar los resultados.

Metodología de preparación de películas

Los sustratos de acero inoxidable tipo 304 se preparan con pulido mecánico a base de lijas de diferentes granulometrías, hasta terminar con una del número 600. Posteriormente, las muestras se someten a un proceso químico de limpieza, a base de inmersión en alcohol etílico por cinco minutos bajo ultrasonido. Para la preparación de las películas selectivas de óxido de Co (Co) y óxido de Co-Fe sobre acero (CoFe), por la técnica de rocío pirolítico, se utilizan disoluciones acuoso-alcohólicas de sales inorgánicas de Co y Fe. La solución del rocío para las películas de cobalto consistió en preparar una solución de nitrato de cobalto 0,05 M con relación de volúmenes etanol:agua 3:1. La solución para las películas de CoFe consistió en una mezcla de nitrato de cobalto 0,05 M y nitrato de hierro 0,01 M, disuelta en la misma relación de volumen etanol:agua que la solución anterior.

La preparación de las películas delgadas sobre sustratos de acero inoxidable se realiza con flujo de gas de arrastre de 70 mL/min, flujo de solución de 1 mL/min, diámetro de espesa de 0,5 mm, temperatura del sustrato de 200 °C y separación de espesa a sustrato de 15 cm. Las muestras obtenidas a diferentes tiempos de depósito (3 a 7 minutos) se someten a 350 °C por dos horas, con el fin de formar las fases deseadas de los óxidos de Co y CoFe.

Caracterización

Se midieron las propiedades ópticas de los materiales preparados mediante la determinación de la reflectancia en la región UV-Vis, usando un espectrofotómetro Varian Cary 5E. Se realizó un estudio de espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) para los estudios de la composición química de la superficie en algunas de las películas preparadas. Estos análisis se efectuaron usando un sistema UHV de VG Microtech MultiLab ESCA 2000, con un analizador CLAM4 MCD para medir los fotoelectrones, usando un haz de una fuente de rayos X de $\text{Al}_{K\alpha}$ ($h\nu = 1486,6$ eV).

Mediante un estudio de microscopia de fuerza atómica (AFM) se determinó la morfología y la rugosidad superficial de las películas preparadas por spray pirolítico, por medio de un equipo AutoProbe CP, de la compañía Quesant Co. Finalmente, se estudiaron las películas preparadas mediante la técnica de elipsometría espectroscópica SE, para determinar las propiedades ópticas de los materiales preparados, así como para proponer una microestructura del

material sintetizado. La caracterización por elipsometría se realizó en películas de Co y CoFe en sustratos de acero, depositadas durante cinco minutos, medidas con un elipsómetro espectroscópico Uvisel DH10, de Jobin Yvon. Los datos fueron obtenidos en un rango espectral de 250 a 750 nm, a un ángulo de incidencia de 70°. Todos los experimentos y datos fueron adquiridos y analizados usando el software Delta Psi, versión 2.

Resultados

En la figura 3 se muestran reflectancias típicas de las películas de Co y Co:Fe con cinco minutos de tiempo de depósito para las regiones UV-Vis. e infrarrojo, respectivamente. Se observa que aunque las reflectancias en el visible son diferentes para las muestras con adiciones de hierro y sin ellas, los valores resultantes de la absorptancia solar que resultan de la integración en toda la región UV-Vis son prácticamente los mismos. Esto se debe a que en una cierta región del espectro las muestras de cobalto tienen más alta reflectancia que las muestras de Co:Fe, mientras que en otra región sucede lo contrario.

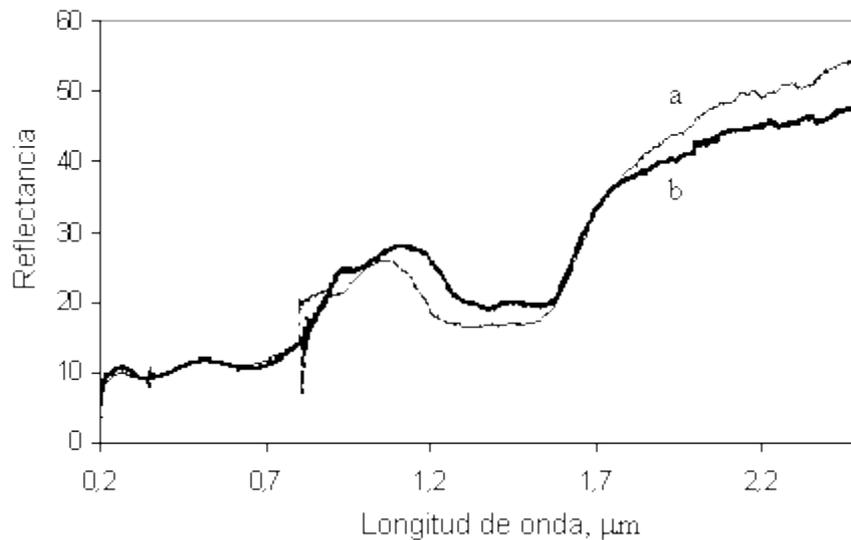


Fig. 3. Gráfica de la reflectancia contra longitud de onda de una muestra típica: a) Óxido de cobalto-hierro sobre acero y b) Óxido de cobalto sobre acero.

La caracterización superficial de las muestras preparadas consistió en estimar su rugosidad, por medio de estudios superficiales, mediante observaciones de microscopía de fuerza atómica. Se midió el valor de este parámetro para muestras preparadas a diferentes tiempos de depósito. Una vista típica de AFM, de una muestra de CoFe con cinco minutos de depósito, se observa en la figura 4, siendo el valor de su rugosidad de RMS~158 (raíz cuadrática media, RMS por sus siglas en inglés). Para el caso de muestras de cobalto con cinco minutos de depósito, se observa una superficie más lisa y por tanto de menor rugosidad, siendo su RMS ~100.

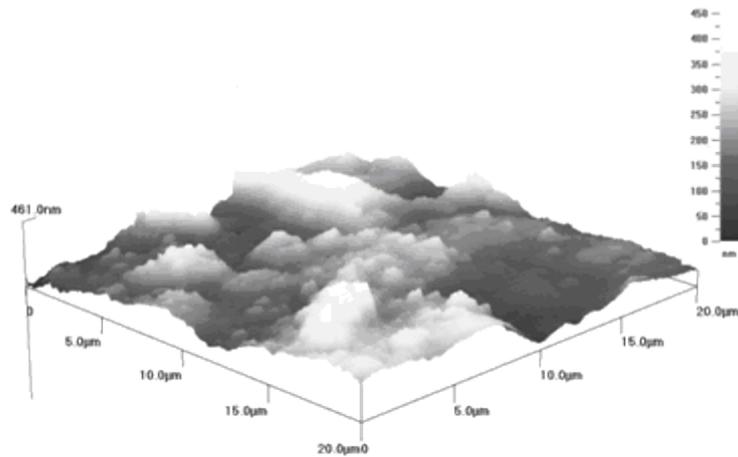


Fig. 4. Vista de AFM para la muestra de CoFe, con una RMS~158.

Caracterización por elipsometría espectroscópica

Antes de realizar las mediciones elipsométricas de las películas selectivas sobre acero, primero se analizó el sustrato de acero inoxidable. Para ello, la superficie de acero se trató, según el método experimental descrito, para dejar una superficie con un acabado como un espejo. Después del análisis elipsométrico del acero se realiza el ajuste del modelo y la estructura, previamente elegidos, a los datos elipsométricos Δ y Ψ , como son función de la longitud de onda. Para modelar el acero se propuso una estructura que consta de dos partes: el sustrato propiamente dicho y una capa superficial de rugosidad con un espesor determinado después del ajuste.

En la figura 5 se observa el buen ajuste del modelo y la estructura usados con los datos elipsométricos experimentales. Estos datos pueden ser utilizados para obtener las propiedades ópticas del acero por medio del modelo de dispersión, como se muestra en la figura 5b.

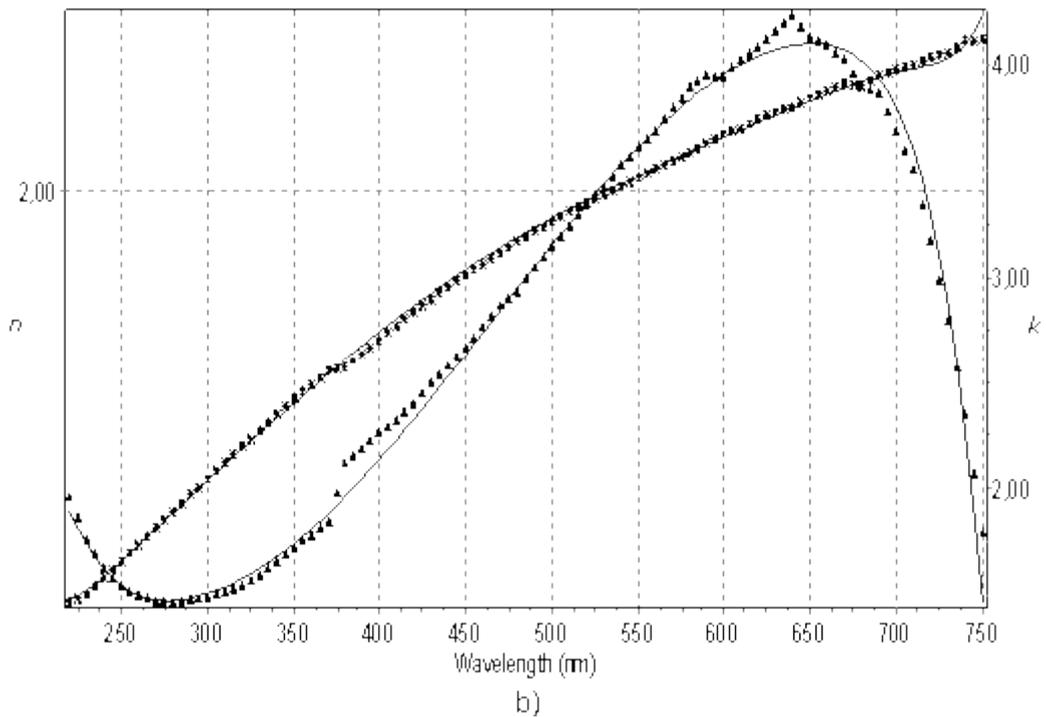
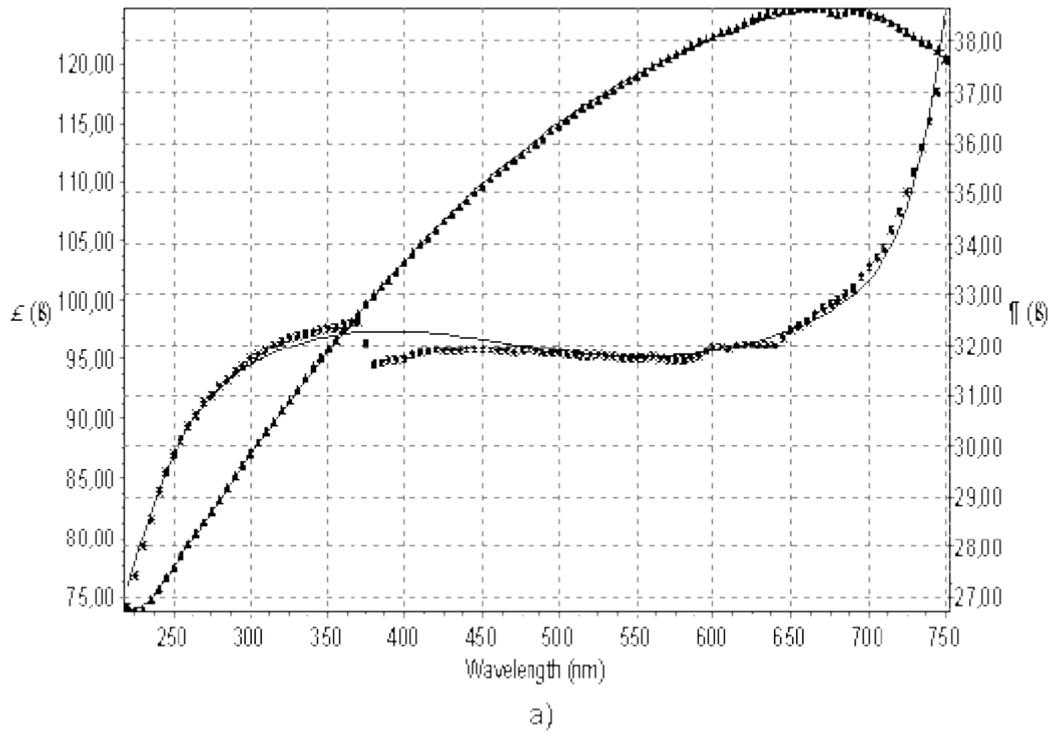
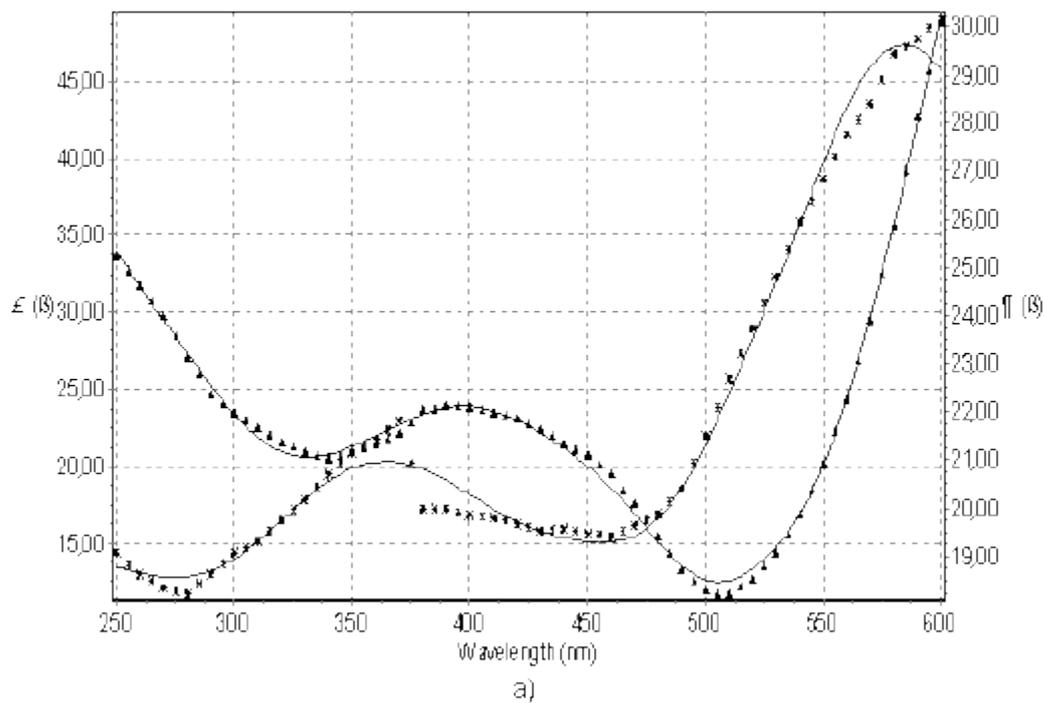


Fig. 5. Mediciones experimentales por elipsometría espectroscópica. a) Ángulos elipsométricos (Δ (▲), Ψ ()) como función de la longitud de onda λ , para el sustrato de acero inoxidable. b) Propiedades ópticas del acero inoxidable (n (▲), k (*)), como función de la longitud de onda λ , para el sustrato de acero inoxidable.*

Partiendo de una estructura propuesta y la elección de un modelo, se ajustan los datos elipsométricos para conocer las propiedades ópticas (ver Fig. 3); se

omite la estructura diseñada para el ajuste de los datos elipsométricos del acero, ya que no es de relevancia en este trabajo.

Para el caso de la película de cobalto (cinco minutos de tiempo de depósito), la figura 6 muestra los ángulos elipsométricos (Δ (\blacktriangle), Ψ ($*$)) experimentales como función de la longitud de onda. En esta figura se muestra también el resultado del ajuste de los datos experimentales a los de un modelo de dispersión del tipo Tauc Lorente, para simular las propiedades del cobalto. Se logra un buen ajuste con el modelo de Tauc Lorentz, en el que se utiliza como uno de sus parámetros conocidos, el valor de la energía de brecha del Co_3O_4 (1,65 eV reportado por [Varkey y Fort, 1993]). Para este ajuste se empleó también el espesor de película de cobalto que se midió previamente con un equipo Talistep Dek Tak II y que se agregó como dato conocido al modelo propuesto.



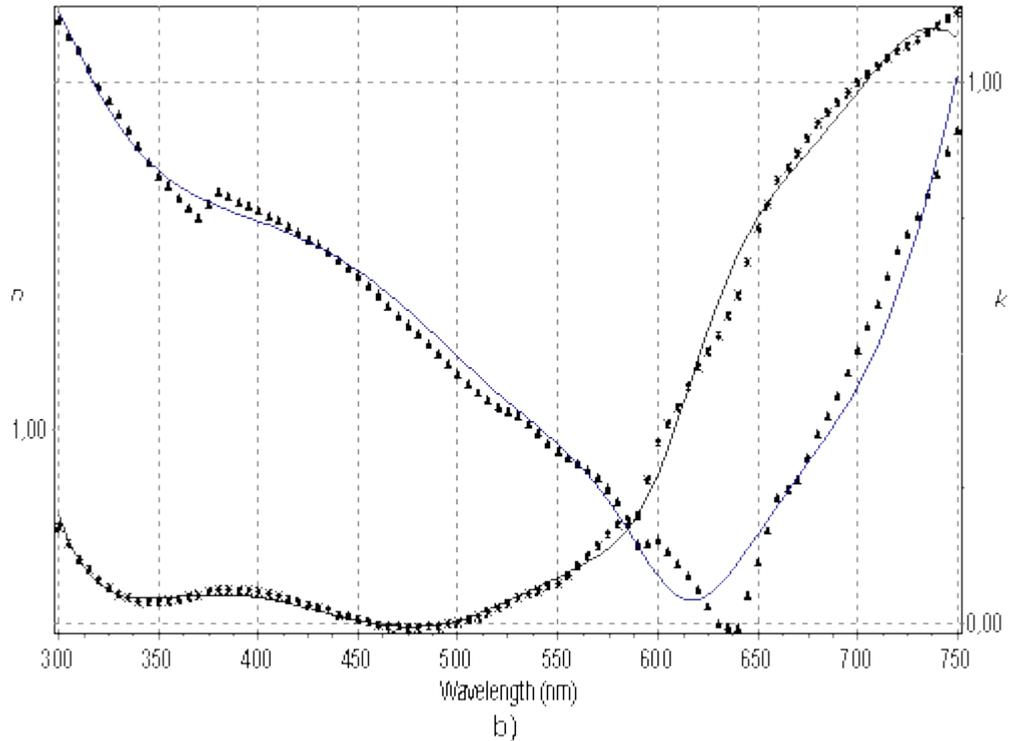


Fig. 6. Resultados obtenidos por elipsometría espectroscópica. a) Ángulos elipsométricos ($\Delta(\blacktriangle)$, $\Psi(^{\circ})$) como función de la longitud de onda λ . b) Propiedades ópticas de la película, índice de refracción, $n(\lambda)$, y coeficiente de extinción, $k(\lambda)$, del óxido de cobalto sobre acero (tándem). La línea continua representa el ajuste a los datos experimentales.

En la figura 6b se muestran los valores del índice de refracción, $n(\lambda)$, y del coeficiente de extinción, $k(\lambda)$, del material de cobalto, obtenidos a partir del ajuste del modelo a los datos elipsométricos. Al comparar los valores de $n(\lambda)$ y $k(\lambda)$ para el óxido de cobalto en acero, así como el de las bandas de absorción, con los datos publicados de este compuesto depositado en vidrio [Ruzakowsky, *et al.*, 1996], se observan resultados similares de las propiedades ópticas en las zonas del espectro cubiertas por el elipsómetro utilizado en este trabajo, lo cual confirma nuestros resultados obtenidos.

En la figura 7 se muestra un concepto de la estructura del tándem del acero y la película de óxido de cobalto resultante del modelo propuesto, con base en los resultados de elipsometría espectroscópica. Se observa tanto el espesor de las capas presentes, así como de los materiales y su rugosidad, representada en el modelo como un espacio vacío.

| | |
|---------------------------------------|---------------|
| Co ₃ O ₄ 45,6 % | Vacíos 54,4 % |
| Co ₃ O ₄ 100 % | |
| Sustrato acero inoxidable | |

1 513,7 A

504,4 A; Modelado con un modelo clásico.

Modelado con un modelo clásico y uno amorfo.

Fig. 7. Estructura usada para modelar la muestra de Co₃O₄/SS; los espesores y composiciones se determinaron por elipsometría espectroscópica.

Similar al caso de la muestra de Co, se estudió también por elipsometría una muestra de CoFe de cinco minutos de depósito. En la figura 8 se muestra el resultado de las propiedades ópticas fundamentales, $n(\lambda)$ y $k(\lambda)$ obtenidas de un ajuste no lineal (curva continua) a los datos experimentales, mediante el uso de un modelo de dispersión del tipo Tauc Lorentz para el óxido de cobalto, y un modelo de dispersión tipo amorfo para el óxido férrico presente en la película, según la evidencia del estudio de XPS (Fig. 9).

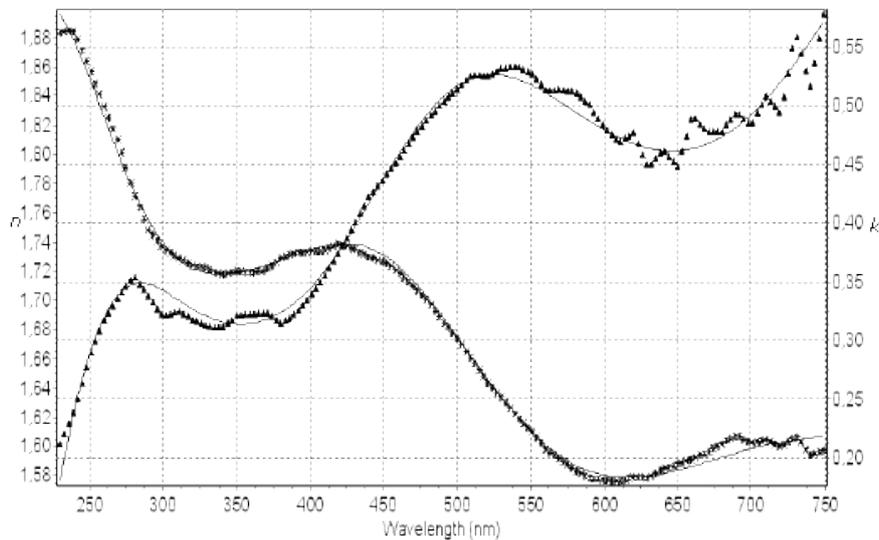


Fig. 8. Propiedades ópticas ($n(\lambda)$, $k(\lambda)$) de la película de CoFe/SS para cinco minutos de tiempo de depósito. La línea continua representa el ajuste a los datos experimentales ($n(\lambda)$ (\blacktriangle), $k(\lambda)$ (*)).

| | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------|
| Co ₃ O ₄ 97,1 % | Fe ₃ O ₄ 2,9 % | 1 319 A |
| Co ₃ O ₄ 88,7 % | Fe ₃ O ₄ 11,3 % | 2 195 A |
| Sustrato acero inoxidable | | |

Fig. 9. Estructura usada para modelar la muestra de óxido de Co:Fe/SS; los espesores y composiciones se determinaron por elipsometría espectroscópica.

Cabe mencionar que los ajustes de los modelos utilizados en este trabajo se realizaron por medio del software de simulación DeltaPsi 2. Se ajustó un modelo de dispersión tipo amorfo, a las propiedades ópticas del óxido férrico reportado como material de referencia en la base de datos del software del aparato. Para el modelo amorfo, se fijó la energía de brecha del material

previamente reportado [Martens y Peeters, 1982], en un valor de 2,2 eV. Con el ajuste del modelo a los datos reportados se procedió a construir el modelo en tándem y así obtener los resultados mostrados en las figuras 8 y 9.

Conclusiones

La elipsometría espectroscópica nos permite hacer una caracterización completa de las propiedades ópticas de algunos materiales de particular interés, tal como se mostró en el desarrollo de este trabajo; el determinar las propiedades ópticas fundamentales, n y k , de algún material es de gran interés para su caracterización y sus posibles aplicaciones en el área de la energía solar, ya que mediante estas propiedades se pueden deducir otras tales como la absortancia, transmitancia y reflectancia, basándonos en los resultados de la teoría electromagnética; además, también podemos conocer la función dieléctrica del material, la cual es de gran importancia cuando se estudian las propiedades eléctricas de dicho material, como es el caso de los materiales utilizados en celdas fotovoltaicas.

Esta técnica espectroscópica de caracterización provee entonces información muy importante y de gran ayuda para la investigación y el desarrollo de nuevos materiales; además, apoyada por algunas otras técnicas de análisis, como AFM, XPS, XRD, reflectometría, etc., proporciona un análisis completo del material en estudio. La posibilidad de determinar las composiciones y los espesores de película hace de la SE una herramienta fundamental de análisis y caracterización de películas delgadas; esto se logra mediante el diseño de una estructura y la elección de un modelo adecuado, basados ambos en el conocimiento previo de algunas propiedades químicas y físicas del material en estudio.

Bibliografía

- GRANQVIST, C. G. *Materials Science for Solar Energy Conversion System*. Oxford: Pergamon Press, 1991.
- MARTENS, J. W. Y W. L. PEETERS. «An Ellipsometric and Magneto-Optical Study of Cobalt Ferrite Single Crystal», *Solid Stat. Commun.* 41, 667-669, 1982.
- PALIK, E. D. *Handbook Optical Constants*. New York: Academic Press, v. II. 1985.
- RUZAKOWSKY, P.; W. A. MC GAHANAND, F. K. URBAN Y M. F. TABET. «Optical Properties of Cobalt Oxide Films Deposited by Spray Pyrolysis», *Vacuum Surfaces and Films*. 5, 685-692, 1996.
- TOMPKINS, H. G. *Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry, A User's Guide*. New York: John Wiley & Sons, inc., 1999.
- VARKEY, A. J. Y A. F. FORT. «A Chemical Method for Preparation of Cobalt Oxide Thin Films», *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 31, 277-282, 1993.
- VEDAM, K. Spectroscopic Ellipsometry: a Historical Overview. *Thin Solid Films*. 313-314, 1998. pp. 1-9.

Validación y ajuste de modelos de radiación solar directa para la ciudad de Bogotá a partir de datos experimentales tomados en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Validation and Adjustment of Direct Solar Radiation Models for the city of Bogotá, from experimental data taken in the Universidad Distrital Francisco José de Caldas

*Carlos Sánchez, Denisse Piedra Castillo e Iveth Mendoza
Grupo de Energías Alternativas, Universidad Distrital, Colombia
e-mail: tesisene@yahoo.com*

Resumen

A partir de los datos experimentales de radiación solar directa y radiación global tomados en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, se validaron y ajustaron los modelos de: Hottel, ASHRAE, Liu y Jordan, Iqbal y Orgill y Hollands, evaluando parámetros diferentes que permiten establecer cuantitativamente qué tan efectivos y generales pueden llegar a ser, obteniendo para cada uno de ellos las constantes características (KT , K_t y K_d). El modelo que permite obtener un mejor valor de radiación directa sobre una superficie normal es el de Orgill y Hollands, debido a la efectividad de 75 % en la relación obtenida entre la radiación directa experimental y la del modelo sobre una superficie normal. Para el modelo de Hottel se calculó el valor de los tres coeficientes (a_0 , a_1 y k) para días despejados, nublados y seminublados, característicos para la ciudad de Bogotá.

Palabras clave: Radiación solar directa

Abstract

From experimental data of direct solar radiation and global radiation taken at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, models such as those of Hottel, ASHRAE, Liu and Jordan, Iqbal and Orgill and Hollands were validated and adjusted, evaluating the different parameters which measure up to which extent they can be effective and general, obtaining constant characteristic for each one (KT , K_t y K_d). The model which allows obtaining a better value of direct radiation over a normal surface is that of Orgill and Hollands, due to the effectiveness of 75 % in the ratio obtained between the experimental direct radiation and that of a model on a normal surface. For Hottel model, the value of three coefficients were calculated (a_0 , a_1 and k) for clear, cloudy and semi-cloudy days, typical of the city of Bogotá.

Keywords: Direct solar radiation

Introducción

El estudio de procesos que relacionan la radiación solar permite realizar la validación de modelos de estimación de radiación solar directa en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y de manera explícita en la

cuidad de Bogotá; se han realizado muy pocas mediciones y por tanto no existen estudios prolongados de este tipo de radiación que permitan su evaluación experimentalmente y/o mediante el uso de modelos teóricos o elaborados empíricamente; por esta razón se realizó un estudio de modelos ya desarrollados para establecer su validez en el sitio de interés y asimismo efectuar los ajustes que faciliten su utilización.

No podemos construir sin haber conocido y estudiado las posibilidades que permitan llegar a la solución de interrogantes. Esta construcción del conocimiento se originó en el intento de validar los modelos de Orgill y Hollands, Page, Iqbal, Liu y Jordan, ASHARE y Hottel mediante los datos obtenidos de radiación directa y global usando los instrumentos adecuados para la estimación de dicha radiación para la ciudad de Bogotá, específicamente utilizando los instrumentos instalados en el Laboratorio de Energías Alternativas de la Universidad Distrital Sede Macarena A, lo cual condujo a determinar cuáles de ellos tienen un mejor comportamiento para realizar su respectivo ajuste y de esta manera escoger el o los que ofrecen mayor precisión.

Procedimiento experimental

Para validar y ajustar los seis modelos de radiación solar fue necesario adelantar la tarea previa de hacer los ajustes correspondientes para la toma de datos, tanto de radiación global como directa; para ello se revisaron cada uno de los equipos de medición; dado que el pirheliómetro se debe mover de oriente a occidente para seguir el Sol se hizo necesario determinar el Norte geográfico para orientar el pirheliómetro; el eje Norte-Sur geográfico fue hallado de una manera experimental utilizando el método de la sombra y teniendo en cuenta el tiempo solar verdadero para su determinación.

Posteriormente se realizó la toma de los datos con cada uno de los instrumentos. Los datos de radiación global y directa fueron tomados con ayuda de un multímetro (milivoltios) conectado a las terminales de los instrumentos utilizados en la obtención de estos tipos de radiación; de esta manera era posible observarlas, compararlas y analizarlas una respecto a la otra.

Esta toma de datos se desarrolló durante seis meses, desde febrero hasta julio de 2004; posteriormente se comenzó a realizar la respectiva evaluación de los datos obtenidos; para ello se tomaron los valores de radiación global y directa por cada uno de los instrumentos de medición y se elaboraron las gráficas de intensidad versus hora, donde se muestran los comportamientos generales de cada una de ellas para cada día; se puede observar que los dos tipos de radiaciones se comportan de la misma manera, es decir, cuando una crece la otra también y viceversa, para la mayoría de los intervalos de hora medidos, lo cual garantiza confiabilidad en los datos adquiridos.

Realizando la comparación más detallada simultáneamente de cada uno de los valores

de las dos radiaciones, se observó que en determinados momentos del día se obtienen mediciones de radiación directa y global que responden a estados transitorios de los aparatos de medida (esto se debe a los tiempos largos de respuesta y a la diferencia que hay entre ellas en relación con cada uno de los instrumentos), o a perturbaciones que afectan la estabilidad de los equipos como una mayor reflexión de uno de ellos a determinada hora del día, por lo que se procedió a revisar minuciosamente dato por dato para garantizar que hubiera un aumento o una disminución consecuente entre cada uno de ellos (procedimiento que nos permitió establecer el ajuste de la radiación directa con respecto a la global); fueron excluidos los datos que no cumplieran esta condición y que satisficieran el hecho de aumentar o disminuir en la misma proporción.

De esta manera se depuraron los datos no consistentes de radiación global y directa, y se procedió a trabajar con cada uno de los modelos. Para ello se tomaron los datos y con ellos se construyó lo que se conoce como día característico, en el que se visualizaran todos los datos medidos durante diferentes momentos del día y que presentara el comportamiento general de cada modelación.

Resultados

Para lograr la medida de la radiación global se utilizó un piranómetro blanco y negro, y la radiación directa se midió utilizando un pirheliómetro: El piranómetro que se encuentra en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas es un Eppley blanco y negro (Fig. 1). Componentes: Domo de vidrio, desecador, tornillos de nivelación, termopila y elemento sensible.



Fig. 1. Piranómetro blanco y negro Eppley (ubicado en el laboratorio de Energías Alternativas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas).

Características generales del piranómetro

El piranómetro modelo 8-48 ubicado en la Universidad Distrital Sede Macarena A fue construido con características de sensibilidad (aprox. $11\mu\text{Vm}^2/\text{W}$), impedancia (aprox. $350\ \Omega$), temperatura ($\pm 1,5$ cuando la temperatura ambiente oscila entre -20° y $+4\ ^\circ\text{C}$), respuesta a la ley del coseno para emisión y absorción ($\pm 2\ %$ desde el ángulo cenit de normalización $0-70^\circ$ y $\pm 5\ %$ $70-80^\circ$ ángulo cenit), orientación (ninguna orientación afecta el funcionamiento del instrumento) y vibración mecánica, entre otros aspectos.

Pirheliómetro de incidencia normal (Eppley): El pirheliómetro que se encuentra en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Sede Macarena A) es de este tipo; consiste en un radiómetro utilizado concretamente para determinar la incidencia normal de la radiación solar directa; realizar mediciones de manera automática cuando el elemento sensible recibe la señal; para esto se orienta el seguidor solar hacia el Sol.

Componentes: El pirheliómetro se encuentra conformado por las siguientes partes: tubo, mirillas de nivelación, bandeja de cuatro filtros y termocupla (Fig. 2).



Figura 2. Pirheliómetro Eppley.

Características generales del pirheliómetro de incidencia normal Eppley: El interior del tubo se encuentra ennegrecido y cuenta con un diafragma para dirigir el paso de la luz. Este tubo se encuentra lleno de aire seco a presión atmosférica, está sellado al final y se puede inspeccionar por un orificio que tiene un milímetro de diámetro. En la parte exterior tiene dos mirillas dispuestas perpendicularmente, una con respecto a la otra, que deben ser utilizadas con cuidado, pues si se desprende la mirilla de la parte inferior o se amplía el radio del orificio de la mirilla superior, pierde la orientación del instrumento. La bandeja donde se disponen los filtros se puede rotar manualmente.

Este instrumento posee las siguientes especificaciones técnicas, que deben ser tenidas en cuenta para la medición de radiación solar directa; estas características corresponden a las proporcionadas por el fabricante: Instrumento con número de serie: 31750EG.

Modelo NIP.

Sensibilidad: $8 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$.

Impedancia: aprox. 200Ω .

Dependencia de la temperatura: $\pm 1 \%$ (si la temperatura oscila entre $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ y $+40 \text{ }^\circ\text{C}$).

Linealidad: $\pm 5 \%$, desde 0 hasta 1400 Wm^{-2} .

Tiempo de respuesta: 1 s.

Vibración mecánica: Probado hasta 20 g's.

Calibración referencia: Eppley primario perteneciente al WSP (Grupo Estándar Mundial).

Constante: La constante de calibración del instrumento es de $7,70 \mu\text{V/Wm}^{-2}$. Seguidor solar (Tracker): Es un dispositivo que permite seguir el Sol. El seguidor solar adquirido por la Universidad Distrital es el ST-1 y está constituido por:

- Base rígida.
- Tres tornillos de nivelación.
- Brazo rotativo donde se fija el instrumento de medida.
- Abrazadera para asegurar el instrumento.
- Tornillos para asegurar el instrumento según el tiempo del día.
- Escala para calibrar la latitud.
- Motor.
- Escala para calibrar la declinación.
- La escala de declinación en el seguidor solar va de -25° a $+25^\circ$, con divisiones cada 5° . Se encuentra sobre el brazo móvil donde se dispone el pirheliómetro.
- La escala para establecer la latitud del lugar está en una escala de 0 a 90° , numeradas en intervalos de diez grados. Esta escala se ubica en el eje de rastreo del seguidor solar.

Especificaciones técnicas: Al igual que el pirheliómetro, el seguidor solar también cuenta con especificaciones suministradas por los fabricantes del equipo: Tamaño: 0,28 m; peso: 2,5 kg; aporte de energía: 110-120 V AC 60 Hz; indicador de exactitud: mejor que $\pm 0,25^\circ$ diariamente; latitud: escala de 0 a 90° ; revoluciones: 360° en un día.

Factores que afectan la disponibilidad de energía solar

Los siete principales factores que afectan la cantidad de radiación solar incidente sobre una superficie horizontal son: ubicación geográfica, ubicación de la superficie, orientación de la superficie, tiempo del día y del año, condición atmosférica y propósito del instrumento, factores todos cuya consideración permite garantizar el mayor aprovechamiento de la cantidad de radiación solar que incide sobre una superficie específica.

Determinación del Norte geográfico

Debido a que el pirheliómetro se debe mover de oriente a occidente para seguir al Sol, se hizo necesario determinar el Norte geográfico para orientarlo. Existen cuatro técnicas relativamente simples para determinarlo: La primera es bien conocida y consiste en usar un transportador y hacer ajustes apropiados para la diferencia entre el polo geográfico y el polo magnético; la segunda consiste en observar el Sol al mediodía solar; la tercera, en ver la estrella del norte durante la noche en el hemisferio Norte; y la cuarta es un dispositivo de sombra.

Determinación del Norte al mediodía solar:

Este método consiste en colocar una varilla y exactamente a las doce, hora solar local, trazar su sombra, ya que a esta hora el Sol se encuentra siempre en su punto más alto y contenido en el plano que baja del meridiano al suelo (plano meridiano), que contiene el eje Norte-Sur geográfico, apuntando hacia el Norte; el Sur se halla en sentido contrario

(Fig. 3).

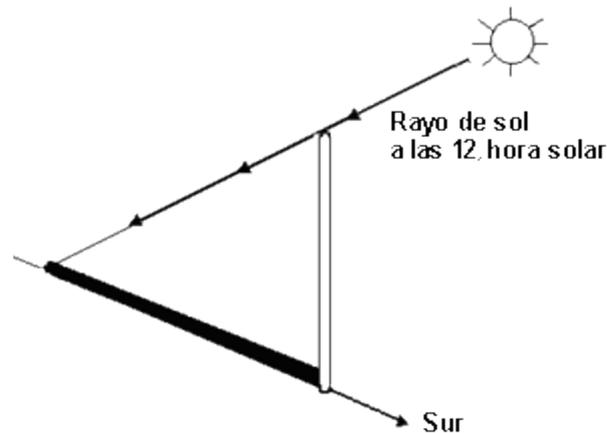


Fig. 3. Determinación del Norte geográfico.

Para utilizar este método es necesario calcular la hora solar verdadera, para lo cual se halla E_t , que corresponde al factor de corrección de la hora y depende del día en que sea calculado.

Estimación de radiación en un cielo claro

Modelos para la estimación de radiación solar

Hottel [1976] presentó un método para calcular la radiación transmitida a través de la atmósfera clara, en el cual toma en cuenta el ángulo cenit y la altitud para una atmósfera estándar y cuatro tipos de clima: tropical, verano en latitudes medias, verano subártico e invierno en latitud media. El coeficiente de transmitancia de radiación solar $\tau_b G_{bn}/G_{on}$ está dado por la expresión:

$$\tau_b := a_0 + a_1 \cdot e^{\frac{-k}{\cos(\theta_z)}} \quad (1)$$

Las constantes a_0 , a_1 y k de la atmósfera estándar con 23 km de visibilidad son encontradas de las siguientes ecuaciones (La atmósfera estándar representa una condición típica de latitud media y sin contaminación por polución, independientemente del grosor del ozono):

$$\begin{aligned} a_0 &= 0,4237 - 0,00821 (6 - A)^2 \\ a_1 &= 0,5051 + 0,0059 (6,5 - A)^2 \\ k &= 0,2711 + 0,01858 (2,5 - A)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

A: Altitud del observador, en kilómetros.

Hottel también encontró las ecuaciones de a_0^* , a_1^* y k^* para una atmósfera estándar con 5 km de visibilidad.

Los factores de corrección son aplicados a a_0^* , a_1^* y k^* para cada tipo de clima. Los factores de corrección $r_0 = a_0/a_0^*$, $r_1 = a_1/a_1^*$ y $r_k = k/k^*$ se encuentran en la tabla 1.

Tabla. 1. Modelo de Hottel

| Tipo de clima | r_0 | r_1 | r_k |
|-----------------------------|-------|-------|-------|
| Tropical | 0,95 | 0,98 | 1,02 |
| Verano (latitudes medias) | 0,97 | 0,99 | 1,02 |
| Invierno (latitudes medias) | 1,03 | 1,01 | 1,00 |
| Verano subártico | 0,99 | 0,99 | 1,01 |

De esta manera la transmitancia de esta atmósfera estándar de radiación puede ser determinada por el ángulo cenit; la radiación solar directa normal es entonces:

$$G_{cbn} := G_{on} \cdot \tau_b \quad (3)$$

Donde:

G_{cbn} : Radiación solar directa que capta el pirheliómetro.

G_{on} : Radiación extraterrestre, medida en el plano normal a la radiación en un día n del año.

τ_b : Coeficiente de absorción solar directa.

La componente horizontal de la radiación solar para un día despejado es:

$$G_{cb} := G_{on} \cdot \tau_b \cdot \cos(\theta_z) \quad (4)$$

Donde:

G_{cb} : Componente de la radiación solar directa en el plano horizontal.

Orgill y Hollands [1977]: Esta correlación se basa en cuatro años de datos de Toronto, Canadá (43°48' N). Los datos de radiación difusa fueron medidos por un piranómetro de sombra-banda. Esta correlación se divide en tres partes:

$$\begin{aligned} Id/I &= 1,0 - 0,249 k_T \quad 0 \leq k_T \leq 0,35 \\ Id/I &= 1,557 - 1,84 k_T \quad 0,35 \leq k_T \leq 0,75 \\ Id/I &= 0,177 k_T \quad k_T > 0,75 \end{aligned} \quad (5)$$

*(Ecuaciones propuestas por Orgill y Hollands).

Page: Propuso desarrollar una correlación basada en el análisis de regresiones de datos, usando datos de diez estaciones situadas entre 40° Norte y 40° Sur de latitud, y recomendó la siguiente ecuación lineal:

$$\bar{Hd}/\bar{H} = 1,00 - 1,13 \bar{K}_t \quad (6)$$

Liu-Jordan: La ecuación 7 fue ajustada a partir de los datos de tres estaciones. Los datos usados por Liu y Jordan fueron usados por Hottel.

$$\overline{Hd}/\overline{H} = 1,39 - 4,027 \overline{K_T} + 5,531 \overline{K_T}^2 - 3,108 \overline{K_T}^3 \quad 0,3 < \overline{K_T} < 0,7 \quad (7)$$

El modelo de Liu-Jordan tiene en cuenta la naturaleza fluctuante de la radiación solar, razón por la cual emplean la distribución fraccional de tiempo de la radiación y su integral, es decir, la distribución de frecuencias, ya que son ellas las encargadas de describir estas fluctuaciones que resultan de vital importancia para el modelamiento de sistemas solares.

Iqbal: Propuso una correlación escasamente diferente a la de Page usando datos canadienses que fueron corregidos para efectos de banda de sombra. Esta correlación es:

$$\overline{Hd}/\overline{H} = 0,958 - 0,982 \overline{K_T} \quad 0,3 < \overline{K_T} < 0,6 \quad (8)$$

Y se deduce a partir de datos de la NASA, mediante valores de la constante solar de 1 353 W/m², donde Page usó un valor mayor que esta constante.

\overline{H}_0 en \overline{H}_T fue calculado como un verdadero promedio de las sumas diarias. El índice de claridad medio mensual es el cociente entre el promedio mensual de radiación diaria en una superficie horizontal y el promedio mensual diario de radiación extraterrestre en la ecuación:

$$\overline{K_T} = \overline{H}/\overline{H}_0 \quad (9)$$

Los datos de H (promedio), H_e e I , son mediciones de radiación solar total en una superficie horizontal, lo que es comúnmente medible con el piranómetro y el pirheliómetro.

ASHRAE: El método más simple usado para la estimación de la radiación por horas en días claros es usando los datos de atmósfera clara;

ASHRAE, Farber y Morrison, en 1977, mostraron tablas de la radiación normal directa y la radiación total sobre una superficie horizontal como función del ángulo cenital.

Para obtener datos de I diarios y hora por hora se basaron en los puntos medios de las horas; este método estima la radiación de cielo claro con un valor de radiación de 10 % mayor que el modelo de Hottel y el método de día estándar de Liu-Jordan, mientras que los datos de ASHRAE son fáciles de usar; los métodos provistos por Hottel y Liu-Jordan dependen del tipo de clima y la altitud para ser obtenidos.

El modelo de ASHRAE es un caso particular del modelo de Hottel; ha sido utilizado para estimar con gran éxito la radiación solar directa en países como Estados Unidos y España. Los parámetros físicos que describen

este modelo se basan en una tendencia exponencial de la radiación directa. La ecuación que permite calcular el valor de la irradiancia es:

$$I = A \cdot e^{-Bt} \quad (10)$$

Donde:

I : Irradiancia directa sobre el lugar (W/m^2).

A : Constante de proporcionalidad (W/m^2).

B : Constante adimensional.

t : Parámetro físico .

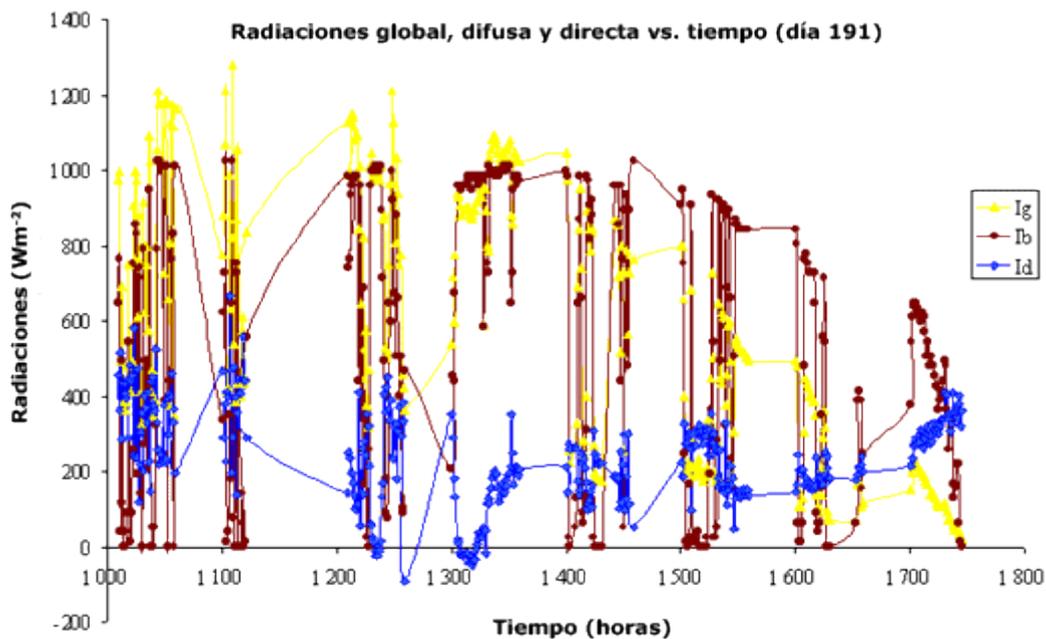
Donde:

$t = (1 / \text{sen } \gamma)$.

γ : Altura solar.

Análisis de resultados

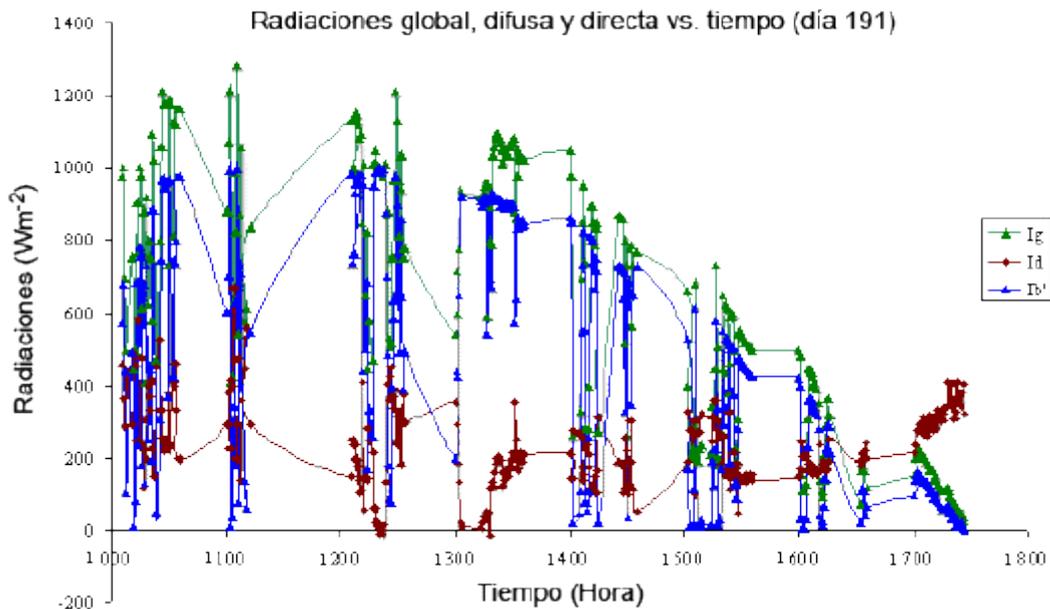
A partir de los valores obtenidos de radiación global y directa por cada uno de los instrumentos de medición, se realizaron gráficas de intensidad vs. hora, que muestran el comportamiento general de cada una de ellas para cada día; se puede observar que los dos tipos de radiaciones se comportan de la misma manera para la mayoría de los intervalos de horas medidos, lo cual garantiza confiabilidad en los datos adquiridos (Gráfica 1).



Gráfica 1. Correspondencia de los tres tipos de radiación (directa, global y difusa) para el día 191.

Realizando una comparación más detallada, simultáneamente, de cada uno de los valores de las dos radiaciones, se observó que en determinados momentos del día se obtienen mediciones de radiación directa y global que responden a estados transitorios de los aparatos de

medida. A continuación se muestran las gráficas una vez realizada la revisión de cada uno de los valores (Gráfica 2).

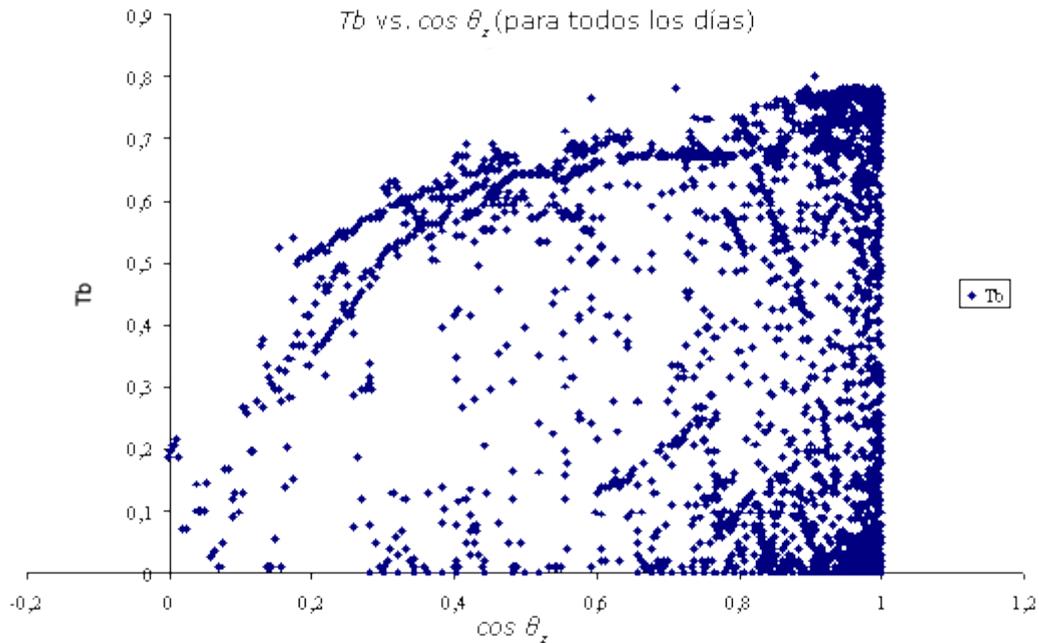


Gráfica 2. Gráficas de los tres tipos de radiaciones con los valores evaluados para el día 191.

Después de realizado este trabajo se procedió a evaluar cada uno de los modelos de radiación; para ello se determinó construir un día característico en el que se unificaran todos los datos medidos y que representara el comportamiento general de cada modelo. Es posible realizar esta unificación debido a que Colombia está ubicada a 4° por encima del Ecuador, en una zona tropical donde la intensidad de radiación no cambia de una manera considerable de un mes a otro.

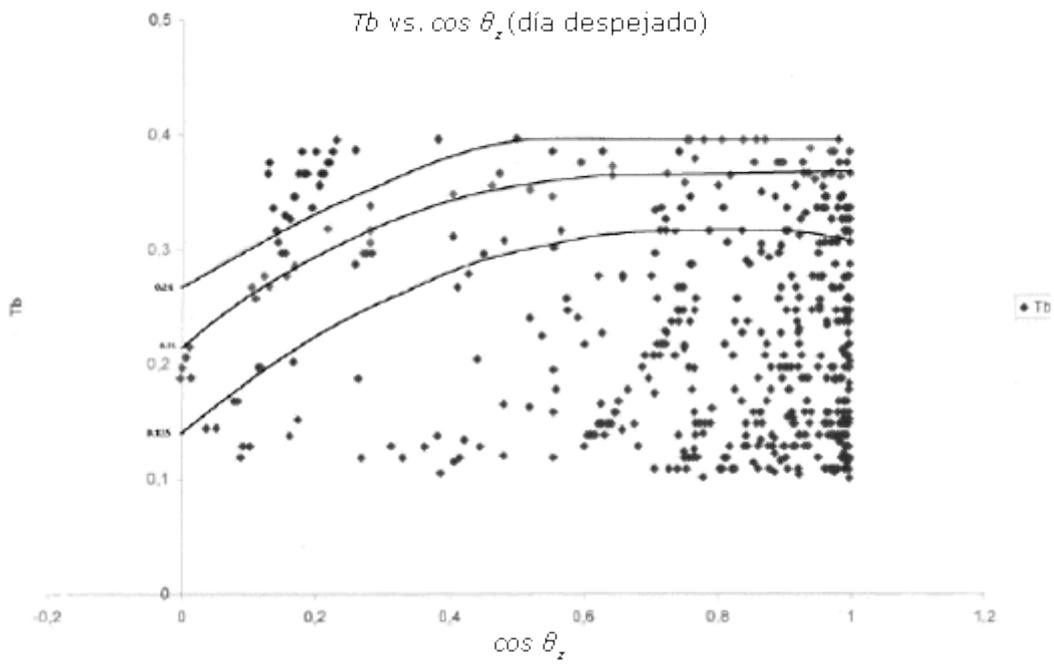
Modelo de Hottel

El primer modelo que se evaluó fue Hottel; que permite la estimación de radiación transmitida a través de la atmósfera clara (estándar)*, teniendo en cuenta el ángulo cenit y la altitud; posteriormente obtenidos los valores, se realizó la gráfica del modelo (Gráfica 3).

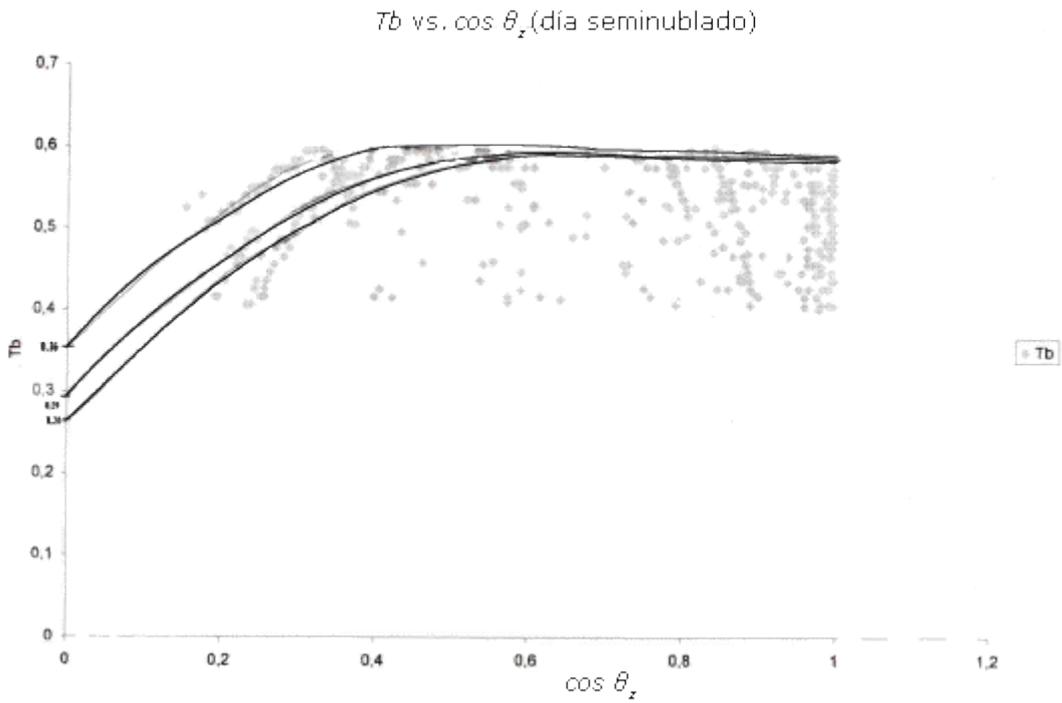


Gráfica 3. Modelo de Hottel incluyendo todos los datos experimentales.

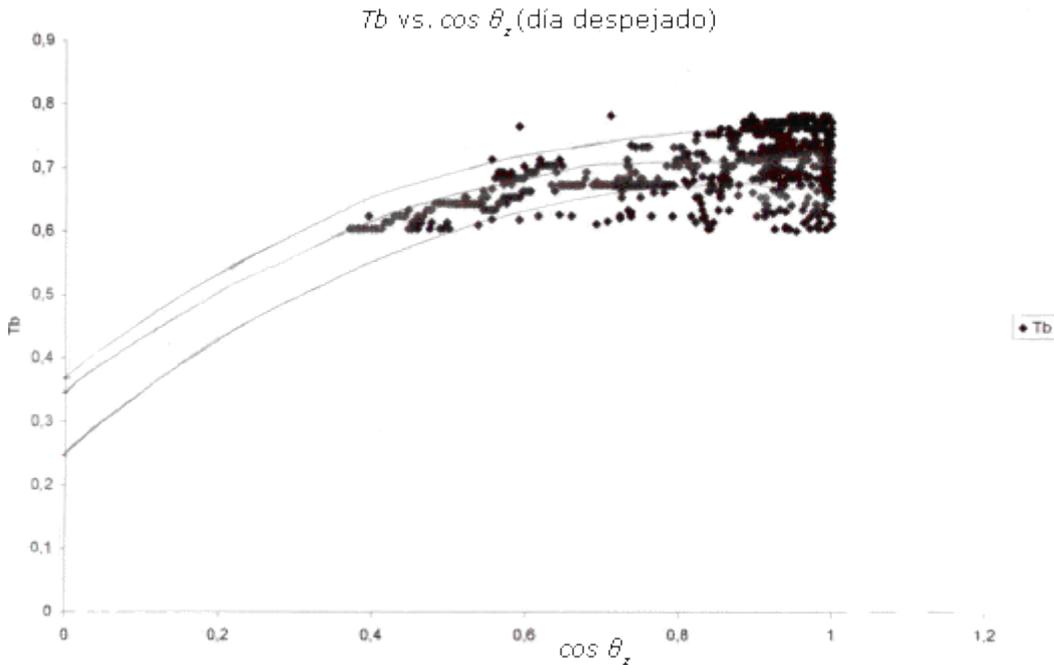
La gráfica 3 muestra el coeficiente de transmitancia τb vs. el valor correspondiente al coseno del ángulo cenital ($\cos \theta_z$). Para las condiciones climáticas características de la ciudad de Bogotá consideramos que es necesario determinar tres condiciones de cielo: despejado, seminublado y nublado, mediante un criterio matemático que permita seleccionar los valores del coeficiente de transmitancia τb para estas condiciones, teniendo en cuenta para la elección de intervalos la consistencia del valor de la radiación, tomando el rango de 0,1 a 0,4 para días nublados cuando los valores de radiación directa se encuentran entre 140 y 500 Wm^{-2} ; de 0,4 a 0,6 para día seminublado cuando la mayor parte de los valores de radiación directa están entre 500 y 800 Wm^{-2} , y de 0,6 a 0,8 para días despejados cuando la radiación directa tiene valores de 800 a 1 025 Wm^{-2} . Para días claros no se va a tener un valor superior de 0,8 debido a las condiciones climáticas. Posteriormente se realizaron las gráficas τb vs. $\cos \theta_z$ correspondientes a cada condición de día (Gráfica 4).



Día nublado:



Día seminublado:



Día despejado.

Gráfica 4. Modelo de Hottel para las tres condiciones de día.

A partir de las curvas obtenidas para cada una de las condiciones, se halló la primera constante del modelo llamada a_0 , que para este caso representa el punto de corte de la curva con el eje, tal como se observa en las gráficas anteriores (Gráfica 5).

Después de tener este valor se tomó la ecuación característica del modelo y se despejó de tal manera que en el eje y , que dará la diferencia entre el coeficiente de transmitancia y a_0 dividido por la segunda constante desconocida llamada a_1 (Tabla 1).

Se obtiene:

$$T_b = a_0 + a_1 e^{-k/\cos \theta z} \text{ (ecuación característica)}$$

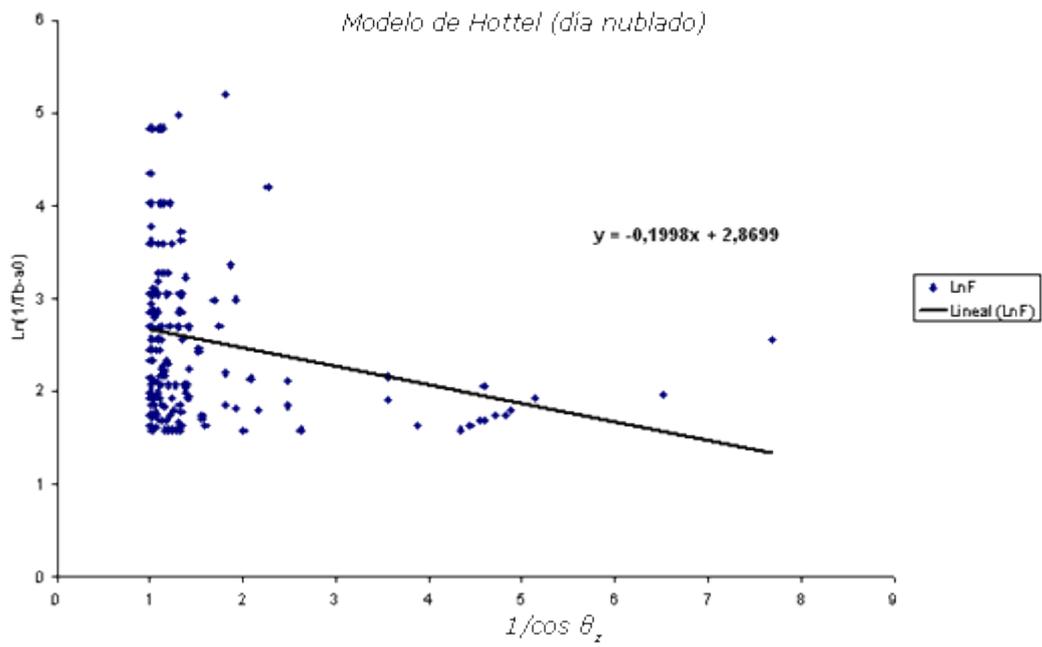
$$(T_b - a_0)/a_1 = e^{-k/\cos \theta z}$$

$$a_1/(T_b - a_0) = e^{k/\cos \theta z}$$

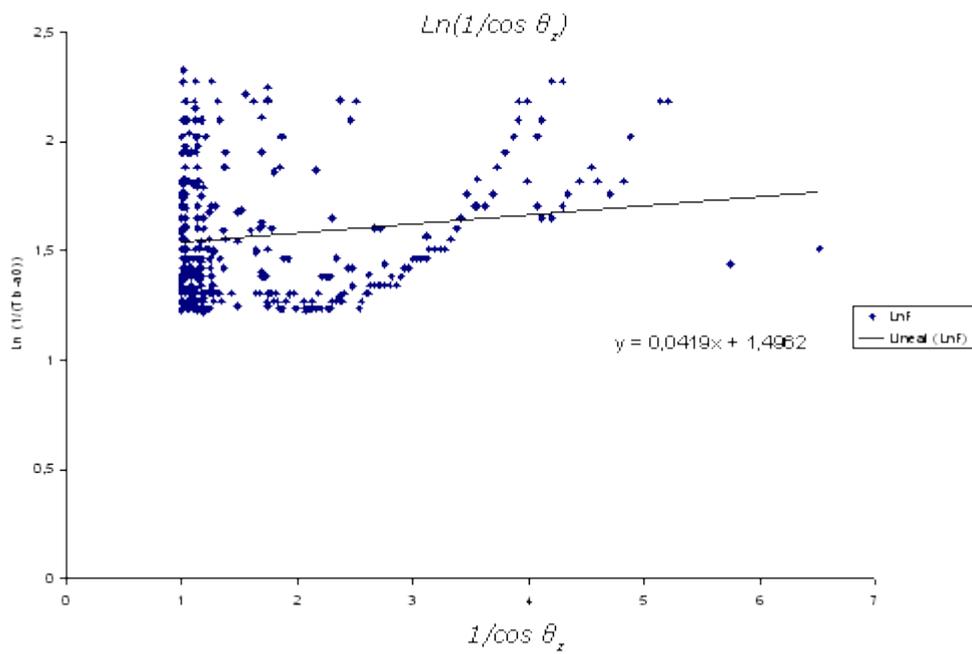
$$1/(T_b - a_0) = 1/a_1 e^{k/\cos \theta z}$$

$$\ln(1/(T_b - a_0)) = \ln(1/a_1) + k/\cos \theta z$$

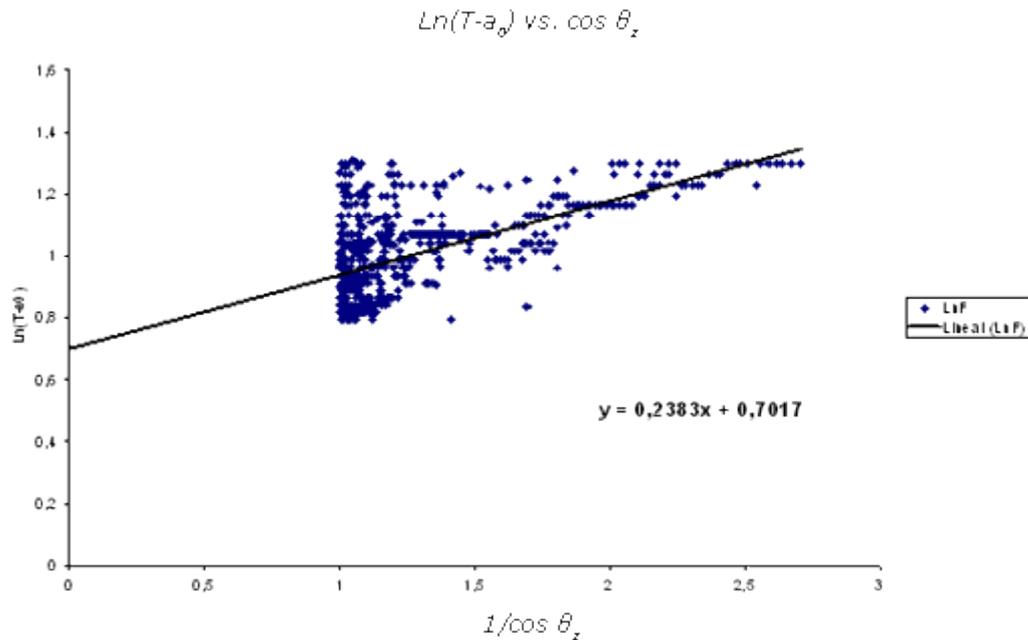
Día nublado:



Día seminublado:



Día despejado:



Gráfica 5. Representación gráfica del modelo de Hottel mostrando a_1 y k para las condiciones de día.

Tabla 1. Intervalos de los coeficientes obtenidos experimentalmente para el modelo de Hottel

| Coeficiente | Día nublado | | Día seminublado | | Día despejado | |
|-------------|---------------------|-----------|-----------------------|-----------|---------------------|-----------|
| | Intervalo | Incertid. | Intervalo | Incertid. | Intervalo | Incertid. |
| a_0 | $0,14 < a_0 < 0,24$ | 26,3 % | $0,253 < a_0 < 0,353$ | 16,7 % | $0,27 < a_0 < 0,39$ | 18 % |
| a_1 | $0,04 < a_1 < 0,08$ | 33,3 % | $0,19 < a_1 < 0,27$ | 17 % | $0,45 < a_1 < 0,55$ | 10 % |
| k | $-0,31 < k < 0,09$ | 55 % | $0,02 < k < 0,06$ | 50 % | $0,18 < k < 0,40$ | 38 % |

A partir de los valores de la tabla podemos observar que los coeficientes del modelo experimental para la condición de día despejado concuerdan con los obtenidos teóricamente por el modelo de Hottel. Por consiguiente, los coeficientes obtenidos para las otras dos condiciones de clima son aceptados, debido al comportamiento general del modelo experimental.

Modelo de Orgill y Hollands

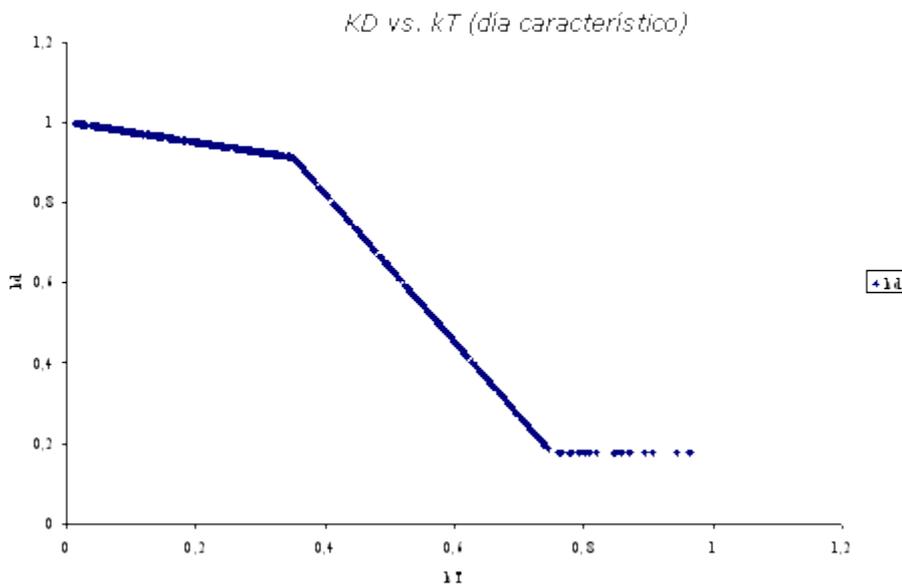
El segundo modelo que se evaluó fue el de Orgill y Hollands, que busca con la obtención del índice de claridad horario k_T hallar la relación entre la radiación difusa y la radiación total horaria mediante tres correlaciones que clasifican a este coeficiente en tres rangos ($0 \leq k_T \leq 0,35$); ($0,35 \leq k_T \leq 0,75$); ($k_T > 0,75$).

Para evaluar este modelo fue necesario, además de utilizar los datos ya evaluados, obtener la desviación estándar de los valores de radiación global horaria para los cuales no se contaba con valores de radiación

solar directa, lo que se hizo con el fin de disminuir el margen de error en los datos de radiación global horaria; este índice se halló realizando el cociente entre la intensidad de la radiación global horaria y la intensidad de radiación extraterrestre en una superficie horizontal, en un intervalo de una hora.

Posteriormente estos resultados fueron sustituidos en la ecuación, de acuerdo con su rango en su respectiva correlación, lo que permitió hallar la relación entre la radiación difusa horaria y la radiación total (a esta relación se le da el nombre de coeficiente k_d), para todas las horas del día donde se contaba con mediciones de intensidad de radiación global horaria.

Se realizó la gráfica de este coeficiente versus el índice de claridad horaria para el día característico (Gráfica 6).



Gráfica 6. Gráfica del modelo de Orgill y Hollands tomando los datos de todos los días, es decir, construyendo un día característico.

Teniendo en cuenta que la gráfica realizada de la reunión de todos los días correspondía al comportamiento del modelo, se halló la radiación difusa horaria sobre una superficie horizontal, multiplicando k_d por la radiación global horaria llamada también total en la misma componente, como se muestra a continuación:

$$I_{d,h}(\text{Orgill y Hollands}) = k_d \cdot I_{g,h}$$

Después de hallado este valor se calcula la radiación solar directa horaria sobre la superficie horizontal, mediante la diferencia entre los valores de radiación global medidos y los de radiación difusa calculados anteriormente, con la siguiente ecuación:

$$I_{b,h}(\text{Orgill y Hollands}) = I_{g,h} - I_{d,h}$$

A partir de este modelo se determina que la radiación directa obtenida por éste y la medida por el instrumento está en una relación de 75 % de aproximación, lo cual nos indica que este modelo puede ser utilizado en la ciudad de Bogotá con un margen de error de 25 %.

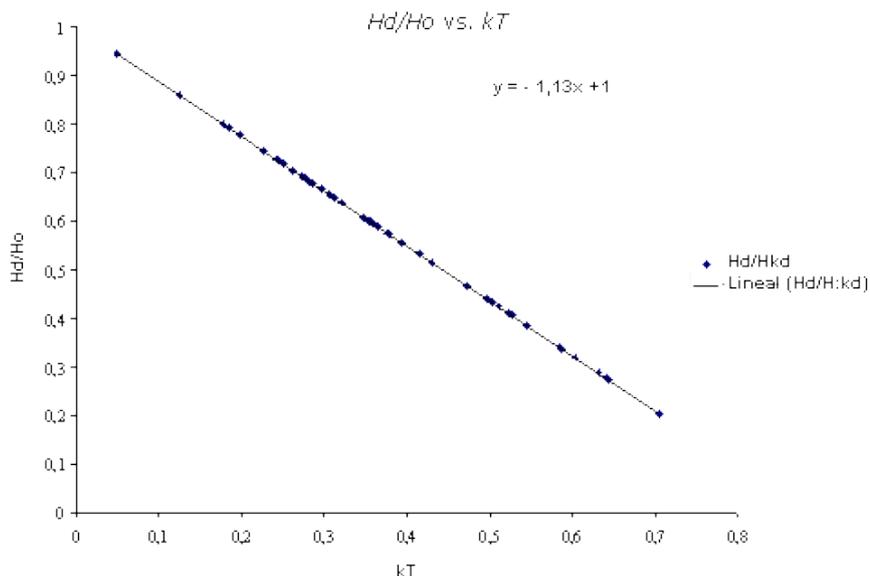
Modelo de Page

El tercer modelo trabajado fue el de Page, que busca mediante la obtención del índice de claridad medio mensual k_T , hallar la relación entre el promedio mensual diario de radiación difusa y el promedio diario mensual de radiación global recibido en una superficie horizontal con una correlación que permite utilizar este coeficiente desde su valor mínimo hasta su máximo.

En este caso el modelo no fue tomado tal como lo muestran los autores para promedios mensuales de radiación, debido a que no se contaba con datos suficientes para hallar la radiación media mensual de un mes específico; por esta razón se decidió realizar una modificación trabajando con la misma correlación, pero con valores diarios de radiación y empleando el índice de claridad diario.

Para ello se efectuó la sumatoria de todos los datos de radiación global horarios para cada uno de los días, a fin de obtener el valor diario y de esta manera poder determinar el índice de claridad mediante el cociente de radiación particular y la radiación extraterrestre para ese día; posteriormente este valor fue remplazado en la correlación para hallar la relación entre la radiación difusa diaria y la radiación global diaria (a esta relación se le denomina K_d diario).

Después se realizó la gráfica de este coeficiente vs. índice de claridad diario para todos los días en los que se tenían valores de radiación diaria; se observó que la gráfica se comporta de la misma manera que la descrita en los libros teóricamente por el modelo (Gráfica 7).



Gráfica 7. Modelo de Page relacionando H_d/H_o y K_T .

Se aplica la tendencia a la gráfica obtenida mediante los valores experimentales; se logra así un mejor rango con respecto a la tendencia lineal. Después se halló la radiación difusa diaria sobre una superficie horizontal, multiplicando a K_d por la radiación global diaria en la misma componente, como se muestra a continuación:

$$H_{d,dh}(\text{Page}) = k_d \cdot H_{g,dh}$$

Después de encontrado este valor se calcula la radiación solar directa diaria sobre la superficie horizontal mediante la diferencia entre los valores de radiación global medidos y los de radiación difusa calculados anteriormente, según la ecuación siguiente:

$$I_{b,dh}(\text{Page}) = I_{g,dh} - I_{d,dh}$$

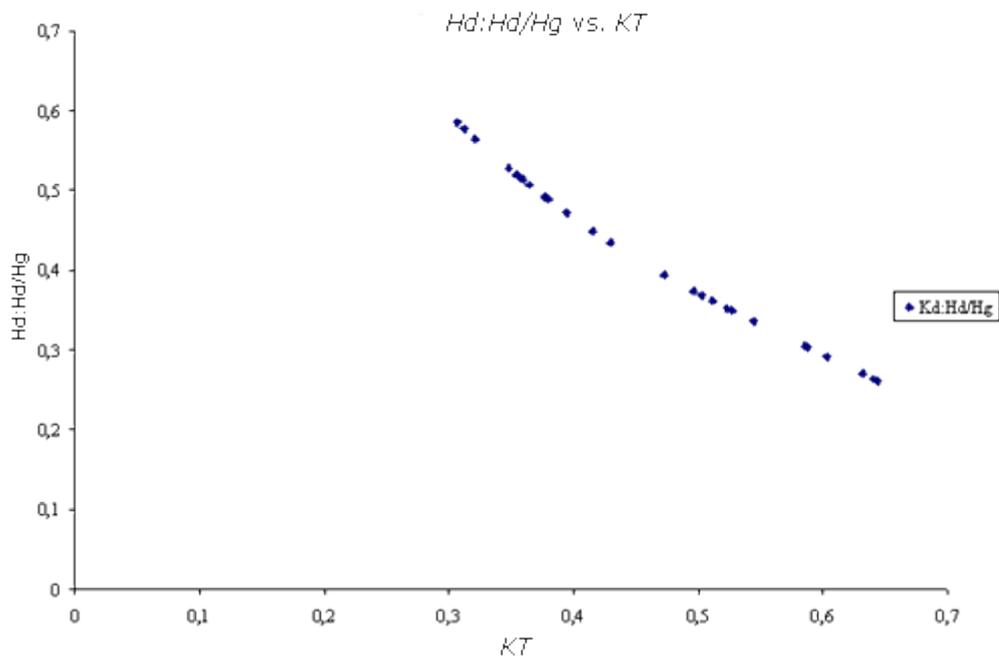
A partir de este modelo se determinó la radiación solar directa diaria, obteniendo 60 % de efectividad, lo cual garantiza la aplicabilidad de este modelo a las condiciones de clima para la ciudad de Bogotá. Se puede observar que los coeficientes obtenidos a partir de la gráfica del modelo se acercan a los determinados por Page.

Modelo de Liu-Jordan

El cuarto modelo trabajado fue el de Liu y Jordán, muy similar al anteriormente mencionado, pues también busca mediante la obtención del índice de claridad medio mensual K_T , hallar la relación entre el promedio mensual diario de radiación difusa y el promedio diario mensual de radiación global recibido en una superficie horizontal mediante una correlación diferente, pero que no utiliza al índice K_T en todo su rango, sino que lo clasifica en un intervalo de $(0,3 < K_T < 0,7)$ para poder ser empleado en ella.

Al igual que en el caso anterior, se trabajó con valores diarios y no con promedios diarios mensuales por las razones ya expuestas. Para ello se utilizaron los valores de K_T hallados en el modelo anterior, y se remplazaron en la correlación teniendo en cuenta el rango de cada coeficiente; si no se encontraba dentro del margen establecido no se tenía en cuenta. De esta manera se halló la relación entre la radiación difusa diaria y la radiación global diaria (K_d).

Después se realizó la gráfica de este coeficiente vs. índice de claridad diario, para todos los días en los que se tenían valores de radiación diaria (Gráfica 8).

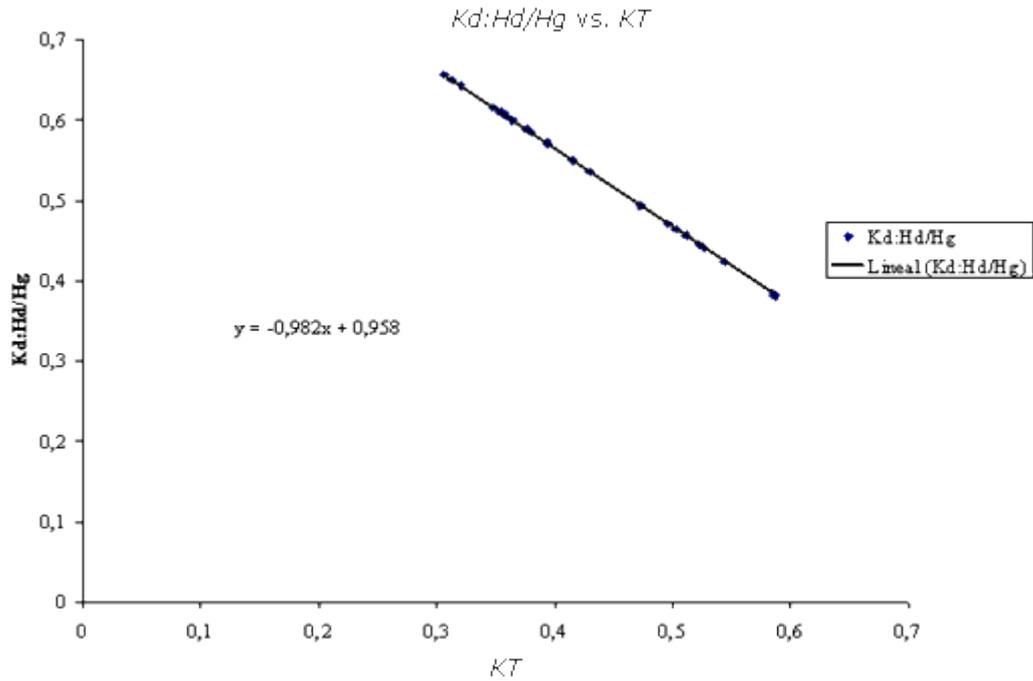


Gráfica 8. Modelo de Liu-Jordan (experimental).

Se observó que la gráfica se comporta de la misma manera que la descrita por el modelo, en forma de una curva suave decreciente. Teniendo en cuenta que las dos gráficas mostradas no difieren, se halló la radiación difusa diaria, la directa sobre una superficie horizontal de la misma manera que en el modelo de Page.

Modelo de Iqbal

El quinto modelo evaluado fue el de Iqbal, muy similar al de Page y al de Liu-Jordán, ya que también busca, obtenido el índice de claridad medio mensual k_T , hallar la relación entre el promedio mensual diario de radiación difusa y el promedio diario mensual de radiación global recibido en una superficie horizontal, mediante una correlación que utiliza un rango de K_T entre ($0,3 < K_T < 0,6$) para poder ser empleado por ella. Para esta correlación se realizó el mismo procedimiento que en los dos modelos anteriores; se obtuvo la gráfica de K_d vs. K_T , de la radiación teórica directa horizontal vs. la radiación directa experimental, al igual que la gráfica que permite observar la variación de la radiación difusa diaria con respecto a K_T (Gráfica 9).

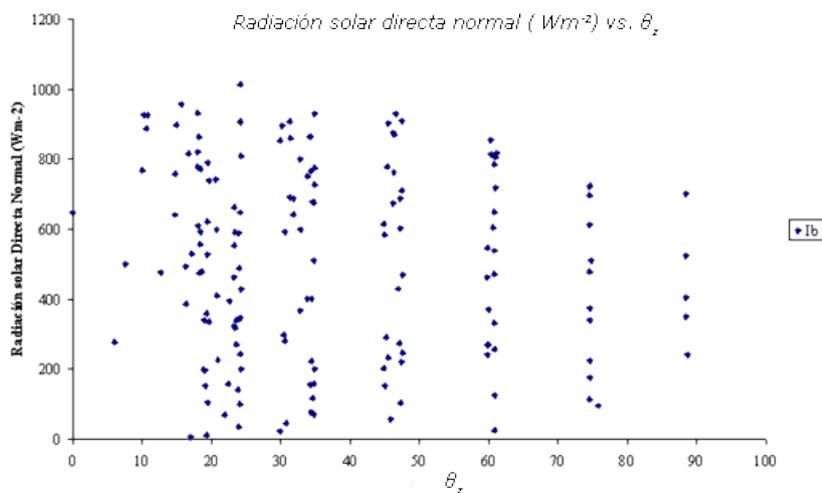


Gráfica 9. Modelo de Iqbal.

Se puede observar que este modelo es un caso particular del modelo de Page, debido al intervalo en el que se encuentra el coeficiente K_T .

Modelo de ASHRAE

El sexto modelo que se evaluó es el de ASHRAE, que busca la estimación de la radiación solar directa horaria sobre una superficie horizontal en cielos claros, graficando la intensidad de radiación vs. ángulo cenital (Gráfica 10).



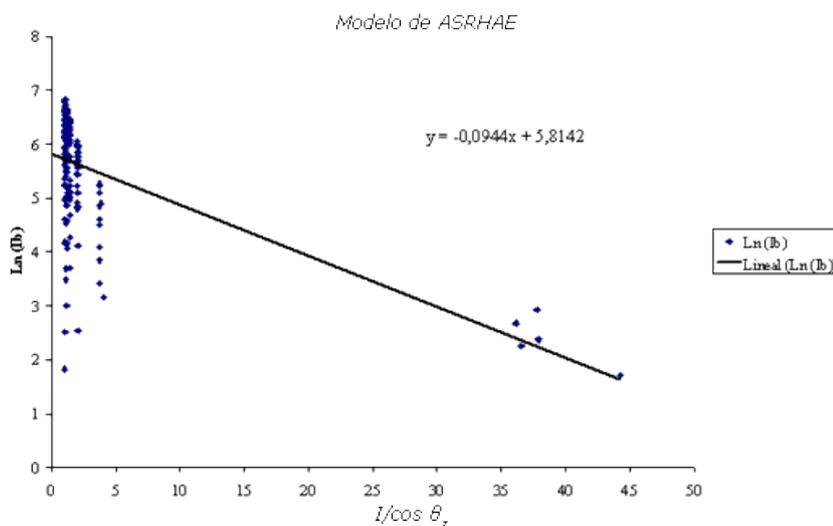
Gráfica 10. Representación del modelo de ASHRAE (Ib sobre una superficie horizontal vs. θ_z).

Se puede observar el comportamiento similar de I_b vs. θ_z al descrito por el modelo teórico. Al tener este comportamiento, se tomó la ecuación del modelo y se aplicó a ambos lados el logaritmo natural, obteniendo:

$$I_b = A e^{-B/\cos \theta_z} \text{ (ecuación característica)}$$

$$\ln(I_b) = \ln(A) - B/\cos \theta_z$$

A partir de esta relación se graficó el logaritmo natural del valor de intensidad horaria sobre una superficie horizontal vs. el inverso multiplicativo del ángulo cenit θ_z , y se aplicó la línea de tendencia para hallar la expansión de la exponencial, obteniendo una función lineal como se muestra en la gráfica 11.



Gráfica 11. Gráfica del logaritmo natural de I_b vs $1/\cos \theta_z$ para el modelo de ASHRAE.

A partir de la recta se obtiene el valor de A y B, en la que B corresponde al valor de la pendiente de la recta y A se determina a partir de la obtención del valor exponencial del punto de corte de la recta. La constante A físicamente representa la cantidad de radiación solar directa horaria recibida en una superficie horizontal, y B el valor del coeficiente de atenuación para la atmósfera. Los valores obtenidos para los coeficientes A y B mediante los valores experimentales de I_b sobre una superficie horizontal, se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de los coeficientes obtenidos para el modelo de ASHRAE

| Constantes | Valor experimental |
|------------|--------------------|
| A | -0,0944 |
| B | 335,023 |

Conclusiones

La puesta en práctica de conceptos de radiación solar permite determinar

que la construcción del conocimiento se origina cuando se reconoce que la razón por la cual se validaron y se ajustaron seis modelos de radiación solar es establecer su validez experimentalmente, determinando el valor a partir de cada una de las relaciones establecidas, lo que nos conduce a una aproximación en la construcción de otras opciones de conocimiento que se elaboran en la práctica al resolver o intentar solucionar problemas que involucren el estudio del recurso solar como fuente de energía.

- Se pudo determinar, a partir del modelo de Hottel, que la radiación directa horaria se puede expresar en función de a_0 , a_1 y k , que se comportan de acuerdo con las condiciones establecidas teóricamente por el modelo para un clima tropical y día claro, observándose que para las tres condiciones de cielo estos valores van disminuyendo a medida que estas cambian desde despejado hasta nublado.

- Los modelos de Liu-Jordan e Iqbal son un caso particular del modelo de Page, ya que en cada uno de ellos se pueden observar algunas condiciones de cielo debido a los intervalos que se manejan de K_T .

- El modelo que permite obtener un mejor valor de radiación solar directa sobre una superficie normal es el de Orgill y Hollands, debido a que la radiación obtenida entre la radiación directa experimental y la del modelo sobre una superficie normal tiene un rango de aproximación de 75 %.

- Lo que se ha expuesto puede y debe ser revisado en las áreas donde hay varios conceptos teóricos y se cuenta con modelos empíricos, como en el caso de la evaluación de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra, razón por la cual cada modelo que fue validado y ajustado para la estación de la Universidad Distrital evalúa parámetros diferentes que permiten establecer cuantitativamente qué tan efectivo y general puede ser cada uno de ellos.

Bibliografía

ASHRAE. Application Handbook(SI) Solar Energy Utilization, 1995.

CANANOVA COLÁS, JOSÉ. *Curso de energía solar*. Valladolid: Casa Salamanca y Soria, 1993.

DUFFIE, J. A. Y W. A. BEKMAN. *Solar Engineering of Termal Processes*. New York: John Wiley and Sons, 1980.

RODRÍGUEZ, HUMBERTO Y FABIO GONZÁLEZ. *Manual de radiación solar en Colombia*. Santa Fe de Bogotá: Universidad Nacional, 1992.

Desarrollo de catalizadores anódicos para celdas de combustible directas de etanol, propano y metano

Development of Anodic Catalysts for Direct Fuel Cells of Ethanol, Propane and Methane

C. Sánchez S., J. González O. y B. Hoyos M.
Laboratorio de Electroquímica, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede de Medellín, Colombia.
e-mail: gelectro@unalmed.edu.co

Resumen

Se estudió el comportamiento electrocatalítico de platino puro y aleaciones bimetálicas basadas en él con Ru, Sn, Ir y Os, soportados en carbón para la electrooxidación de etanol, con el propósito de desarrollar catalizadores y ánodos para celdas de combustible directas de etanol. En general, todas las aleaciones mostraron un mejor potencial de inicio de la reacción y mayor actividad catalítica que el platino puro; sin embargo, en la zona de altos sobrepotenciales se comporta mejor este último. De acuerdo con esto, las aleaciones estudiadas podrían ser útiles en operación con densidades de corriente moderadas y bajas. Se construyeron ánodos porosos basados en las mejores aleaciones halladas en el estudio cinético. Los ánodos se fabricaron con los catalizadores soportados en carbón de área superficial grande y después se fabricaron ensambles electrodos membrana, para celdas de combustible poliméricas, en las cuales se probaron los ánodos. Los resultados permitieron identificar problemas de fabricación de los ánodos y de los ensambles, pues los comportamientos de la celda fueron deficientes; se puede afirmar que hubo permeación del etanol a través de la membrana y que hay resistencias eléctricas grandes. Sin embargo, se lograron obtener curvas de operación características de celdas de combustible. Para la oxidación de los gases combustible, metano y propano, se construyeron ánodos bimetálicos basados en Pt con Ru e Ir, y se fabricaron los ensambles electrodos membranas usando los mismos procedimientos anteriores. Con los gases, a diferencia del etanol, no se observó permeación de ellos a través de la membrana; sin embargo, fue evidente la necesidad de realizar un control riguroso de la humidificación de los gases para lograr una operación estacionaria. En todas las celdas, en el cátodo se usó platino soportado en carbón.

Palabras clave: Celdas de combustible directas, etanol, propano, metano, electrocatalizadores bimetálicos anódicos, platino, rutenio, iridio, estaño, osmio

Abstract

The electric-catalyst behavior of pure platinum and bimetallic alloys are based on the pure platinum with Ru, Sn, Ir and Os, based on coal for ethanol electric oxidation, aimed at developing catalysts and anodes for direct fuel cells. In general, all alloys showed an improved potential at the beginning of the reaction and better catalyst activity than pure platinum; however, in the field of high over-potential, the latter performed better. According to this, alloys under study could be useful with moderated and low current densities. Porous anodes were made, based on the best alloys found in the kinetics study. Anodes were made with the catalysts based on coal of a large superficial area and then ensembles of membrane electrodes for polymeric fuel cells on which the anodes were tested. Results allowed the identification of problems on the anode manufacturing and that of the ensembles, since cell behaviors were deficient, there was ethanol permeability through the membrane and large electric resistances can be found. However, operational curves were achieved, typical of fuel cells. For the oxidation of fuel gases, methane and propane, bimetallic anodes were made based on Pt con Ru and Ir and membrane electrode ensembles were made using the same former proceedings. Differently from what occurred with ethanol, with the gases, permeability was not observed, gases did not penetrate the membrane; however, the need of keeping a rigorous gas humidification control was indispensable to achieve a stationary operation. Platinum was used supporting coal in the cathode in all cells.

Keywords: Direct fuel cells, ethanol, propane, methane, anodic bimetallic electric-catalysts, platinum, rutenium, iridium, tin, osmium

Introducción

Las celdas de combustible (CC) son reactores electroquímicos continuos que permiten la obtención en forma directa de energía eléctrica (energía de alta calidad) a partir de la energía química almacenada en los reactivos, lo que permite tener eficiencias teóricas de 100 %, a diferencia de los dispositivos que operan cíclicamente, que tienen limitada su eficiencia a la de Carnot. Por otra parte, en una CC la energía química que se utiliza es la energía libre de Gibbs (no hay combustión), mientras que en un motor de combustión es la entalpía. Existe la costumbre, por fines comparativos con las máquinas térmicas, de definir la eficiencia de una CC referida a la entalpía y no a la energía libre de la reacción (la cual es la referencia rigurosa), lo que puede ocasionar, en el caso de que la energía libre sea mayor que la entalpía de la reacción, que la eficiencia calculada resulte mayor que 100 %. El solo hecho de ser más eficientes hace que las CC sean menos contaminantes que las máquinas cíclicas, y si el combustible usado es H_2 , además de electricidad, la reacción produce sólo H_2O . Las CC poliméricas operan en condiciones cercanas a las ambientales, bajas temperaturas y presiones; son silenciosas, tienen pocos componentes móviles, lo que las hace ideales en muchas aplicaciones en la esfera automotriz, en áreas residenciales y en general en dispositivos móviles o estacionarios de pequeño tamaño.

Los problemas inherentes al hidrógeno obligan a la búsqueda de combustibles más adecuados para CC. En Colombia tienen importancia, entre otros, el etanol, el gas natural y el propano. Se requiere el desarrollo de electrocatalizadores para la oxidación directa de los combustibles arriba mencionados. Un problema por resolver con combustibles que tengan carbono es la formación de CO, que envenena el Pt (metal usualmente utilizado en ánodos) [Lanello, et al., 1999; Lamy, et al., 2001; Oliveira, et al., 2002]. Se sabe que el uso de un segundo metal que aporte especies oxidadas ayuda a que el Pt no se envenene, razón por la que se estudia el comportamiento de catalizadores bimetalicos basados en Pt [Schmidt, et al., 1996; Fujiwara, et al., 1999]. Algunos estudios han mostrado que la principal causa del envenenamiento es el CO, el cual queda fuertemente adsorbido y sólo puede oxidarse a CO₂ a altos potenciales. Los electrodos de platino modificados con metales como estaño han mostrado ser efectivos para la oxidación de CO, aumentan las densidades de corriente mediante la disminución del fenómeno del envenenamiento y la oxidación ocurre a menores potenciales que sobre platino puro. En estos catalizadores el potencial de inicio (*on-set*) de la oxidación es menor que el que se presenta en platino. Estos hechos pueden ser explicados por la presencia de un efecto sinérgico, comportamiento que puede explicarse porque en estos potenciales el segundo metal se encuentra cubierto por especies que contienen oxígeno, requerido para la oxidación del CO a CO₂. El potencial de inicio junto, con la corriente de intercambio, son indicadores del comportamiento catalítico.

La primera etapa de este estudio consistió en el análisis cinético de la electrooxidación de etanol en catalizadores bimetalicos del tipo Pt-M, soportados en carbón vítreo; M representa Ru, Ir, Os o Sn con variación en la composición del catalizador, la temperatura y la concentración de etanol en medio ácido. El comportamiento electrocatalítico se evaluó usando voltametría cíclica. Los mejores resultados correspondieron a las relaciones Pt-M alrededor de 50-50 para Pt-Sn y 90-10 para Pt-Ru, Pt-Ir y Pt-Os.

La segunda etapa consistió en la prueba, con etanol, de ánodos porosos fabricados con los mejores catalizadores de la primera etapa, en una CC polimérica desarrollada en el laboratorio. Se obtuvieron curvas E vs. I y P vs. I típicas.

La última etapa consistió en la prueba de las CC alimentadas con metano y propano. Aunque el propano tiene una densidad energética mucho más alta que la del metanol y el etanol, es de bajo costo y fácil adquisición en un país como Colombia; son pocos los estudios encontrados sobre su uso en CC. En la literatura revisada se hallaron pocos estudios con metano y propano, se limitan a su uso en celdas de combustible de óxido sólido [Park, et al., 1999] y una polimérica directa con propano [Savadogo y Varela, 2001]. Los ánodos se fabricaron con Pt₈₅/Ru₁₅, Pt₅₀/Ru₅₀, Pt₉₀/Ir₁₀ y Pt₅₀/Ir₅₀. Acá la experimentación presentó una dificultad adicional: el control de humedad de los gases.

Este trabajo constituye una primera aproximación al desarrollo de catalizadores, lo mismo que al desarrollo, diseño y construcción de CC directas, para combustibles de alta disponibilidad en Colombia.

Desarrollo experimental

La información cinética de la primera etapa se obtuvo con una estación de trabajo electroquímico BAS 100 b/w, mientras que las pruebas de la CC se realizaron con la estación MTS 150 de Electro Chem. Inc. Los depósitos se caracterizaron morfológicamente por medio de SEM y EXD (Jeol JSM 5910LV).

Preparación de los catalizadores

Los catalizadores se prepararon por depositación potencioestática de las aleaciones Pt-M sobre soportes de carbón vítreo de 2 mm de diámetro (Metrohm), los cuales fueron pulidos gradualmente hasta 5 μm con polvo de alúmina, después de lo cual se sometieron a una limpieza química con ultrasonido (Ultrasonic LC 60H, *Elma*) en agua destilada, seguida por etanol anhidro, ácido nítrico concentrado, y de nuevo agua destilada; como paso final, los soportes fueron electrooxidados en una solución de KOH 0,1 M, con el fin de incrementar la adherencia de las aleaciones. [Orozco y Gutiérrez, 2000]. Las soluciones para la depositación se prepararon por mezcla en proporciones volumétricas de 90:10, 70:30 y 50:50 de soluciones madre de 1 mg/mL de platino y 1 mg/mL de M, ambas con ácido sulfúrico 0,5 M, de acuerdo con la tabla 1.

Tabla 1. Composición de las soluciones para depositación de las mezclas platino-M

| Electrodo por depositar | mls. de solución de Pt | mls. de solución de M |
|----------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Pt ₉₀ M ₁₀ | 9 | 1 |
| Pt ₇₀ M ₃₀ | 7 | 3 |
| Pt ₅₀ M ₅₀ | 5 | 5 |

Después de la electrodeposición, las aleaciones catalíticas se lavaron con abundante agua destilada y se maduraron durante varios días sumergidas en ácido sulfúrico 1 M o agua destilada. Igual tratamiento se realizó para obtener electrodos con el metal M puro.

Caracterización de los catalizadores

Los catalizadores se caracterizaron empleando voltametría cíclica y la determinación del área de cada uno de ellos se realizó mediante integración de la corriente de adsorción, o la desorción de hidrógeno en ácido sulfúrico 1,0 M en el voltamograma obtenido, considerando que la capacidad de la capa eléctrica doble no varía con el potencial y que se adsorbe una monocapa de hidrógeno [Ureta-Zañartu, *et al.*, 1996]; entonces el área superficial de la mezcla de catalizadores se puede evaluar utilizando un valor de 210 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, como la carga específica para una monocapa de hidrógeno adsorbido

[Binder, *et al.*, 1972]. Este método es muy similar al empleado en el caso del platino puro. Además, la morfología superficial de los electrodos platino-M fue estudiada mediante microscopía de barrido electrónico.

La caracterización cinética de las aleaciones Pt-M en la electrooxidación de etanol se llevó a cabo usando diferentes velocidades de barrido de potencial, con H_2SO_4 1 M como electrólito soporte y soluciones acuosas de $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ 1 M, 3 M y 5 M a 25, 40 y 60 °C.

Una celda termostataada convencional de tres electrodos, como se muestra en la figura 1 se usó en todos los experimentos, como contraelectrodo alambre de Pt y como referencia un electrodo de Ag/AgCl 3 M.

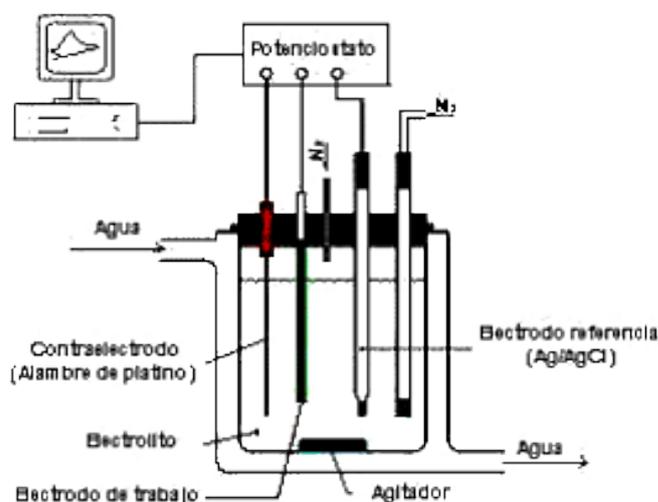


Fig. 1. Esquema del sistema electroquímico de medición. Prueba de los electrodos porosos en las celdas de combustible poliméricas

Estas pruebas se realizaron en una CC directa con electrodos de 10 cm², los ánodos para la oxidación de etanol en celdas de combustible se fabricaron de acuerdo con los mejores resultados de la etapa anterior. Todos los catalizadores se prepararon usando el método de coimpregnación y reducción con formiato en carbón de área superficial grande (Vulcan XC 72).

Las CC poliméricas se caracterizan por tener el denominado Ensamble Electrodo Membrana (EEM, o MEA, por sus siglas en inglés), que consta de una membrana de intercambio protónico (MIP), entre dos electrodos porosos [Passalacqua, *et al.*, 2001].

En este trabajo se empleó Nafion® 117.

En la fabricación de los ánodos y cátodos se utilizó el mismo procedimiento y sólo se diferencian en la composición y carga del catalizador el cátodo usa Pt puro con el doble de carga comparado con el ánodo.

La capa difusiva se fabricó de la manera siguiente: sobre un disco de tela de carbón con un área geométrica de $10,4 \text{ cm}^2$ se aplicó una pasta preparada con 0,12 g de Vulcan, 1 mL de alcohol isopropílico, 1 mL de agua destilada y 30 % de teflón en suspensión si el electrodo era un ánodo, y 10 % si era un cátodo [Moreira, *et al.*, 2003]. Después se dejó secar a $120 \text{ }^\circ\text{C}$ durante cuatro horas y se prensó a $350 \text{ }^\circ\text{C}$ y una presión de 100 kgf/cm^2 , con el fin de lograr la sinterización del teflón.

La capa catalítica se preparó por aplicación de una mezcla de Vulcan con catalizador, preparado anteriormente como ya se describió, de manera que la carga de platino en los ánodos se mantuviera en cerca de $0,57 \text{ mg/cm}^2$, con 0,40 mL de etanol absoluto, 0,20 mL de glicerina y 10 % de Nafion® en solución. La glicerina cumple la función de formadora de poros y se remueve con agua caliente después de prensado el electrodo. Los cátodos se preparan de manera similar, sólo que la carga de platino es $1,14 \text{ mg/cm}^2$.

El Nafion® en la capa catalítica facilita que la utilización del catalizador sea óptima, pues permite el contacto con la membrana [Passalacqua, *et al.*, 2001; Zhigang y Kaufman, 2003].

Una vez terminado el electrodo, se secó a $120 \text{ }^\circ\text{C}$, durante cuatro horas, y se prensó a una temperatura de $130 \text{ }^\circ\text{C}$ y una presión de 100 kgf/cm^2 ; así se logró sinterizar el Nafion®. Antes de fabricar el EEM, la membrana se trató, por espacio de una hora, con agua destilada, soluciones de peróxido de hidrógeno a 3 % y ácido sulfúrico 1 M, y nuevamente agua destilada, todas a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ [Pyle, *et al.*, 1993].

Para fabricar el EEM, simplemente se prensan los electrodos y la membrana usando una temperatura de $130 \text{ }^\circ\text{C}$ y una presión de 2,16 MPa durante tres minutos. El EEM se monta entre dos placas que permiten la conducción electrónica y la distribución del combustible y el aire o el oxígeno a los respectivos electrodos. Las placas para conducción eléctrica y distribución de flujo se construyeron de grafito, a pesar de que no tiene un futuro promisorio por ser frágil, costoso, voluminoso y de difícil maquinado [Philip, *et al.*, 1999]; sin embargo, para fines de investigación cumple bien su función. El diseño de las placas de distribución y de los canales de flujo se realizó usando el criterio de interdigitación, lo que garantiza un mejor contacto entre los reactivos y los catalizadores [Yi y Nguyen, 1999], y por conveniencia, en el maquinado se usó una forma circular. Finalmente, para darle protección a las placas distribuidoras y a la vez facilitar las conexiones eléctricas y el control de temperatura, todo el montaje anterior se coloca entre dos placas de cobre, como se puede apreciar en la figura 2.

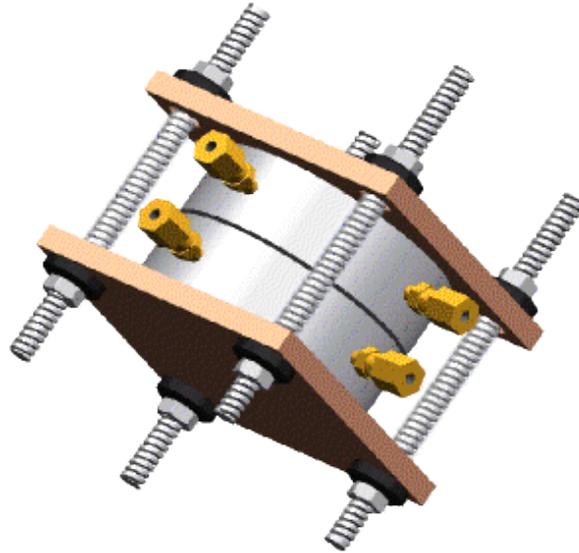


Fig. 2. Celda de combustible ensamblada, en la que se pueden apreciar los platos distribuidores circulares con entradas y salidas de reactivos, y los colectores de cobre.

En la figura 3 se muestra un despiece de la celda de combustible completa.

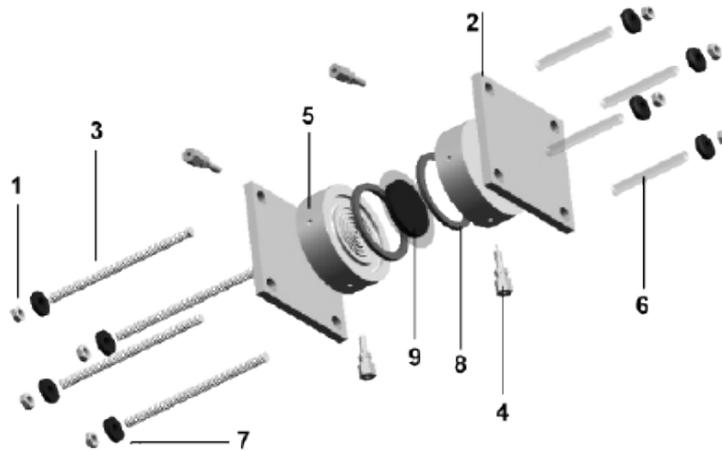


Fig. 3. Despiece de la celda de combustible construida en el laboratorio. 1. Tuercas. 2. Placas o carcasas de cobre. 3. Tornillos. 4. Racores para mangueras. 5. Placas distribuidoras de grafito con canales de flujo interdigitados. 6. Tubos aislantes eléctricos. 7. Arandelas aislantes. 8. Empaquetaduras. 9. Ensamble electrodo membrana (EEM).

Para determinar el desempeño de la CC con cada uno de los EEM se obtuvieron curvas de polarización voltaje contra densidad de corriente, por medio de una unidad de carga electrónica manual (Electrochem Inc. MTS 150). Se estudió el efecto de la temperatura en tres niveles: 40, 50 y 60 °C, y de la concentración del etanol en tres niveles: 1, 2 y 3 M. Se fijaron los flujos de etanol y del oxígeno (aire atmosférico), el etanol se bombeó mediante una bomba peristáltica, mientras que el flujo de aire se

estableció con un compresor y la presión se controló mediante una unidad de manejo de gases. En los casos del propano y del metano sólo se estudió el efecto de la temperatura en tres niveles: 30, 50 y 70 °C. La presión de salida, tanto de O₂ como de combustible, se mantuvo en 10 psi. Antes de la entrada de los gases a la celda se pasaron por dos humidificadores, los cuales fueron alimentados con agua destilada de forma permanente.

Resultados

Catalizadores etapa 1

Se realizaron pruebas de voltametría cíclica sobre las diferentes aleaciones y sobre los metales puros depositados sobre carbón, en ausencia y presencia de etanol, con H₂SO₄ como electrólito soporte.

En la figura 4 se presenta la respuesta del electrodo de platino puro con etanol, y sin él. Se observa claramente la gran disminución en las corrientes de adsorción-desorción de hidrógeno por efecto de la presencia de etanol, lo que indica una gran adsorción del alcohol en platino. Por otra parte, se ve la gran actividad catalítica del platino hacia la oxidación del etanol. Se muestra el carácter irreversible de la reacción de oxidación del etanol sobre el platino. Se observa la aparición de una corriente anódica (oxidación) en el barrido positivo, y en el barrido negativo aparece de nuevo una corriente anódica, sin aparición alguna de picos de reducción.

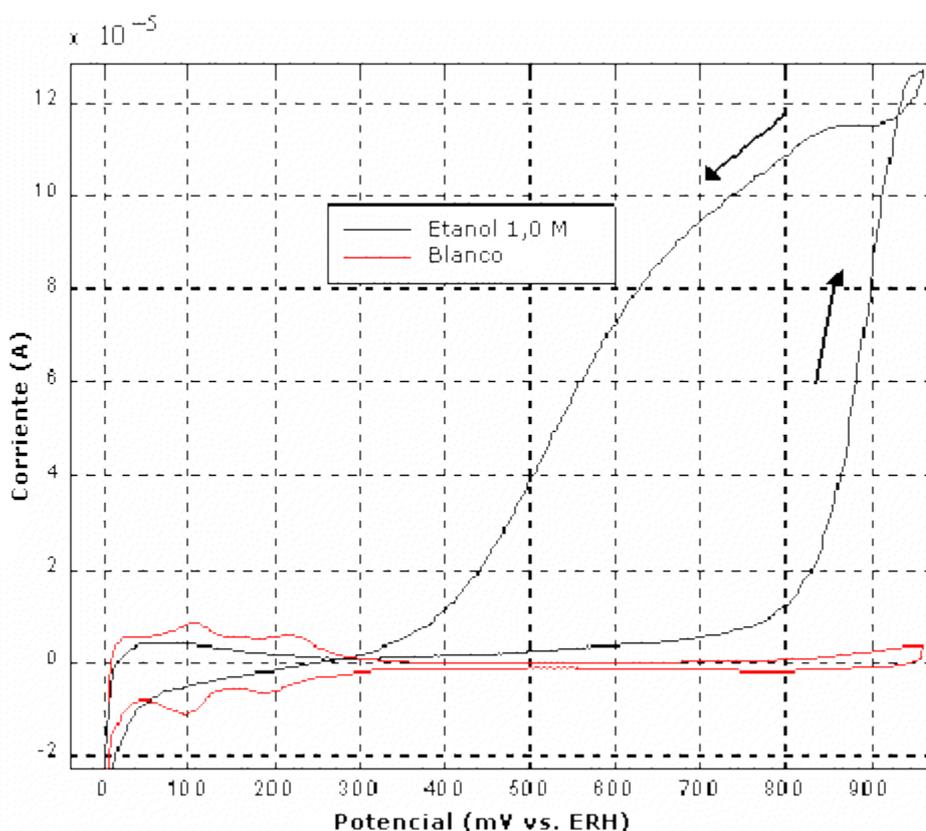


Fig. 4. Voltamograma cíclico de Pt puro a 0,01 V/s, con etanol y sin él, 1,0 M y en H₂SO₄ 1,0 M y 25 °C.

La formación de dióxido de carbono será considerable a potenciales por encima de 800 mV; debido a esto, la pendiente de la curva aumenta notablemente alrededor de este potencial. Lo anterior coincide con un incremento considerable de corriente causado por la formación de óxidos sobre la superficie del platino y que puede evidenciarse en la curva, en ausencia de etanol, presentada en la figura 4; estos óxidos son los que permiten la oxidación total del etanol.

La aparición de las reacciones de formación de acetaldehído y de dióxido de carbono ha sido confirmada en otras investigaciones [Schmidt, *et al.*, 1996]. Por combinación de voltametría cíclica con espectrometría de masas en línea, se determinó que a una velocidad de barrido de 0,01 V/s la formación de acetaldehído comenzaba a 0,43 V, y la de dióxido de carbono a 0,5 V. Se confirmó que la formación de dióxido de carbono se da de manera considerable por encima de 0,8 V.

Las pruebas realizadas sobre M/C mostraron que sólo el iridio presenta una ligera adsorción del etanol. Ninguno de los cuatro metales tiene actividad catalítica hacia la oxidación del etanol.

Para Ir/C las pruebas muestran que en presencia de etanol aparece una ligera disminución en la corriente de adsorción-desorción de hidrógeno (Fig. 5), lo cual indica que ocurre adsorción de etanol sobre Ir.

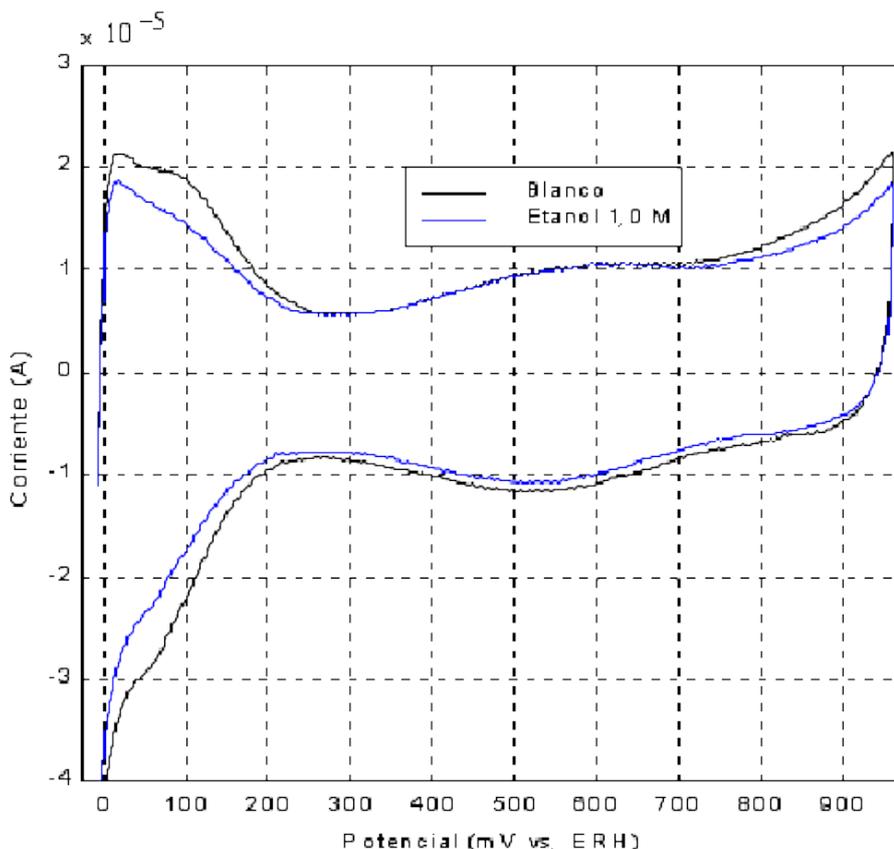


Fig. 5. Voltamograma cíclico del electrodo de Ir/C a 0,1 V/s con etanol y sin él, 1,0 M en H_2SO_4 1,0 M a 20 °C.

En esta figura se observa claramente que el iridio no presenta corrientes de oxidación del etanol; es decir, no tiene actividad electrocatalítica para el etanol, lo que es contrario a los resultados de otra investigación [Tacón, *et al.*, 1994], en la cual se muestra que el etanol reacciona sobre la superficie del iridio si se emplea en forma de alambre. Este hecho puede deberse a que el comportamiento del iridio depositado es diferente al del iridio masivo, específicamente el iridio en el catalizador depositado podría estar presente en gran proporción como óxidos, gran parte de ellos de carácter irreversible [Ureta-Zañartu, *et al.*, 1998], los cuales no permiten que el etanol reaccione.

Voltamogramas semejantes al presentado en la figura 5 se obtuvieron para Os/C, Ru/C y Sn/C. En ellos se pudo apreciar la no existencia de corrientes de oxidación de etanol. Una curva típica de adsorción de hidrógeno para Os (semejante a las curvas para Ru y Sn soportados en carbón) se muestra en la figura 6.

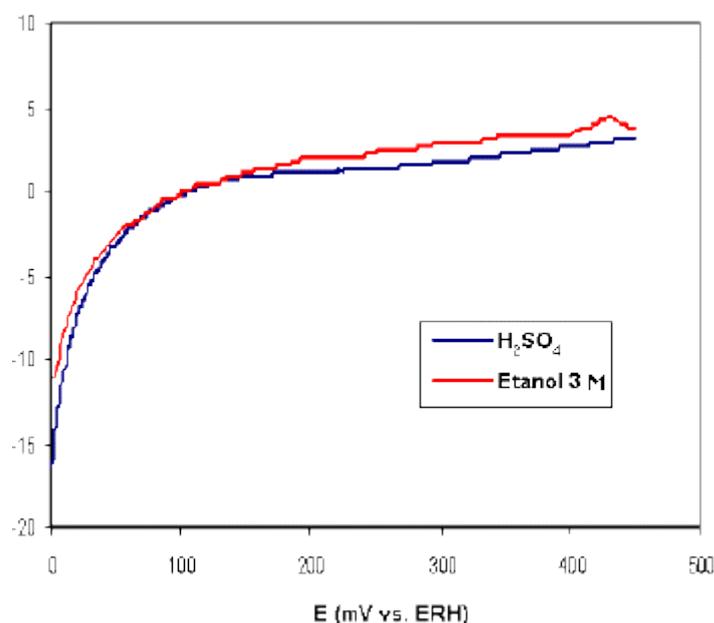


Fig. 6. Corriente de adsorción de hidrógeno ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) a 0,1 V/s y 25° C para Os/C en ausencia y presencia de etanol.

No se observa una diferencia apreciable en el voltamograma para esta región ante la presencia del alcohol, por lo que se puede decir que no hay adsorción de etanol en el osmio (igual para rutenio y estaño).

De la figura 5 (y otras semejantes) se pudo determinar que los metales M forman especies oxidadas en zonas de potencial por debajo del de oxidación del platino, 800 mV; esto explica por qué disminuye el envenenamiento del platino, lo que permite que la oxidación de etanol comience a potenciales más bajos que los del platino solo. Este potencial de inicio junto con la corriente de intercambio y la actividad catalítica son indicadores del comportamiento de la aleación en estudio.

El estudio cinético de la oxidación de etanol se realizó por voltametría cíclica, se determinaron las constantes de velocidad y el potencial de inicio. A continuación se muestran los resultados más representativos de este análisis.

Curvas típicas se muestran en las figuras 7, 8 y 9 para la aleación Pt90Ir10. En la figura 7 se puede observar que el potencial de inicio de la reacción está alrededor de 280 mV, mucho menor que para platino puro (ver Fig. 4), que está alrededor de 800 mV. La figura 8 representa una curva de actividad catalítica, en la que se aprecia el efecto de la temperatura en las corrientes de oxidación. La figura 9 representa la actividad catalítica comparativa de varios electrodos Pt-Ir; este comportamiento se observó con todas las aleaciones Pt-M, el platino evidencia ser mucho más activo que todas las mezclas platino-M en potenciales por encima de 850 mV, lo que puede deberse a que por encima de 800 mV se forman las especies oxigenadas de platino, que contribuyen a la oxidación del CO.

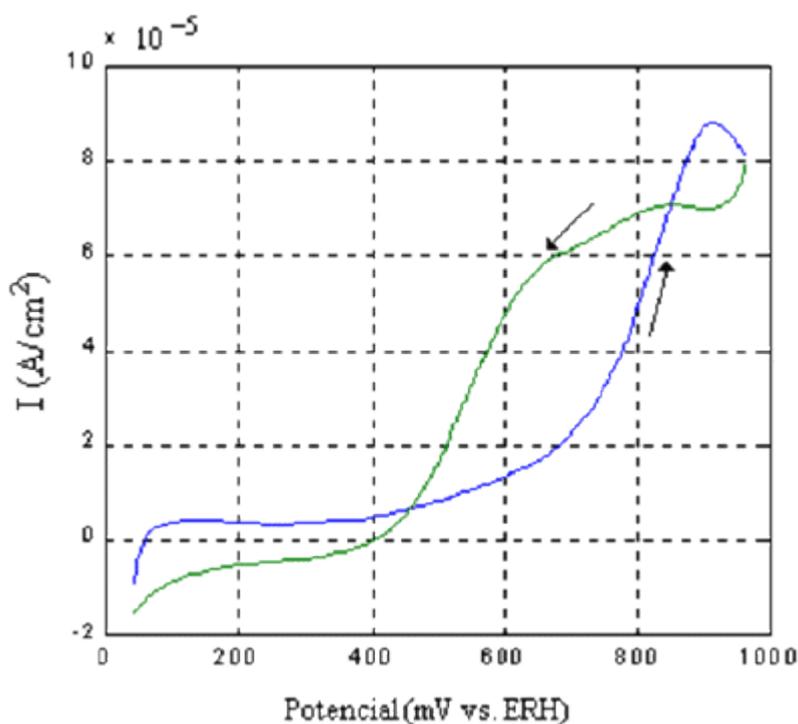


Fig. 7. Voltametría cíclica de etanol 1,0 M en Pt₉₀Ir₁₀ a 0,01 V/s en H₂SO₄ 1,0 M y 25 °C.

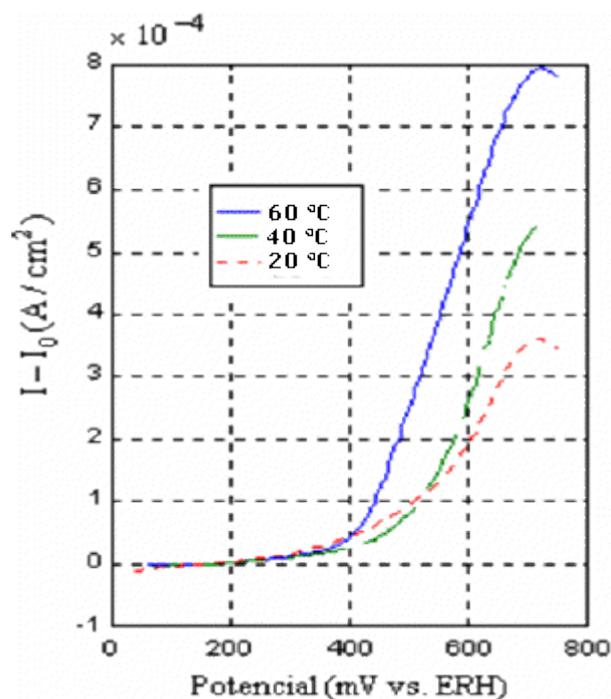


Fig. 8. Actividad catalítica para etanol a diferentes temperaturas sobre $Pt_{90}Ir_{10}$ en H_2SO_4 1,0 M y etanol 5,0 M.

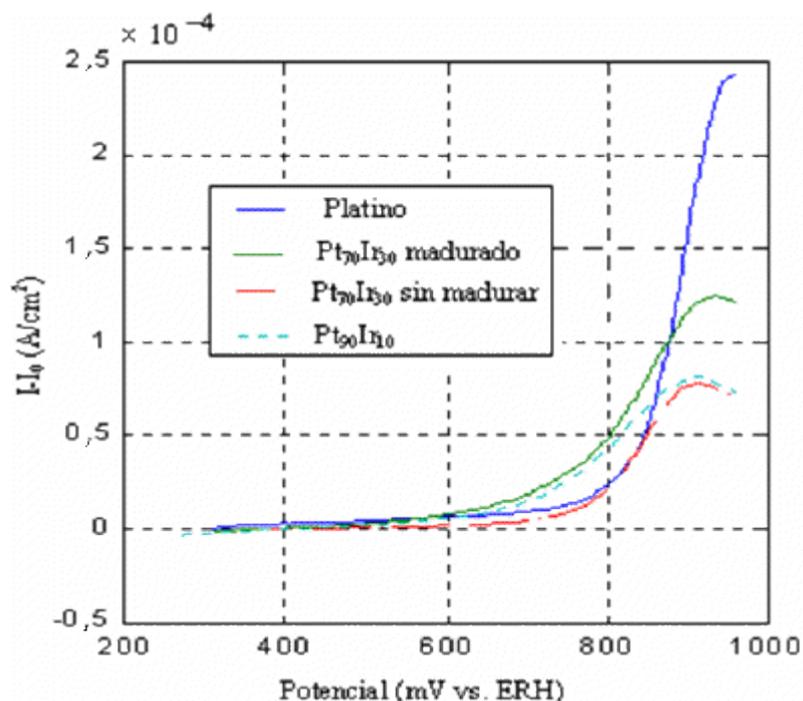


Fig. 9. Actividad catalítica de los diferentes electrodos en etanol 1,0 M, H_2SO_4 1,0 M y 20 °C a 0,01 V/s.

En la tabla 2 se presenta un resumen de los parámetros cinéticos hallados para los electrodos más representativos de cada par Pt-M y para platino puro soportado en carbón.

Tabla 2. Coeficiente de simetría, constante de velocidad estándar, potencial de inicio en etanol 1,0 M en H₂SO₄ 1,0 M y 25 °C

| Aleación | α | k^0 , cm/s | Vinicio, mV |
|-----------------------------------|----------|----------------------|-------------|
| Pt/C | 0,984 | $8,25 \cdot 10^{-5}$ | 687 |
| Pt ₅₀ Sn ₅₀ | 0,83 | $2,62 \cdot 10^{-7}$ | 43 |
| Pt ₉₀ Ru ₁₀ | 0,835 | $4,64 \cdot 10^{-6}$ | 323 |
| Pt ₉₀ Ir ₁₀ | 0,960 | $5,32 \cdot 10^{-7}$ | 280 |
| Pt ₉₀ Os ₁₀ | 0,48 | $1,3 \cdot 10^{-9}$ | 370 |

En la figura 10 se observa el comportamiento de las aleaciones Pt-Sn; puede verse el potencial de inicio en valores alrededor de 50 mV y la gran actividad catalítica de la aleación 50-50.

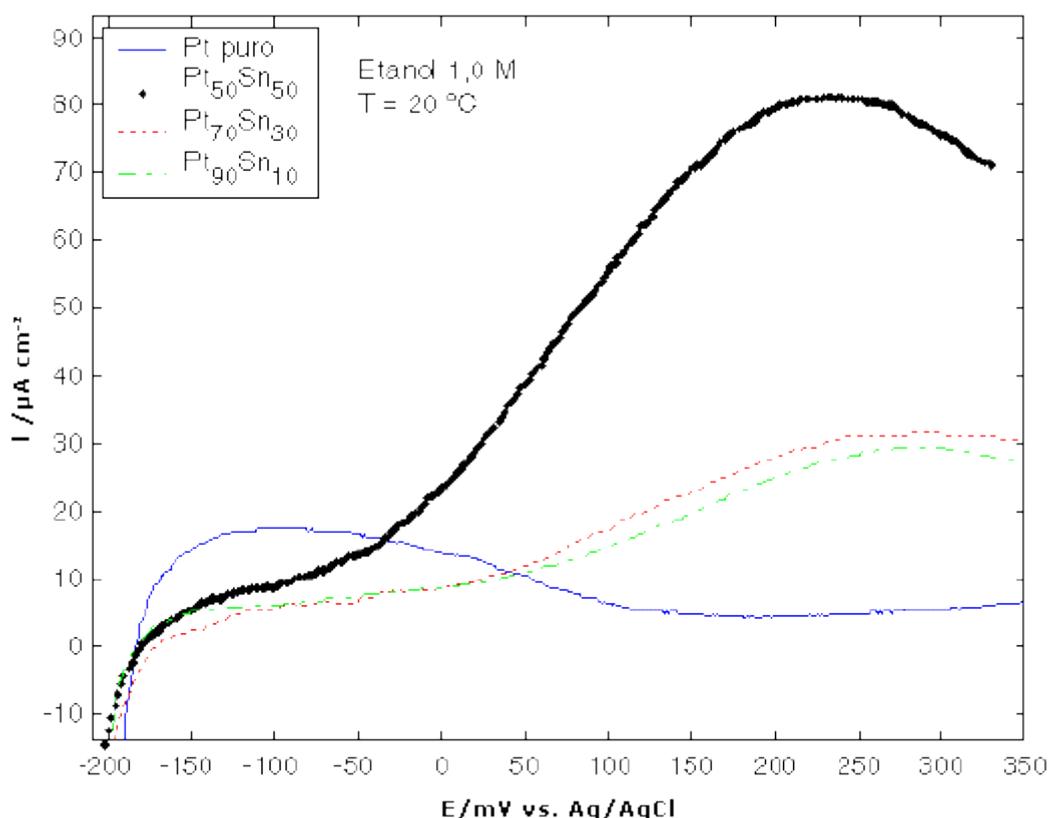


Fig. 10. Voltamograma para la oxidación de etanol sobre el Pt/C y catalizadores Pt_x-Sn_y/C en H₂SO₄ 1M.

Pruebas en celda de combustible

De los mejores catalizadores para etanol, de la etapa anterior, se han probado en la celda de combustible las aleaciones Pt₉₀Ir₁₀ y Pt₉₀Ru₁₀. El proceso de fabricación de los electrodos de difusión y del EEM es la clave principal para el buen desempeño de una celda de combustible polimérica. Los resultados obtenidos no fueron los mejores, lo que obligó a revisar todas las etapas del proceso de fabricación de electrodos y EEM, que permitió detectar una serie de posibles inconvenientes que están en fase de superación.

A continuación se presentan, para etanol, los resultados obtenidos con la aleación $Pt_{90}Ru_{10}$. En la figura 11 se muestran las curvas de comportamiento voltaje contra densidad de corriente realizadas en varias condiciones de temperatura. La respuesta es la esperada, tanto por la dependencia de la temperatura como por las diferentes zonas que aparecen. Sin embargo, del análisis de las curvas se puede afirmar que la celda presentó una permeación muy grande de etanol, pues las diferencias de potencial fueron muy bajas. Por otra parte, se presentó un comportamiento resistivo enorme, lo cual puede deducirse de la pendiente en la zona lineal. Lo anterior obligó a redefinir el proceso de fabricación de electrodos y EEM.

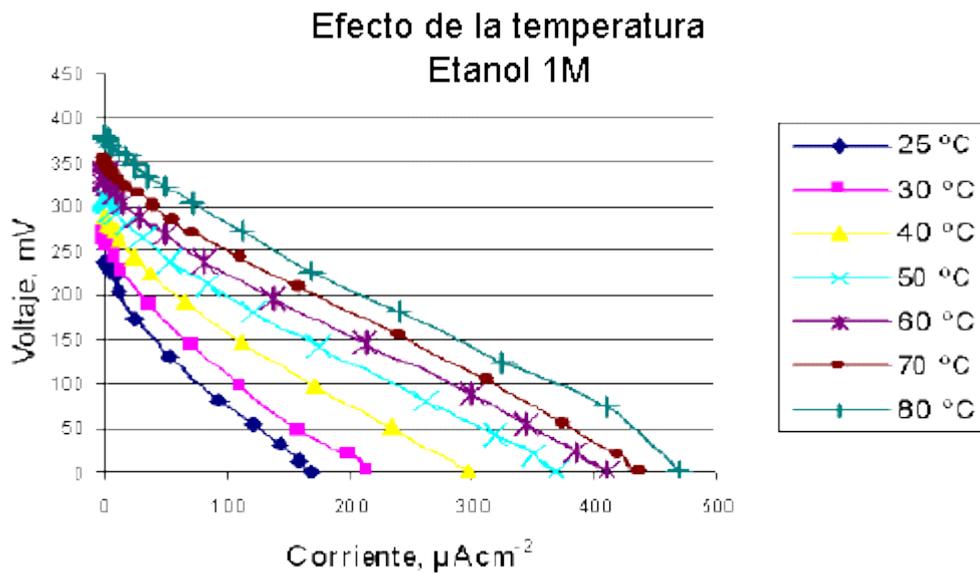


Fig. 11. Curvas voltaje-densidad de corriente para la CC polimérica con ánodo $Pt_{90}Ru_{10}$ soportado en Vulcan XC-72, alimentada con etanol 1M.

En la figura 12 se muestra el comportamiento potencia contra densidad de corriente. Las curvas halladas son típicas del comportamiento de una celda de combustible; sin embargo, las potencias logradas son muy pequeñas todavía.

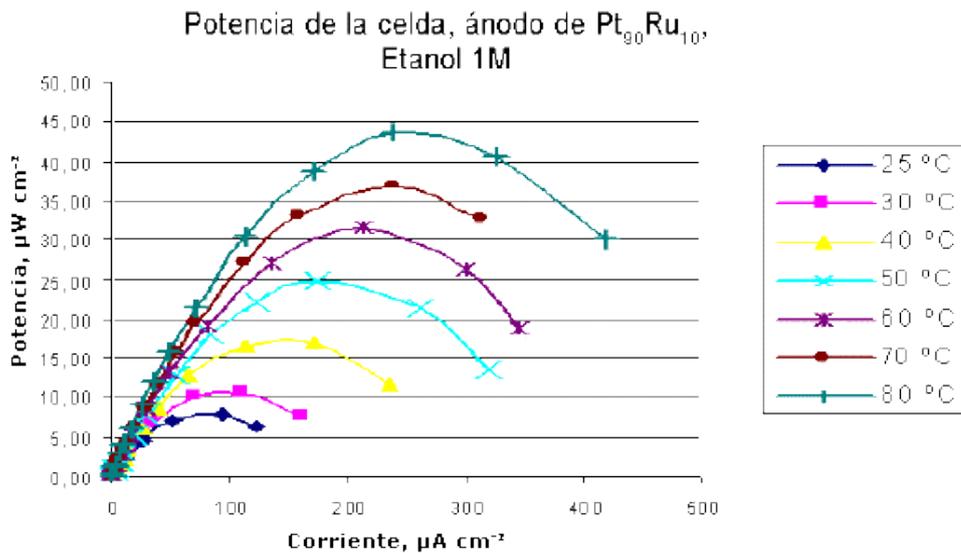


Fig. 12. Curvas potencia-densidad de corriente para la CC polimérica con ánodo Pt₉₀Ru₁₀ soportado en Vulcan XC-72, alimentada con etanol 1M.

Las figuras 13 y 14 presentan los resultados obtenidos para propano y metano a 30 °C. Para estos gases el proceso de fabricación de los electrodos y el EEM tuvieron modificaciones basadas en las experiencias anteriores para etanol, y se tomaron en cuenta recomendaciones de bibliografía reciente [Antolini, 2004].

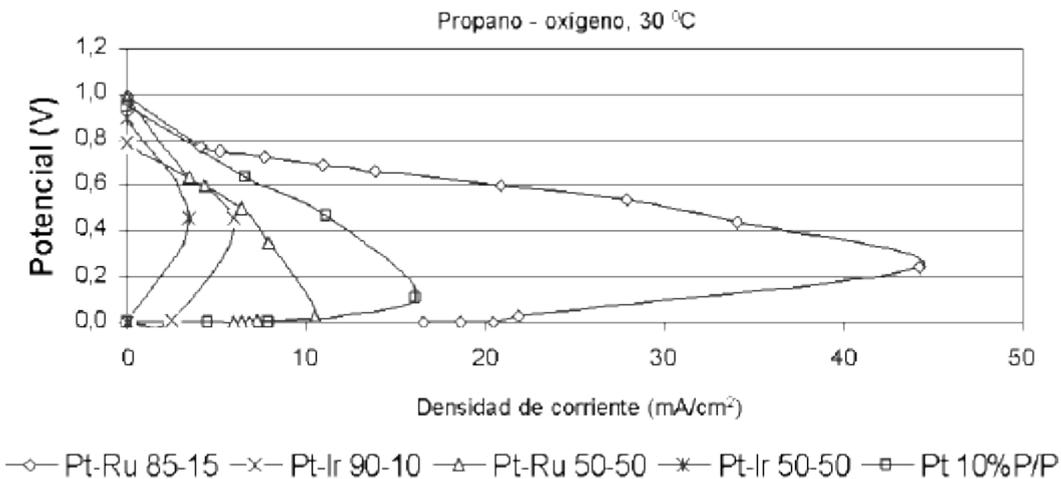


Fig. 13. Desempeño comparativo de los diferentes ánodos a 30 °C para la oxidación de propano en la celda de combustible.

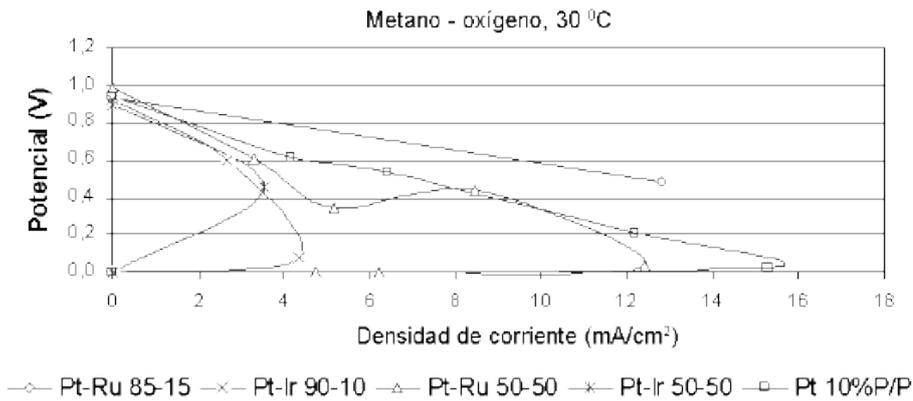


Fig. 14. Desempeño comparativo de los diferentes ánodos a 30 °C para la oxidación de metano en la celda de combustible.

Puede observarse que los voltajes en circuito abierto están próximos a 1 V, lo que permite afirmar que no hubo permeación de los gases a través de la membrana; el comportamiento resistivo de los EEM mejoró bastante con respecto a las construidas antes para etanol, aunque aún no es el mejor, y finalmente puede verse que las curvas corriente-potencial tienen un comportamiento errático, principalmente en los potenciales más bajos, condición que corresponde a carga grande para las CC; consideramos que esto se debió a un control deficiente de la temperatura de los humidificadores.

Conclusiones

Tanto el rutenio como el osmio y el estaño, soportados en carbón, no presentan ninguna actividad para la adsorción y oxidación de etanol, por lo que se puede concluir que la adsorción de etanol sólo se presenta en los átomos de platino. Para el iridio sólo aparece una ligera adsorción de etanol. Ninguno de los metales soportados sobre carbón (Ru, Ir, Os y Sn) presenta actividad catalítica para la oxidación de etanol en las condiciones de este estudio.

Las mezclas alrededor de Pt₉₀Os₁₀, Pt₉₀Ir₁₀, Pt₉₀Ru₁₀, y Pt₅₀Sn₅₀ muestran la mayor actividad catalítica; entre éstas, la mejor es Pt₅₀Sn₅₀, que tiene un potencial de inicio alrededor de 50 mV contra ERH, en tanto que las otras dos están alrededor de 300 mV.

En la región de altos sobrepotenciales el platino puro se comporta mejor que todas las aleaciones estudiadas. De acuerdo con lo anterior, los catalizadores estudiados serán útiles sólo en dispositivos que operen con densidades de corriente no muy altas.

Se logró desarrollar un proceso de construcción de una celda de combustible: fabricación y caracterización de catalizadores y ánodos bimetálicos, ensamble electrodo membrana, diseño de placas de distribución de flujo. Estos procesos deben mejorarse. El desarrollo de esta tecnología limpia es costoso; sin embargo, es promisorio en el mediano plazo.

Agradecimientos

Este trabajo se pudo realizar gracias a la financiación de la Dirección de Investigaciones Sede Medellín (DIME, código 030805579) de la Universidad Nacional de Colombia y a Sena-Colciencias (código 1118-06-12474).

Bibliografía

- ANTOLINI, E. *J. of Applied Electrochemistry*. 34: 563-576, 2004.
- BINDER, H.; A. KOHLING Y G. SANSTEDE. *From Electrocatalysis to Fuel Cells*. Seattle: G. Sanstede, editor, 1972. pp. 43-58.
- FUJIWARA, N.; K. A. FRIEDRICH Y U. STIMMING. *J. Electroanal. Chem.* 472: 120-125, 1999.
- LAMY, C.; E. M. BELGSIR Y M. LEGER. *J. Applied Electrochem.* 31: 799-809, 2001.
- LANELLO, R.; V. M. SCHMIDT, A. RODRÍGUEZ Y E. PASTOR. *J. Electroanal. Chem.* 471: 166, 1999.
- LIU, L.; C. PU, R. VISWANATHAN, Q. FAN, R. LIU Y E. S. SMOTKIN. *Electrochimica Acta*. 43: 3657-3663, 1998.
- MOREIRA, J.; A. L. OCAMPO, P. J. SEBASTIÁN, M. A. SMITH, M. D. SALAZAR, P. DEL ÁNGEL, J. A., MONTOYA, R. PÉREZ Y L. MARTÍNEZ. *International journal of hydrogen energy*. 625-627, 2003.
- OLIVEIRA, A.; M. J. GIZ, J. PÉREZ, E. A. TICIANELLI Y E. R. GONZÁLEZ. *J. Electrochem. Soc.* 149: A272-A279, 2002.
- OROZCO, G. Y C. GUTIÉRREZ. *J. Electroanal. Chem.* 484: 64, 2000.
- PARK, S.; C. RADU, J. M. VOHS, R. J. GORTE. *J. Electrochem. Soc.* 146: 3603-3605, 1999.
- PASSALACQUA, E.; F. LUFRANO, G. SQUADRITO, A. PATTI Y L. GIORGI. *Electrochimica Acta*. 46: 799-805, 2001.
- PHILIP, L.; J. HENTALL, B. LAKEMAN, G. O. MEPSTED, P. L. ADCOCK Y J. M. MOORE. *Journal of Power Sources*. 80: 235-241, 1999.
- PYLE, W.; A. SPIVAK, R. CORTEZ Y J. HEALY. *Home Power*. 35: 42-48, 1993.
- SAVADOGO, O. Y F. J. VARELA. *J. of New Materials for Electrochemical Systems*. 4: 93-97, 2001.
- SCHMIDT, V.; R. IANNELLO, E. PASTOR Y S. GONZÁLEZ. *J. Phys. Chem.* 100: 17901-17908, 1996.
- TACCONI, N. R.; R. O. LEZNA, B. BADEN, F. HANH Y C. LAMY. *J. Electroanal. Chem.* 379: 329-337, 1994.
- URETA-ZAÑARTU, M.; C. YÁÑEZ, G. REYES, J. R. GANCEDO Y J. F. MARCO. *J. Solid State Electrochem.* 2: 191-197, 1998.
- URETA-ZAÑARTU, M.; C. YÁÑEZ, M. PÁEZ Y G. REYES. *J. Electroanal. Chem.* 405: 159, 1996.
- YI, J. S. Y T.V. NGUYEN. *J. Electrochem. Soc.* 146: 38-45, 1999.
- ZHIGANG, Q. Y A. KAUFMAN. *Journal of Power Sources*. 21-31, 2003.

Análisis térmico de un tubo absorbedor compuesto

Thermal Analysis of An Absorbing Compound Tube

Alejandro Torres¹, Raúl Lugo¹, Juan M. Zamora¹ y Javier Gutiérrez²

¹ Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, México, D.F. CP 09340.

Tel.: 5804-4645. Fax: 5804-4900.

e-mail: ata@xanum.uam.mx

² Tecnológico de Acapulco, Departamento de Metalmeccánica, Laboratorio de Electromecánica, México.

Resumen

Una alternativa, en el corto plazo, en la generación de potencia de plantas térmicas solares es la generación directa de vapor, pero en este momento presenta problemas de flexiones en las paredes del tubo absorbedor, producidas por los gradientes de temperatura; esto provoca que el tubo de cristal que rodea el absorbedor se fracture y se elimine la presión de vacío que eficientiza la generación de vapor. Este trabajo presenta un análisis térmico mediante la simulación numérica del tubo absorbedor en estado estable y transitorio, que describe los carbonos activados de temperatura en la dirección radial y angular del tubo absorbedor durante el cambio de fase, en concentradores solares de canal parabólico. El tubo absorbedor consta de dos tubos concéntricos, de cédula comercial, de materiales cobre y acero, que forman una pared compuesta de cobre (20 %) y acero (80 %). En el análisis de resultados se encontró que el arreglo propuesto del tubo compuesto mejora satisfactoriamente el comportamiento térmico del tubo absorbedor, y reduce en 50 % la diferencia máxima de temperaturas en el tubo absorbedor con respecto a la que presentan los tubos de acero. Se muestran gradientes térmicos del orden de 200 a 300 °C/m, en la región cercana a la interfase líquido-vapor para el tubo absorbedor de acero, siendo esta la razón de los problemas mecánicos tan severos en los tubos absorbedores.

Palabras clave: Plantas térmicas solares, análisis térmico

Abstract

A short-term choice in power generation from solar thermal plants is the direct steam generation, but at present, problems of flexion of the absorbing tube walls are being confronted, caused by temperature gradients, resulting in the fracture of the glass tube surrounding the absorbing device with the related result of losing the vacuum pressure which makes more efficient the steam generation. This paper presents a thermal analysis through numeric simulation of the absorbing tube in transitory stable state, describing temperature profiles in radial and angular radiation of the absorbing tube during the phase change, in solar concentrators of parabolic channel. The absorbing tube has two

concentric tubes of commercial certificate, made of copper and steel, forming a complex wall of copper (20%) and steel (80%). In the analysis of the results, it was found that the proposed arrangement of the compound tube, satisfactorily improves the thermal behavior of the absorbing tube, thus reducing 50% of the maximum difference of temperatures in the absorbing tube in relation to what is observed in the steel tubes. Thermal gradients are seen in the order of 200 to 300 °C/m, in the region near the liquid-vapor interface for the absorbing tube of steel, causing such a severe mechanic problems in absorbing tubes.

Keywords: Solar thermal plants, thermal analysis

Introducción

Las plantas termosolares presentan problemas en el intercambio de energía a través de un fluido térmico utilizado en el intercambiador de calor, donde se transfiere la energía absorbida al fluido de trabajo (agua). Entre los principales problemas se destacan los siguientes: caídas de presión importantes en el intercambiador de calor, temperaturas de operación bajas por la limitante en la temperatura de ebullición del aceite térmico y bajas eficiencias en el proceso del proceso global. Una propuesta para reducir costos en la generación de potencia en plantas termosolares consiste en emplear la generación directa de vapor en concentradores de canal parabólico.

Esto motiva nuestro interés en realizar un estudio encaminado a mejorar el diseño de tubos absorbedores, para que sean empleados en plantas termosolares. Relacionados con este aspecto, son los gradientes circunferenciales de temperatura mostrados por algunos experimentos de laboratorio, que muestran que la diferencia de temperatura entre la parte baja y la parte alta del tubo absorbedor, cuando se tiene un flujo de radiación solar reflejada a la pared que se halla en contacto con la interfaz del fluido en flujo estratificado, puede ser del orden de 60 °C a una presión de 60 bar, manteniendo la parte alta más caliente que la parte baja. Mientras que al mediodía la diferencia de temperatura puede ser alrededor de 9 °C, con una presión de 30 bar, estando la parte baja más caliente que la parte alta debido a que la radiación es reflejada en mayor proporción hacia la pared que se encuentra en contacto con la fase líquida del agua. Almanza, *et al.* [1999] han estudiado, bajo diferentes consideraciones experimentales del receptor de los canales parabólicos, con DSG [Steinmann y Goebel, 1998]. Cuando se alimentó agua fría en el tubo receptor de acero ($f = 2,54$ cm), se generó una deflexión en los tubos absorbedores. Esta curva avanzó como una onda desde el extremo de entrada hasta el de salida, teniendo una deflexión aproximadamente de 6,5 cm en el centro de cada sección (2,9 m de longitud), en el módulo de canal parabólico (14,5 m de largo entre 40 y 60 °C en la dirección circunferencial).

Almanza [Almanza, *et al.*, 1999] ha investigado la influencia de los gradientes de temperatura en la sección de evaporación en un tubo absorbedor de un concentrador de canal parabólico y propone una solución para disminuir los gradientes de temperatura, que consiste en

incorporar un tubo de cobre dentro del tubo absorbedor para mejorar la transferencia de calor en la pared del tubo, reduciendo los esfuerzos térmicos a un nivel aceptable. En este trabajo se retoma la propuesta de Almanza y se efectúa un análisis paramétrico para evaluarla con mayor detalle, bajo condiciones de estado estacionario y transitorio del sistema, y una proporción de cobre de 20 % en la pared compuesta, a diferencia de 33 % propuesto por Almanza, que resulta ser más costosa de implantar.

Patrones de flujo en tubos horizontales

Existen seis patrones de flujo que dependen de las velocidades superficiales de las fases líquido y vapor dentro de tubos horizontales e inclinados. Los patrones de flujo observados en flujo en dos fases son complicados por la asimetría de las fases resultantes y por la influencia de la gravedad. Los flujos patrón generalmente aceptados son mostrados en la figura 1.

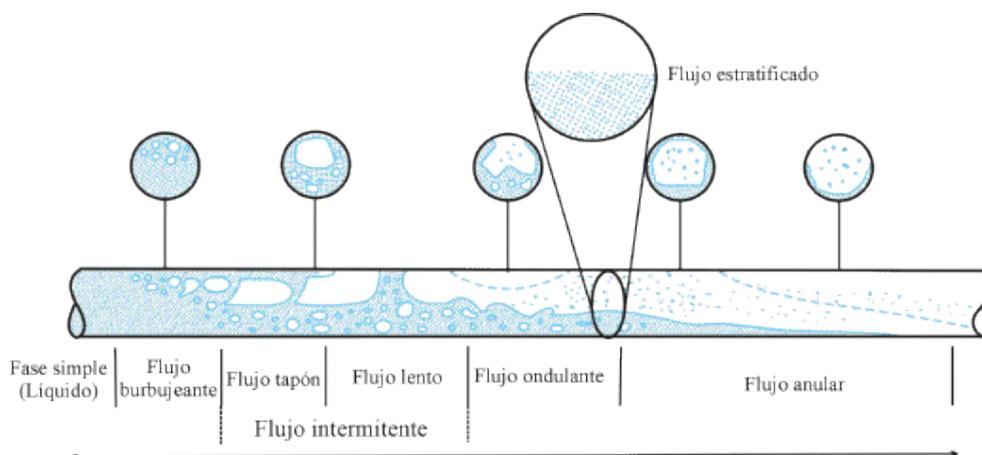


Fig. 1. Patrones de flujo en tubos horizontales.

Descripción de los tipos de flujo en tubos horizontales

- a) Flujo burbujeante: Este flujo patrón es similar al flujo vertical, excepto en que las burbujas de vapor tienden a viajar en la pared superior del tubo, lo que ocurre a velocidades moderadas en las fases líquido y vapor.
- b) Flujo tapón: Es similar al flujo lento en la dirección vertical; otra vez el tren de burbujas de gas viaja en la pared superior del tubo.
- c) Flujo estratificado: Este patrón sólo ocurre a velocidades muy bajas del líquido y el vapor. Las dos fases del flujo están separadas por una pequeña interfase.
- d) Flujo ondulante: En este, la velocidad del vapor aumenta en la interfase debido a la distribución de las ondas que viajan en la dirección del flujo.
- e) Flujo lento: Hay un nuevo incremento en la velocidad del vapor, causado por las ondas en la interfase que están estancadas y forman un frente de flujo lento, el cual está propagado a altas velocidades a lo largo del canal. La superficie superior del tubo detrás de las ondas es

mojada por una capa residual, la cual desemboca dentro de la velocidad del bulto del líquido.

f) Flujo anular: Una gran velocidad desarrollada de vapor resultará en la generación del gas con la parte central del perfil puede contener unas gotas de líquido, así como en la periferia del tubo. El flujo puede no ser continuo alrededor del inicio del perfil, en la parte inferior del tubo.

Modelo matemático

El modelo matemático se conforma a partir de un análisis de transferencia de calor en un tubo absorbedor de pared compuesta bimetálica, y otro de pared de un solo material para un concentrador de canal parabólico, como se muestra en la figura 5, por medio del método de diferencias finitas en su versión nodal; para el planteamiento del problema se exponen las siguientes consideraciones:

- Flujo de calor bidimensional en estado estacionario a través de la pared del tubo concentrador.
- Flujo bifásico (líquido-vapor) en el interior del tubo concentrador.
- Flujo de radiación homogénea.
- Plano de simetría axial.
- Materiales anisotrópicos.

Sujetas a las siguientes condiciones de frontera, éstas son mostradas en la figura 2:

$$\begin{cases} \theta=0 \\ \theta=\pi \end{cases} \quad \text{en} \quad \frac{\delta T}{\delta \theta} = 0 \quad (1)$$

$$r=R \quad \text{en} \quad -k \frac{\delta T}{\delta r} = q'' \quad (2)$$

$$\begin{cases} r=0 \\ 0 \leq \theta \leq \pi/2 \end{cases} \quad \text{en} \quad -k \frac{\delta T}{\delta \theta} = h_i(T_i - T_p) \quad (3)$$

$$\begin{cases} r=0, \\ \pi/2 \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad \text{en} \quad k \frac{\delta T}{\delta \theta} = h_g(T_i - T_p) \quad (4)$$

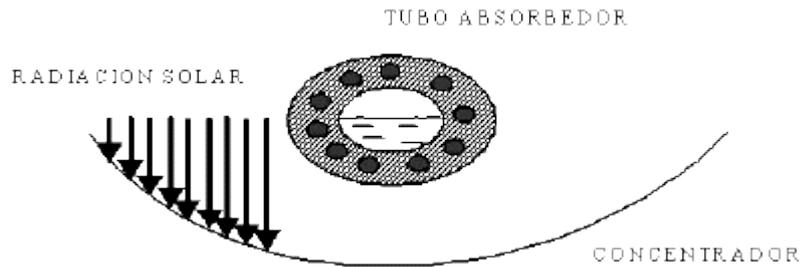


Fig. 2. Posición del sistema en operación.

Haciendo un balance de energía alrededor del nodo interior (m,n), para condiciones bidimensionales, el intercambio de energía está influido por la conducción del nodo (m,n) y sus cuatro nodos contiguos (m, n+1), (m, n-1), (m+1, n) y (m-1, n); considerando que no hay generación de calor, se tiene la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^4 q(i) \rightarrow (m,n) = 0 \quad (5)$$

La distribución de temperaturas en la pared compuesta del tubo para estado estacionario, se rige por la ecuación de calor:

$$\frac{\partial}{\partial r} kr \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} k \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \quad (6)$$

Para el sistema bidimensional en régimen transitorio, la ecuación que se debe resolver es:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} kr \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} k \frac{\partial T}{\partial \theta} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

La solución analítica de este problema es posible; sin embargo, resulta de gran complejidad matemática debido a que las condiciones de frontera incluyen los diferentes materiales empleados. Se emplea un método numérico de discretización de derivadas, en este caso las diferencias finitas, para resolver el problema y se obtiene una solución del modelo.

La pared compuesta por cobre y hierro sirve para soportar los esfuerzos mecánicos producidos por la presión que se genera en el cambio de fase, como muestran los resultados obtenidos en la simulación.

Como uno de los objetivos es el análisis del comportamiento en estado transitorio, resulta necesario obtener las temperaturas iniciales del tubo absorbedor, las cuales se logran empleando las relaciones para el estado estacionario.

El modelo se resolvió utilizando este método, mencionado anteriormente, donde para cada nodo que se muestra en las figuras 3 y 4 se realiza el balance de energía, considerando la posición de cada uno de éstos dentro de la malla, para las que se establecieron las relaciones discretas.

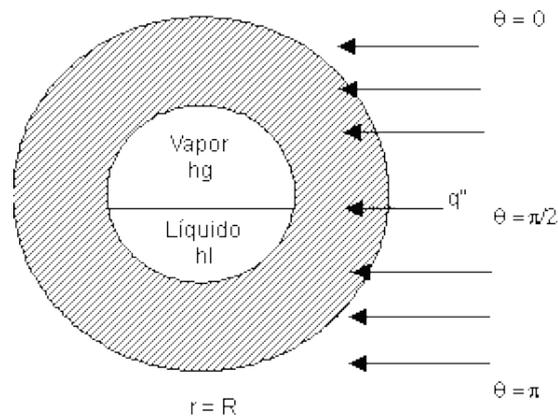


Fig. 3. Corte del tubo absorbedor.

En el análisis térmico del concentrador se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- El material del absorbedor se considera isótropo y linealmente elástico.
- Se tiene en cuenta un tubo absorbedor de acero con superficie interna lisa, cubierto en su parte exterior con una superficie selectiva, con una conductividad térmica de $52 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, densidad de $7\,817 \text{ kgm}^{-3}$ y una capacidad calorífica de $446 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.
- Se utiliza un tubo absorbedor de cobre con superficie interna lisa, cubierto en su parte exterior por el hierro. El cobre posee una conductividad térmica de $401 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, una densidad de $8\,933 \text{ kgm}^{-3}$ y una capacidad calorífica de $385 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.
- El absorbedor de pared compuesta acero-cobre, se dimensiona en dependencia del tamaño de pared que se utilice, respetando los diámetros nominales y las conductividades térmicas utilizadas.
- Se considera una irradiancia media de $I = 1\,800 \text{ Wm}^{-2}$.
- Temperatura de saturación del fluido (agua) 623 K .

Modelo de paredes compuestas

El modelo de paredes compuestas es empleado para resolver el problema de gradientes de temperatura en las paredes del tubo absorbedor desarrollado por Valdés, *et al.* [1998] para sistemas estacionarios.

Bajo las condiciones empleadas, el modelo matemático pronostica un cambio del gradiente de temperatura, así como que los esfuerzos

térmicos son producidos por dicho cambio, resultando el pandeo del tubo absorbedor de cobre-acero (tubo de paredes compuestas), el cual es el fenómeno que se modela en este trabajo.

Este modelo es desarrollado considerando la radiación incidente homogénea. El método de diferencias finitas genera una matriz que contiene la información del sistema en estudio para cada punto o nodo mostrado en la figura 4, con lo cual se resuelven las ecuaciones (6) y (7) de la siguiente manera:

- Se plantean las ecuaciones discretas para cada nodo de la malla de la figura 5.
- Se construye la matriz diagonal que contiene la información del tubo absorbedor.
- Se obtiene la matriz inversa de la matriz diagonal.
- Se encuentran los valores de las temperaturas para los diferentes nodos de la malla.

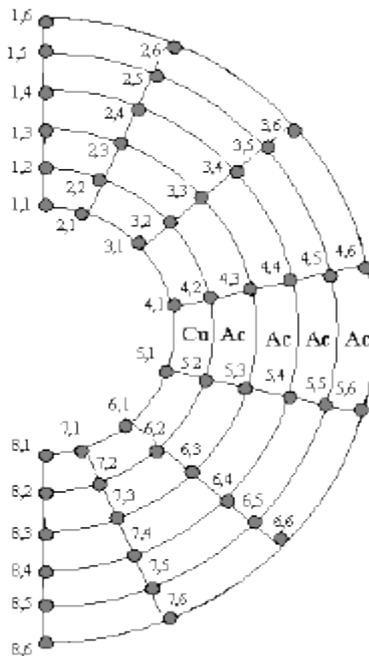


Fig. 4. Nodos del tubo bimetálico.

El análisis numérico se hizo para un tubo absorbedor compuesto de cobre 20 % y acero 80 %. Utilizando las relaciones discretas para el estado estable y transitorio, tomando como base la figura 4, se denota la numeración correspondiente del nodo en estudio, para construir la matriz. La matriz de este sistema de transferencia de calor, para el estado transitorio, se resolvió mediante un método numérico programado en lenguaje Visual Basic, tomando los intervalos de tiempo con las condiciones de estabilidad para sistemas bidimensionales. Algunos de los resultados obtenidos se muestran en las figuras de la 5 a la 15, para ambos tubos absorbedores en estudio.

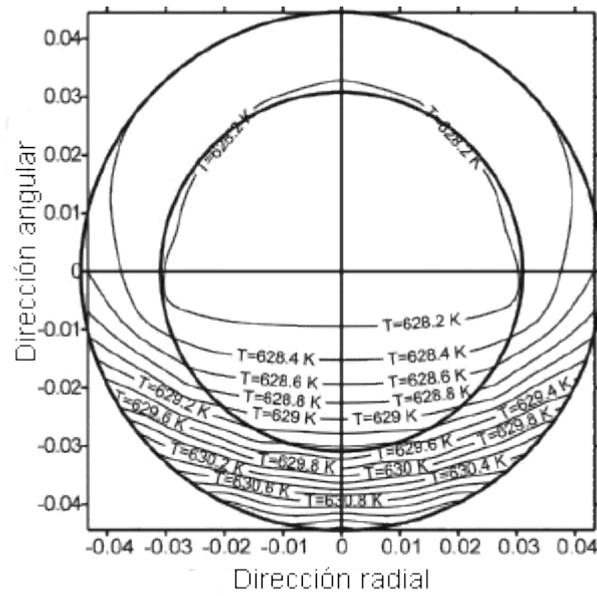


Fig. 5. Distribución de temperatura para el tubo cobre-acero a $t = 0$ s.

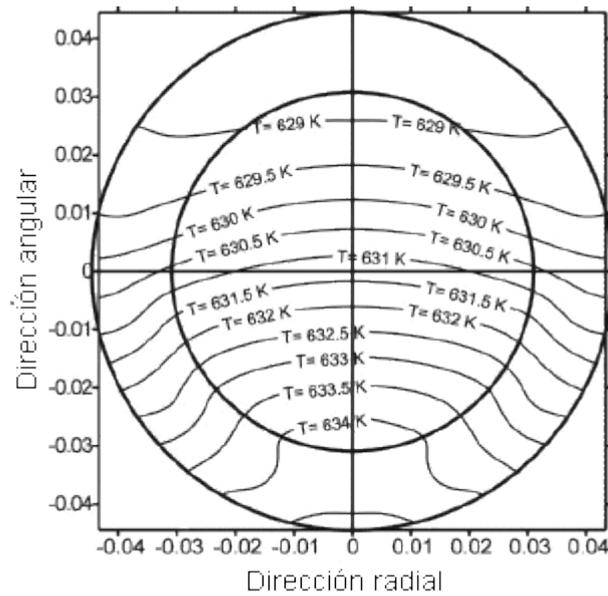


Fig. 6. Distribución de temperatura para el tubo cobre-acero a $t = 10$ s.

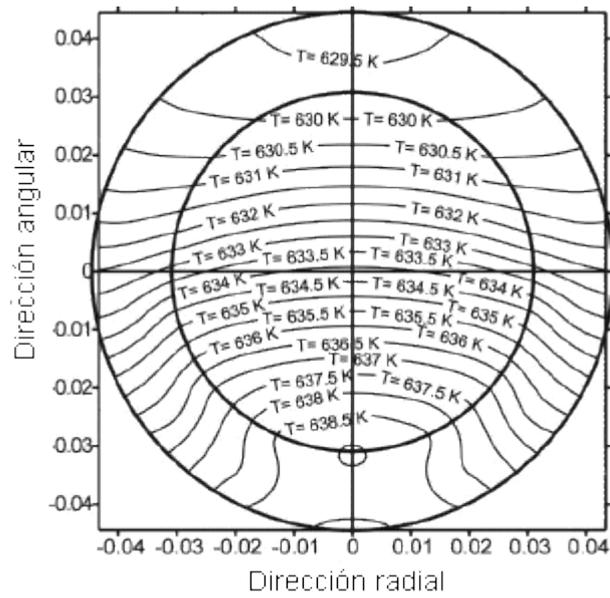


Fig. 7. Distribución de temperatura para el tubo cobre-acero a $t = 20$ s.

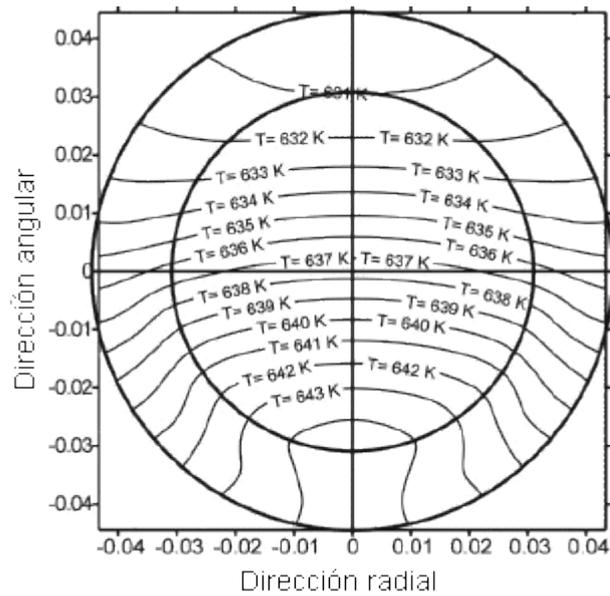


Fig. 8. Distribución de temperatura para el tubo cobre-acero a $t = 30$ s.

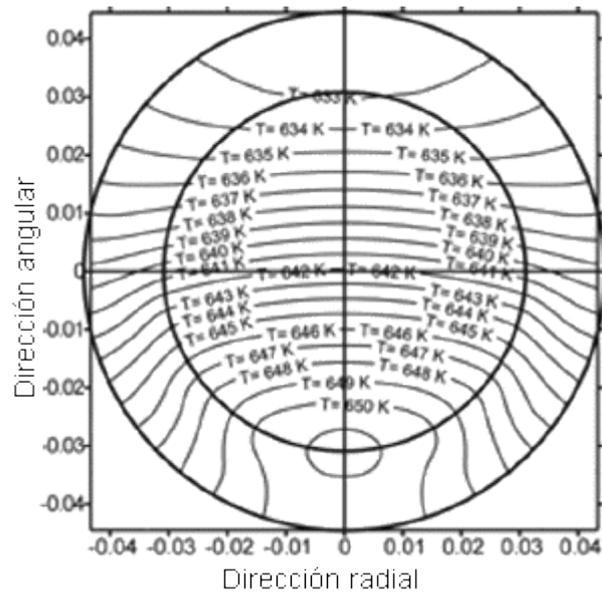


Fig. 9. Distribución de temperatura para el tubo cobre-acero a $t = 40$ s.

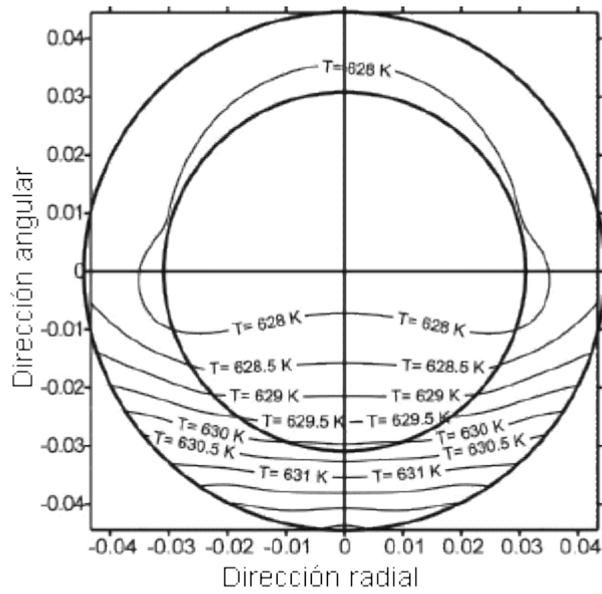


Fig. 10. Distribución de temperatura para el tubo acero a $t = 0$ s.

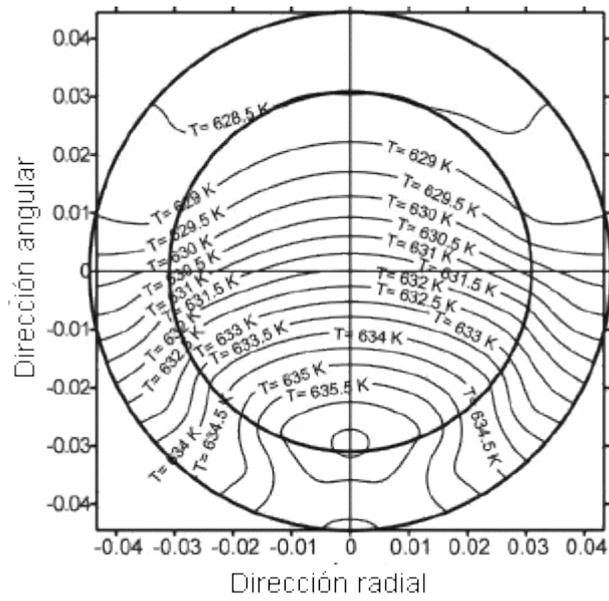


Fig. 11. Distribución de temperatura para el tubo acero a $t = 10$ s.

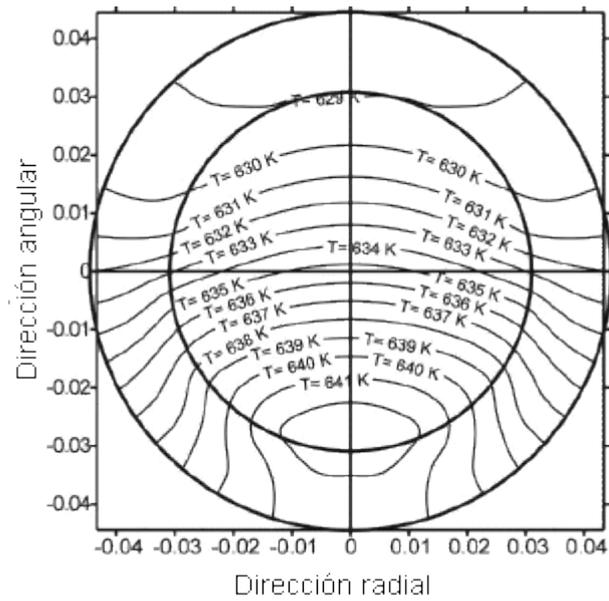


Fig. 12. Distribución de temperatura para el tubo acero a $t = 20$ s.

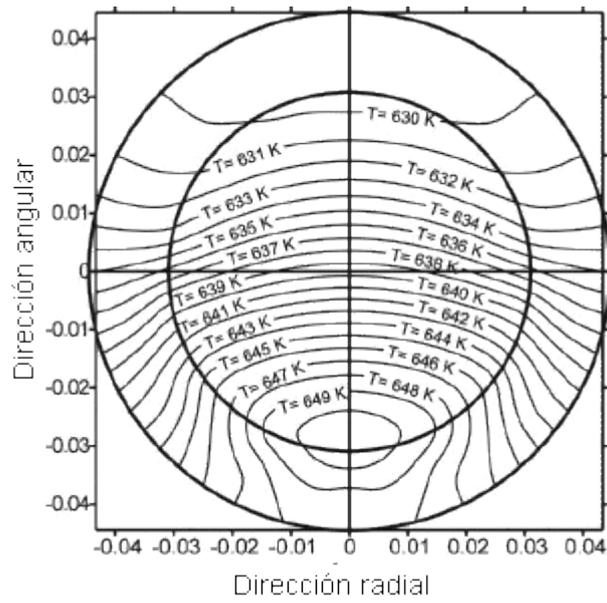


Fig. 13. Distribución de temperatura para el tubo acero a $t = 30$ s.

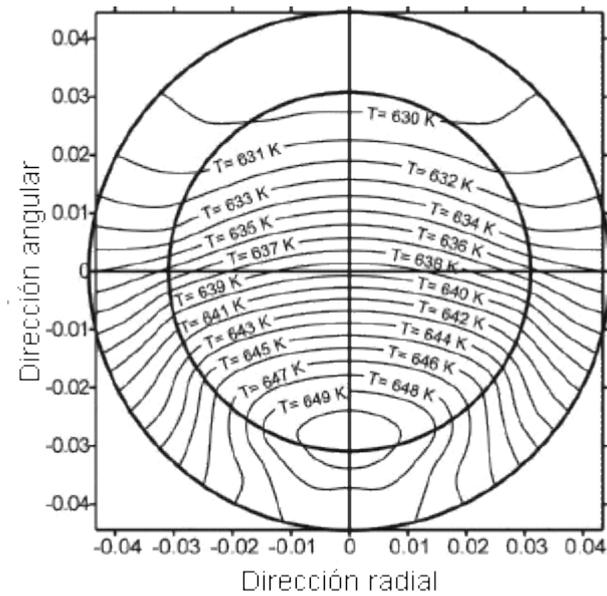


Fig. 14. Distribución de temperatura para el tubo acero a $t = 40$ s.

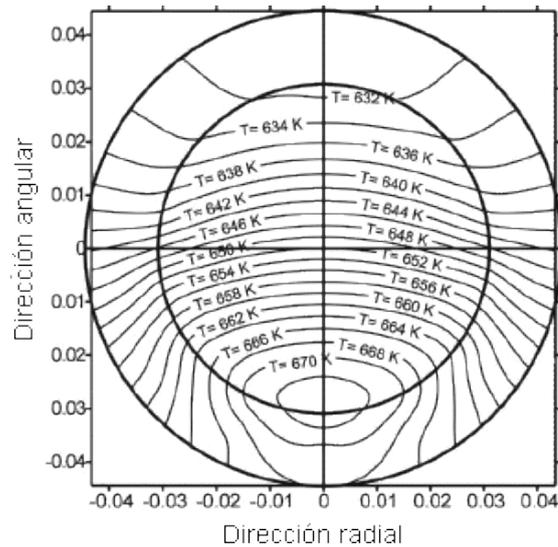


Fig. 15. Distribución de temperatura para el tubo acero a $t = 50$ s.

Resultados

Las figuras 5, 6, 7, 8 y 9 presentan el comportamiento dinámico del tubo absorbedor de cobre-acero.

La figura 5 muestra la distribución de temperatura inicial del tubo de pared compuesta de cobre-acero en la región de evaporación del tubo absorbedor, en condiciones de saturación. Se presenta una diferencia máxima de temperatura de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre las superficies en contacto con la fase líquida y vapor; por otro lado, el comportamiento que describen los perfiles de temperatura en la región líquida son isothermas estratificadas parabólicas, con unos gradientes pequeños. Para la superficie en contacto con la fase vapor, tiene un comportamiento cuasi-isotérmico. Las isothermas de la región en contacto con la fase líquida poseen un gradiente ligeramente mayor.

La figura 6 muestra los perfiles de temperatura diez segundos después de la condición inicial. El tubo presenta una diferencia máxima de temperatura de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre las superficies en contacto con el líquido vapor; además, en la parte inferior del tubo se encuentran gradientes muy grandes de temperatura en una región de $0,030$ m.

La figura 7 presenta los perfiles de temperatura en el instante de veinte segundos; en ese instante se suavizan los perfiles de temperatura para las regiones en contacto con ambas fases, pero la parte inferior del tubo tiene un incremento de 30% con relación a la región con gradientes elevados.

La figura 8 muestra la distribución de temperatura a los treinta segundos, donde se puede observar un comportamiento casi estable cerca del estado estacionario; en la interfase líquido-vapor los gradientes de temperatura son menores. En este instante la pared del tubo presenta una diferencia máxima de $13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la figura 9 se muestra la distribución de temperatura a los cuarenta segundos; para este instante se observan cambios muy pequeños

respecto al instante de treinta segundos, debido a que la diferencia máxima de temperatura se incrementó a 17 °C; de aquí se infiere que en este instante se alcanza el estado estacionario para el tubo absorbedor compuesto de cobre-acero, a causa de que en tiempos posteriores el sistema ya no presentó cambios de envergadura.

Un aspecto importante que se observa en los alrededores de la interfase bajo estas condiciones de equilibrio, se presenta en una región del tubo en contacto con el vapor y el líquido, los perfiles de temperatura presentan gradientes de temperatura con direcciones opuestas y el tamaño de la región es mayor con respecto a la región del tubo de acero; esto constituye un resultado muy favorable para el tubo compuesto de cobre-acero, debido a que en la región donde se producen los gradientes opuestos es mayor por sus magnitudes y afecta en menor medida las paredes del tubo absorbedor.

Las figuras 10, 11, 12, 13 y 14 presentan el comportamiento dinámico del tubo absorbedor de acero. La figura 10 muestra la distribución inicial del tubo en la zona de evaporación bajo condiciones de saturación y flujo de radiación normal en la superficie. La figura 11 corresponde a la distribución de temperaturas en el instante de diez segundos, donde se observan cambios importantes en los perfiles de temperatura, en la región del tubo que tiene contacto con la fase líquida; esto es, los gradientes de temperatura disminuyeron apreciablemente con respecto a la condición inicial; con respecto a la región del tubo en contacto con la fase vapor, el cambio presentado por los perfiles fue despreciable. El comportamiento térmico del tubo a los veinte segundos se describe en la figura 12, en la que se observan cambios moderados en la región en contacto con el vapor, los perfiles de temperatura cambian de forma e incrementan su gradiente de temperatura, y de manera más importante en la región inferior del tubo. La región en contacto con el líquido no presenta cambios apreciables.

La figura 13 describe el comportamiento térmico del tubo al tiempo de treinta segundos, período en que se observan cambios moderados en el tubo, y en la región de la interfase los perfiles cambian de dirección, con respecto al comportamiento anteriormente descrito. La figura 14 muestra la distribución de temperatura al tiempo de cuarenta segundos y describe un comportamiento similar al instante anterior, pero con mayor definición de los perfiles; en este momento se observa en la parte superior del tubo una pequeña región con gradientes importantes. Al tiempo de cincuenta segundos (Fig. 15) se presentan reacomodos en los perfiles en la parte superior del tubo y se observa la desaparición de los perfiles con gradientes grandes; además, corridas posteriores en la simulación no reportaron cambios con este comportamiento, por lo que el estado estacionario se alcanza a los cincuenta segundos, manteniendo indefinidamente el comportamiento indeseable alrededor de la interfase.

Conclusiones

El modelo produjo una estimación de los estados en el tubo que se alcanzan para producir vapor directamente por medio de la tecnología de canal parabólico, para el sistema estudiado de paredes compuestas de cobre (20 %) y acero (80 %). Se encontró que un tubo absorbedor de paredes compuestas disminuye considerablemente el gradiente de temperatura en la pared, manteniendo un estado cuasi-isotérmico con un gradiente máximo de 5 °C. La pared compuesta de cobre y acero soporta los esfuerzos mecánicos producidos por la presión, generados en el cambio de fase; por lo que podemos asegurar que el material no sufrirá fatiga mecánica considerable por los esfuerzos térmicos. El Cu^{1/3}-Fe^{2/3} presentó un gradiente de temperatura máximo de 10 °C, siendo su comportamiento térmico menos favorable que el Cu^{2/3}-Fe^{1/3}, como era de esperarse, ya que en las propiedades globales predomina más el hierro.

La propuesta de un tubo absorbedor compuesto se justifica plenamente a la luz del análisis térmico efectuado, donde se describen los diferentes comportamientos térmicos adoptados por el tubo.

Como conclusión de este trabajo se establecen los siguientes puntos:

- El tubo compuesto alcanza en menor tiempo el estado estacionario (30 segundos).
- Los cambios de comportamiento térmico más severos para ambos tubos fue en la región alrededor de la interfase líquido-vapor y en la parte inferior del tubo.
- El tubo de acero después del estado transitorio mantiene un comportamiento extremo en cambios violentos de los gradientes de temperatura en 30 % de la pared del tubo, disminuyendo en el estado estacionario.

Bajo condiciones de estado estacionario se mantienen regiones alrededor de la interfase con gradientes importantes de temperatura para el tubo de acero, y 50 % menores para el tubo compuesto.

Simbología

C_p : Capacidad calorífica.

h_l : Coeficiente de transferencia de calor-líquido.

h_g : Coeficiente de transferencia de calor-vapor.

k : Conductividad térmica.

ρ : Densidad.

q'' : Flujo de calor.

$\delta\theta$: Incremento en la dirección angular.

δr : Incremento en la dirección radial.

δT : Incremento de temperatura.

δt : Incremento de tiempo.

R : Radio.

T : Temperatura.

T_i : Temperatura en fase líquida.

T_p : Temperatura en la pared.

Bibliografía

ALMANZA, R.; A. LENTZ, L. SANTIAGO Y A. VALDÉS. «Some Experiences on Electricity Production at Low Powers With DSG Using Parabolic Throughs». *Journal of Physique IV*, EDP Sciences, France, 1999. pp 229-232.

ECK, M. Y W. D. STEINMANN. «Dynamic Behavior the Direct Solar Steam Generation in Parabolic Through Collectors: A Simulation Study». *Proceedings of the 10th SolarPACES International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*. Sydney: 2000. pp. 101-106.

FLORES, V. Y R. ALMANZA. «Análisis térmico experimental del receptor de pared compuesta Cu-Fe en estados transitorios con incidencia lateral del flujo de calor durante la GDV». *Memoria de la XXV Semana Nacional de Energía Solar*. San Luis Potosí, México: 2001.

———. «Simulación del comportamiento térmico del receptor de pared compuesta Cu-Fe durante estados transitorios». *Memoria de la XXV Semana Nacional de Energía Solar*. San Luis Potosí, México: 2001.

ODEH, S. D.; G. L. MORRISON Y M. BEHNIA. «Modeling of Parabolic Through Direct Steam Generation Solar Collectors». *Solar Energy*. v. 62, No. 6, pp. 395-406, 1998.

STEINMANN, W. D. Y O. GOEBEL. «Investigation of the Stationary and Transient Characteristics of Parabolic Through Collector for Direct Steam Generation». *Proceedings of the International Solar Energy Conference*. Albuquerque, 1998. pp. 409-416.

VALDÉS, P. A; R. ALMANZA, A. SORIA Y M. MAZARÍ. «Mathematical Model for Direct Steam Generation in Parabolic Through Collectors with Compound Wall Receiver». *Proceedings of the 1998 Annual Conference*. ASES, pp. 271-275, Albuquerque, N.M, 1998.

Diseño de un horno solar tipo caja optimizado para la región intertropical

Design of A Box-Type Solar Furnace, Optimized for the Inter-Tropical Region

*O. A. Jaramillo y J. A. del Río
Centro de Investigación en Energía UNAM. Privada Xochicalco s/n. Temixco,
Morelos, México. 62580.
Tel.: (+52) (777) 3250052.
Fax: 3250018.
e-mail: ojs@cie.unam.mx*

Resumen

Se presenta el diseño de un horno solar tipo caja para la cocción de alimentos. Este dispositivo es una caja térmicamente aislada que cuenta con una cubierta transparente y mediante superficies reflectoras fijas capta la energía solar necesaria para cocinar. El aspecto novedoso de este horno es su diseño para operar óptimamente en localidad de latitud intertropical. Su configuración asegura la adecuada captación de energía solar a lo largo del año mediante sólo cuatro movimientos. En el desarrollo del trabajo se pone énfasis en las ecuaciones de diseño (en función de la latitud del lugar), que permiten determinar la geometría de la caja y la disposición de sus superficies reflectoras.

Palabras clave: Horno solar tipo caja, cocción de alimentos, cocina solar

Abstract

This paper presents a design of a box-type solar cooker for cooking food. It is a thermal-insulated box with a transparent coating which captures the necessary solar energy for cooking through fixed reflecting surfaces. The innovative aspect of this solar cooker is its design is optimized to operate in inter-tropical latitudes. Its configuration ensures the proper capture of solar energy all year round with only four movements. Emphasis is placed on this paper on design equations (in terms of the latitude of the location) enabling the determination of the geometry of the box and the location of its reflecting surfaces.

Keywords: Box-type solar furnace, food cooking, solar cooking stove

Antecedentes

Los hornos y las cocinas solares son dispositivos térmico-solares que utilizan la energía radiativa proveniente del Sol, en los que se busca crear un «hogar» o una superficie caliente. Así, aprovechando la transformación de dicha energía se trata de lograr temperaturas lo

suficientemente altas y sostenidas para llevar a cabo la cocción de alimentos, pasterización de agua, preparación de conservas, secado de productos naturales, desinfección de equipos técnicos e instrumental, entre otros. En los hornos solares se utilizan para su construcción diversos materiales que eviten la pérdida de calor y que no sean fácilmente alterables por la radiación o por los diversos factores climáticos [Subodh, 2004; Ekechukwu y Ugwuoke, 2003; Bashir, 2001; Nahar, 2001; Funk, 2000; Buddhi, *et al.*, 1999; Mohamad, 1998; Funk y Larson, 1998; Mullick, *et al.*, 1996; Hussain e Sirajul, 1996].

El uso doméstico de los hornos y las cocinas solares genera ahorros energéticos, ya que disminuye el consumo de leña, gas licuado de petróleo o electricidad, y la inversión es recuperada a corto plazo. Cabe señalar también que las temperaturas moderadas que se alcanzan en los hornos solares permiten a los alimentos conservar sus propiedades alimenticias con mayor calidad que la que se logra en hornos y estufas convencionales, y debido al rango de temperaturas que se logra en dichos dispositivos y la manera en que éstos se hallan construidos, se disminuye el riesgo de incendio y accidentes durante su utilización.

Los hornos tipo caja pueden tener distinto número de reflectores externos (comúnmente entre 1 y 4), planos o levemente cóncavos. Las temperaturas de operación pueden superar 150 °C, funcionan prácticamente sin la intervención del usuario, mantienen el alimento caliente durante un tiempo prolongado, no producen molestias por deslumbramiento o reflexión y los riesgos de fuego son menores.

A pesar del conocimiento que se tiene de la construcción y funcionamiento de estos dispositivos, hay aún diversas variables que requieren un mayor estudio para optimizar dichos equipos. Después de una amplia revisión bibliográfica sobre este tópico, se observaron dos situaciones:

1. A pesar de constituir un dispositivo cuya aplicación resulta ser de las más sencillas de la energía solar, ésta no ha sido ampliamente difundida, lo que quizá se deba a los siguientes factores:
 - a) En la mayoría de los casos, utilizar un horno solar conlleva a que se tenga que cocinar bajo los rayos del Sol, y esto causa rechazo a su utilización.
 - b) Las cantidades de alimento que pueden ser cocinadas en un horno solar son relativamente pequeñas.
 - c) El proceso de cocción de los alimentos puede resultar bastante largo (en dependencia de las condiciones climatológicas), en la mayoría de los casos con buenas condiciones de operación, por más de cinco horas.
 - d) Si bien para reducir el tiempo de cocción se incluyen superficies reflectivas para incrementar la densidad de energía radiativa en la superficie receptora, en la mayoría de los diseños se necesitan constantes ajustes de la caja o de los espejos con vistas a obtener una adecuada captación de la energía solar.

e) Para muchos usuarios es difícil ajustar los espejos y optan por no realizarlo, consecuentemente no utilizan su horno solar.

2. Una característica muy peculiar de estos dispositivos es el hecho de que la mayoría de los diseñados reportados en la literatura son optimizados para latitudes mayores que la latitud de los trópicos. Es decir, los hornos solares se diseñan para captar la energía solar sin considerar alturas solares cercanas al cenit, y al ser utilizados éstos en la región intertropical su eficiencia óptica disminuye y por tanto también su rendimiento térmico.

Además, gran parte de los diseños consideran una caja de ciertas dimensiones y después se construyen los espejos. De esta manera, el tamaño y la posición de los espejos deben ser corregidos para ciertas situaciones con respecto al movimiento aparente del Sol durante el año. Por esta razón, la mayoría de los dispositivos requieren de ajustes en la posición de los espejos, ya sea de manera diaria, mensual o estacional.

Con el propósito de suprimir estos y otros inconvenientes se desarrolló un horno solar tipo caja diseñado para operar en la región intertropical, con las características siguientes:

- Facilidad de uso y operación (sin necesidad de ajustes diarios y con pocos movimientos a lo largo del año).
- Diseño geométrico optimizado para la región intertropical.
- Razón de concentración solar entre 2,0 y 2,5, con tiempo de operación para llevar a cabo la cocción de alimentos de 10:00 a 14:00 h.
- Capacidad para la cocción de alimentos de seis raciones.
- Facilidad en su construcción mediante corte y doblado de lámina (se incluyen los espejos y la caja como una sola estructura).
- Debido a su facilidad de construcción, los costos asociados se pueden reducir mediante la producción en serie.

El aspecto novedoso en el diseño del horno solar propuesto es que la geometría de la caja y la disposición de los espejos permiten una adecuada captación de energía solar mediante su colocación en tres posiciones diferentes a lo largo del año. La geometría de la caja presenta dos bases y cada una es utilizada en función de la declinación solar.

Descripción del modelo del horno solar

El dispositivo es una caja térmicamente aislada que cuenta con una cubierta transparente; y mediante espejos fijos se lleva a cabo la captación de la energía solar, para obtener la temperatura necesaria para cocinar. Es importante indicar que los espejos se encuentran fijos a la estructura y permiten incrementar la densidad de energía solar. Además, en el diseño se pone especial atención en la geometría para asegurar la máxima captación de energía solar a lo largo del año. El dibujo isométrico del horno solar propuesto se muestra en el anexo 1.

Para la realización de la estructura del horno solar que permite una correcta orientación y asegura la máxima incidencia solar, se

consideraron los puntos extremos en el ángulo de altitud solar α a lo largo del año y al día medio solar $\omega = 0$.

$$\text{sen } \alpha = \{ \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \text{sen} \varphi \text{sen} \delta \} \quad (1)$$

Donde la ecuación (1) sólo depende de la latitud del lugar φ . Los puntos extremos del ángulo α ocurren durante los solsticios de invierno ($\delta = -23,45$) y de verano ($\delta = 23,45$).

De esta forma el ángulo α presenta el siguiente comportamiento para la región intertropical:

$$\begin{aligned} \alpha_{\min} &= \arcsen \{ \cos \varphi \cos(-23,45) \cos(0) + \text{sen} \varphi \text{sen}(-23,45) \} \\ \alpha_{\text{cenit}} &= 90^\circ \\ \alpha_{\max} &= \arcsen \{ \cos \varphi \cos(23,45) \cos(0) + \text{sen} \varphi \text{sen}(23,45) \} \end{aligned} \quad (2)$$

Es decir, el Sol toma el ángulo más bajo cuando $\delta = -23,45$; al transcurrir los días y en dependencia de la latitud del lugar, el Sol llega al cenit y empieza a apuntar en dirección del hemisferio donde se localiza el observador. Por lo anterior se consideró que el horno solar debería ofrecer dos caras para el intervalo desde el solsticio de invierno hasta que el Sol pasa por el cenit, $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq (\alpha_{\text{cenit}} = 90^\circ)$ y el período desde el paso por el cenit hasta el ángulo máximo de altura solar $(\alpha_{\text{cenit}} = 90^\circ) \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$. Bien puede incluirse en el período antes dicho, teniendo mucho cuidado de que el perfil y la superficie transparente (vidrio de figura 1) sean apuntados en la dirección del hemisferio donde se encuentra el observador.

De esta manera, para obtener dos bases que permitieran la correcta orientación del horno solar, el ángulo c que se muestra en la figura 1, se utilizó la relación siguiente:

$$c = \alpha_{\min} + \alpha_{\max} \quad (3)$$

Para calcular el tamaño de los espejos E_n y el de la superficie transparente V_m , se utilizaron la técnica del trazado de rayos y la ley de reflexión, de tal suerte que se obtiene la siguiente ecuación:

$$\tan(2F_n + \beta_m) = \frac{E_n \text{sen} F_n}{V_m + E_n \cos F_n} \quad (4)$$

Donde $n = 1,2,3,4$ es el subíndice del ángulo del espejo a ser calculado, como se muestra en la figura 1.

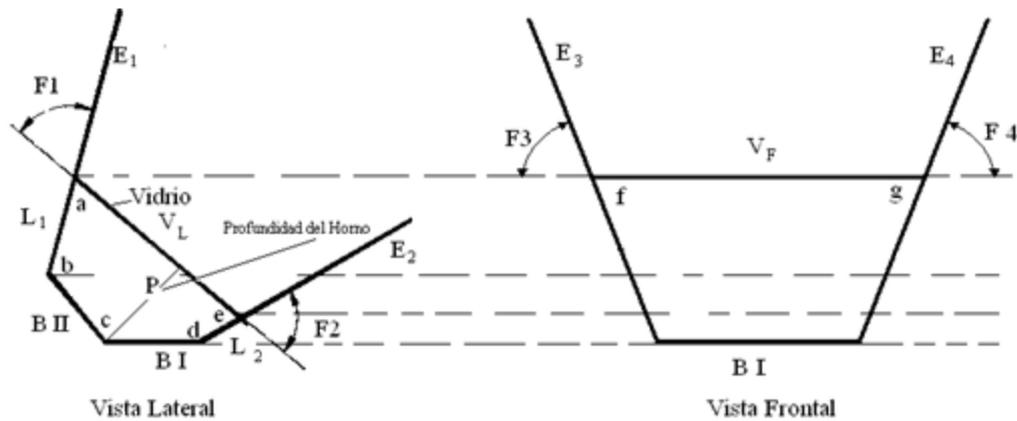


Fig. 1. Vista lateral y frontal del horno solar.

El subíndice $m = L, F$ corresponde a la vista lateral o frontal del horno: V_L para la longitud del vidrio en su parte lateral y V_F para la longitud del vidrio en su parte frontal. El ángulo β describe el movimiento aparente del Sol visto desde la superficie transparente (vidrio) del horno, tal que β es el ángulo que forma el rayo incidente y la normal a la superficie transparente. Se debe poner especial atención en que la vista lateral coincida con la dirección Norte-Sur mientras que la vista frontal coincida con la dirección Este-Oeste. Así, para el ángulo β_L se tiene un barrido tal

que $|\beta_L| = \alpha_{m\acute{a}x} - \alpha_{m\acute{m}n}$, de este modo el ángulo β_L está comprendido en $\alpha_{m\acute{a}x} \leq \beta_L \leq 180 - \alpha_{m\acute{a}x}$.

Para calcular los ángulos de los espejos $F_1 = a$ y $F_2 = e$, se utilizan las relaciones siguientes:

$$180^\circ \leq 2F_1 + \beta_L \leq 270^\circ \quad (5)$$

$$270^\circ \leq 2(180 - F_2) + \beta_L \leq 360^\circ \quad (6)$$

y tomando en cuenta los valores extremos de β_L , se puede escribir para F_1 la relación:

$$\frac{1}{2} \alpha_{m\acute{a}x} \leq F_1 \leq 135^\circ - \frac{1}{2} \alpha_{m\acute{a}x} \quad (7)$$

De tal forma que el valor óptimo de F_1 , que asegura la máxima captación de radiación solar directa que es reflejada hacia el horno, es establecido por

$$F_1 = \frac{\frac{1}{2} \alpha_{m\acute{a}x} + (135^\circ - \frac{1}{2} \alpha_{m\acute{a}x})}{2} = 67,5^\circ$$

En el caso de F_2 se tiene:

$$45 + \frac{1}{2}(180 - \alpha_{\max}) \leq F_2 \leq \frac{1}{2}\alpha_{\max} \quad (8)$$

Y análogamente, para obtener la máxima captación de radiación solar directa se tiene:

$$F_2 = \frac{45 + \frac{1}{2}(180 - \alpha_{\max}) + \frac{1}{2}\alpha_{\max}}{2} = 67,5^\circ$$

Una vez determinados F_1 y F_2 , y los ángulos b y d , se establecen las siguientes relaciones:

$$b = 270 - \alpha_{\min} - F_1 \quad (9)$$

$$d = 270 - \alpha_{\min} - F_2 \quad (10)$$

Antes de poder determinar el tamaño lateral del vidrio es necesario establecer el tamaño de las bases, en las que el tamaño de la Base I (en la figura 1 es BI) es igual al tamaño de la Base II (en la figura 1 es BII) y establecer la profundidad del horno P . Una vez propuesta la profundidad del horno, se determinan por el sistema de ecuaciones (11-12) las dimensiones del horno L_1 y L_2 :

$$P = L_1 \text{sen}(F_1) + BI \text{sen}(90 - \alpha_{\min}) \quad (11)$$

$$P = L_2 \text{sen}(F_2) + BII \text{sen}(90 - \alpha_{\max}) \quad (12)$$

Por otro lado, una vez establecidas dichas dimensiones, el tamaño lateral del vidrio V_L está dado por:

$$V_L = L_1 \cos(F_1) + BI \cos(90 - \alpha_{\min}) + L_2 \cos(F_2) + BII \cos(90 - \alpha_{\max}) \quad (13)$$

Y para calcular los ángulos $F_3 = f$ y $F_4 = g$ de los espejos con orientación Este-Oeste, se toma en cuenta que el ángulo β_F describe el movimiento aparente del Sol a lo largo del día durante el período de operación del horno (de 10:00 $\omega = -300$ a las 14:00, $\omega = 300$), así

$|\beta_F| = |\omega|_{10:00} + |\omega|_{14:00} = 60,0^\circ$; de este modo el ángulo β_F está comprendido en $60 \leq \beta_L \leq 120^\circ$.

Para calcular el ángulo del espejo $F_3 = f$ se utiliza la siguiente relación:

$$180^\circ \leq 2F_3 + \beta_L \leq 270^\circ \quad (14)$$

Para calcular F_3 se toman en cuenta los valores extremos de β_L de manera que $30 \leq F_3 \leq 105$ y para obtener la máxima captación de radiación

solar directa se tiene $F_3 = \frac{30+105}{2} = 67,5^\circ$.

Por simetría del movimiento aparente del Sol durante las horas de la mañana (10:00 a 12:00 h) y las horas de la tarde (12:00 a 14:00 h) se tiene que $F_3 = F_4 = 67,5^\circ$; este es el valor óptimo de F_3 y F_4 que asegura la máxima captación de radiación solar directa reflejada hacia el horno.

Con base en la ecuación (4) se puede ahora calcular el tamaño de los espejos que apuntan en dirección Norte-Sur mediante la ecuación

$$180^\circ \leq 2F_3 + \beta_L \leq 270^\circ \quad (15)$$

$$E_{1,2} = \frac{V_L (\tan(2(F_{1,2}) + (\beta_{L,min})))}{\tan(2(F_{1,2}) + (\beta_{L,min})) \cos(F_{1,2}) \operatorname{sen}(F_{1,2})} \quad (16)$$

Donde V_L se obtiene de la relación (13) y $\beta_{L,min} = \alpha_{máx}$.

Una vez calculado E_1 y E_2 se propone, por simetría, que el tamaño de éstos sea proporcional al tamaño de E_3 y E_4 , de modo que:

$$E_3 = E_4 \cong \frac{E_1 + E_2}{2} \quad (17)$$

De lo que resulta que los espejos que apuntan en dirección Este-Oeste son del mismo tamaño.

Por último, con base en la relación (4), para determinar el tamaño frontal del vidrio se considera:

$$V_F = \frac{E_{3,4}(\tan(2F_{3,4} + \beta_{F,min})\cos F_{3,4} \operatorname{sen} F_{3,4})}{\tan(2F_{2,4} + \beta_{F,min})} \quad (18)$$

Donde se ha propuesto que $\beta_{F,min} = 70^\circ$.

Caso de estudio para una latitud $\Phi = 17,00$

A continuación se lleva a cabo el desarrollo de un ejemplo tomando una latitud

de $\Phi = 17,00$. Para este caso se tiene que $\alpha_{min} \cong 50^\circ$ y el ángulo α_{max} es entonces $\alpha_{max} \cong 80,0^\circ$; de esta manera, al evaluar la ecuación se puede escribir el ángulo c (ver Fig. 1) como: $c = 130^\circ$.

Para estimar los ángulos b y d (ver Fig. 1) se tiene $b = 270 - 80 - 65 = 125$ y $d = 270 - 50 - 70 = 150$, en lo cual se han considerado los ángulos $F_1 = 65^\circ$ y $F_2 = 70^\circ$. En lugar de utilizar $F_1 = F_2 = 67,5^\circ$, como se indicó anteriormente, se han escogido estos ángulos de diseño, ya que resultan más fáciles de manipular para la fabricación del horno. Por el mismo motivo se han escogido los valores $F_3 = F_4 = 65^\circ$, pues facilitan la construcción del horno.

Una vez determinados los ángulos del perfil lateral del horno, se considera la capacidad

de éste y se propone que las bases BI y BII (Fig. 1) tengan el tamaño $BI = BII = 30$ cm. Además, para obtener un volumen adecuado se propone que la profundidad del horno P (Fig. 1) sea $P = 36$ cm, a fin que asegure la capacidad de cocción de seis raciones de alimento en dos ollas medianas.

De lo anterior, con base en las relaciones (11) y (12) se pueden calcular los lados del horno L_1 y L_2 , tal que $L_1 = 18$ cm y $L_2 = 33$ cm.

Para determinar la longitud lateral del vidrio se emplea la ecuación (13) $V_L = 71$ cm y el tamaño de los espejos se puede calcular con base en la relación (11), por lo que se puede escribir $E_1 = 59$ cm y $E_2 = 68$ cm.

Por simetría se propone que los espejos orientados en la dirección Este-Oeste tengan la misma longitud, como indica la relación (16); de esta manera se tiene que $E_3 = E_4 = 63$ cm, y por último el tamaño del vidrio frontal se calcula a través de la relación (18), de este modo $V_F = 83$ cm, donde se ha tomado en cuenta que $\beta_{F,min} = 70^\circ$.

En resumen, en la tabla 1 se exponen las dimensiones para conformar el horno diseñado para una latitud de $\phi = 17,0^\circ$.

Tabla 1. Resultados numéricos del ejemplo

| Cavidad | | Reflectores | | Ángulos | |
|--------------------|------------|-------------|-------|-----------|------|
| $(V_F \times V_L)$ | 71 x 83 cm | E_1 | 59 cm | b | 125° |
| $BI = BII$ | 30 cm | E_2 | 68 cm | c | 130° |
| P | 36 cm | $E_3 = E_4$ | 63 cm | d | 150° |
| L_1 | 33 cm | | | $F_1 = a$ | 65° |
| L_2 | 18 cm | | | $F_2 = e$ | 70° |
| | | | | $F_3 = f$ | 65° |
| | | | | $F_4 = g$ | 65° |

La manera de posicionar el horno a lo largo del año se muestra en la tabla 2. Se requieren de cuatro movimientos y tres posiciones para lograr una adecuada captación de energía solar a lo largo del año.

Tabla 2. Período de operación para el caso de estudio (las bases se indican en la figura 1)

| Fechas | Base | Orientación |
|----------------------|---------------|-------------------|
| Octubre 7 a marzo 8 | Base I (BI) | Dirigido al Sur |
| Marzo 9 a mayo 16 | Base II (BII) | Dirigido al Sur |
| Mayo 17 a julio 29 | Base II (BII) | Dirigido al Norte |
| Julio 30 a octubre 6 | Base II (BII) | Dirigido al Sur |

En el anexo 1 se muestran las vistas frontal y lateral, la planta e isométrico del horno solar, y en el anexo 2 se presenta la plantilla para la maquinación del horno mediante doblado y cortado de lámina.

Conclusiones

Se pueden citar como principales utilidades del horno solar, la disminución del consumo de leña y gas en la cocción de alimentos, y la facilidad en su manejo y operación; las dimensiones del horno permiten la cocción de alimentos para familias de seis integrantes durante un período de asoleamiento diario de cuatro horas.

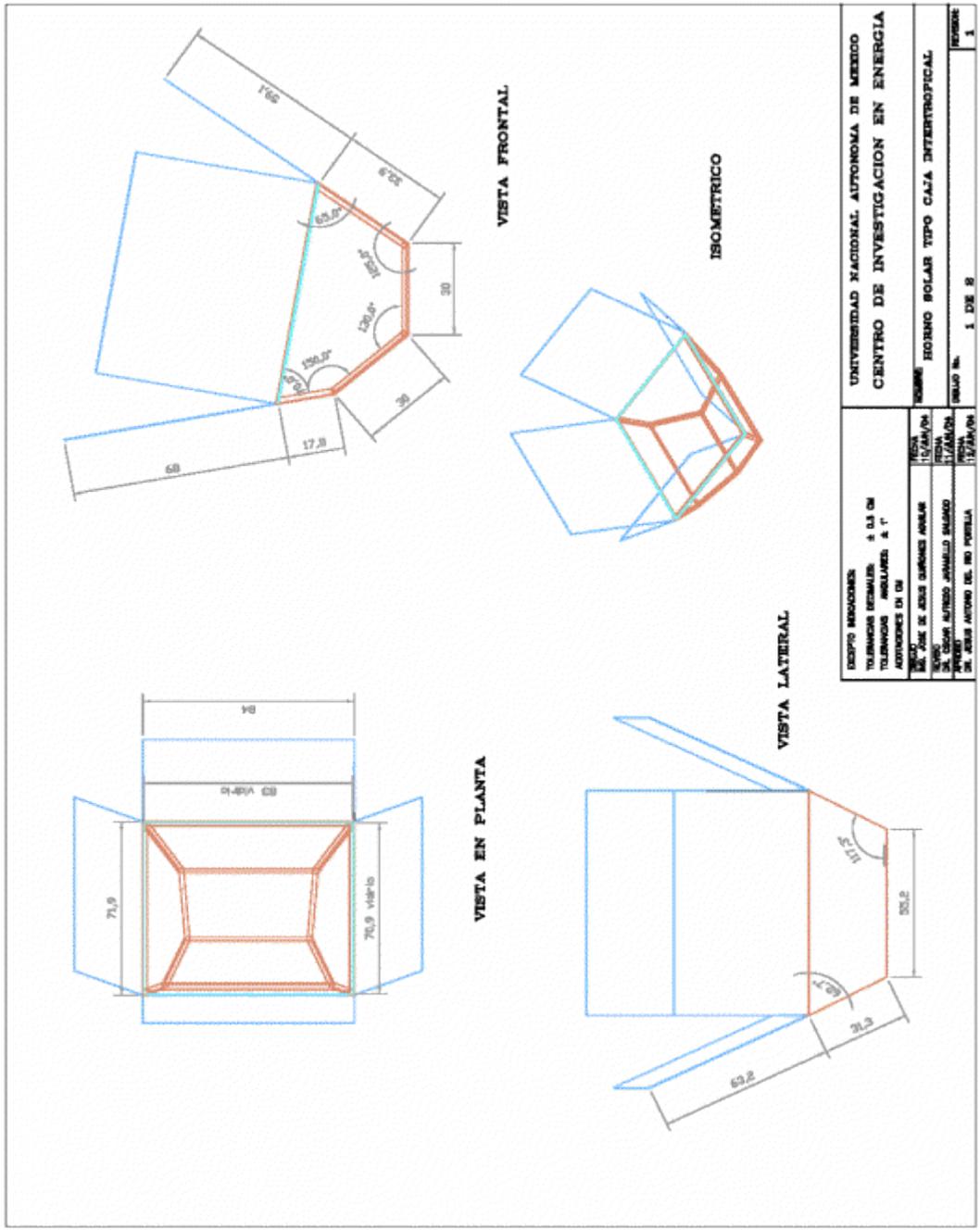
Mediante el diseño propuesto se optimiza la captación de energía solar durante el invierno, asegurando la cocción de alimentos durante los meses de menor asoleamiento. Cabe señalar que como parte de esta investigación se construyó un modelo para verificar los criterios de diseño en la captación de la energía solar. Se verificaron cualitativamente dicha captación, el desempeño de los espejos y la adecuada geometría del horno [Jaramillo, *et al.*, 2004].

Para facilitar su construcción se recomienda concretamente utilizar el corte y doblado de lámina, que incluye los espejos y la caja como una sola estructura, de esta forma su producción en serie disminuirá los costos de fabricación.

Bibliografía

- BASHIR, AHMAD. «Users and Disusers Of Box Solar Cookers in Urban India: Implications for Solar Cooking Projects», *Solar Energy*. 69, Supplement 6, 209-215, jul., 2001.
- BUDDHI, D., *et al.* «Performance Test of a Box-Type Solar Cooker: Effect of Load on the Second Figure of Merit». *Int. J. Energy. Res.* 23 (9), 827-830, 1999.
- EKECHUKWU, O. V. Y N. T. Ugwuoke. «Design and Measured Performance of a Plane Reflector Augmented Box-Type Solar-Energy Cooker». *Renewable Energy*. 28 (12), 1935-1952, 2003.
- FUNK, P. A. «Evaluating the International Standard Procedure for Testing Solar Cookers and Reporting Performance». *Solar Energy*. 68, 1, 1-7, 2000.
- FUNK, P. A. Y D. L. LARSON. «Parametric Model of Solar Cooker Performance». *Solar Energy*. 62 (1), 63-68, 1998.
- HUSSAIN, M. E ISLAM KHAN SIRAJUL. «Fabrication of and Performance Studies on a Low Cost Solar Cooker Having an Inclined Aperture Plane». *Renewable Energy*. 9, Issues 1-4, 762-765, sep., 1996.
- JARAMILLO, O.; A. HUELSZ, G. HERNÁNDEZ-LUNA, J. A. DEL RÍO, R. ACOSTA Y L. G. ARRIAGA. «A Novel Design of a Solar Oven for Intertropical Zones». Enviado a *Solar Energy*. 24 de nov., 2004.
- MOHAMAD, M. A.; H. H. EL-GHETANY Y M. A ADEL. «Design, Construction and Field Test of Hot-Box Solar Cookers for African Sahel Region». *Renewable Energy*. 14, Issues 1-4, 49-54, may., 1998.
- MULLICK, S. C.; T. C. KANDPAL Y KUMAR SUBODH. «Testing of Box-Type Solar Cooker: Second Figure of Merit F2 and its Variation with Load and Number of Pots». *Solar Energy*. 57, 5, 409-413, 1996.
- NAHAR, N. M. «Design, Development and Testing of a Double Reflector Hot Box Solar Cooker with a Transparent Insulation Material». *Renewable Energy*. 23, 2, 167-179, 2001.
- SUBODH, KUMAR. «Natural Convective Heat Transfer in Trapezoidal Enclosure of Box-Type Solar Cooker». *Renewable Energy*. 29, 2, 211-222, 2004.

Anexo 1. Isométrico y vistas del horno solar



Resultados preliminares de la evaluación de los potenciales energéticos eólico y solar en la franja fronteriza del Estado de Nuevo León, México

Preliminary Results of the Evaluation of Wind and Solar Energy Potentials in the Border Strip at Nuevo Leon state in Mexico

*Ricardo Saldaña Flores y Ubaldo Miranda Miranda
Gerencia de Energías No Convencionales, Instituto de Investigaciones Eléctricas.
Reforma 113 Col. Palmira. 62490 Cuernavaca, Morelos, México.
Tel.: 00 52 (777) 3623811, ext. 7254.
Fax: 00 52 (777) 3623808.
e-mail: rsf@iie.org.mx*

Resumen

En el presente trabajo se describen la metodología y los resultados obtenidos del estudio de los potenciales eólico y solar en la franja fronteriza del estado de Nuevo León, México, realizado a partir de un año de mediciones de la velocidad y dirección del viento e irradiancia solar global en cinco sitios ubicados en: Anáhuac, Cerralvo, Colombia, Loma Alta y Vallecillos. Las mediciones de viento se realizaron a 27, 54, 35, 42 y 42 m de altura, y las de irradiancia solar global a 9, 6, 6, 5 y 8 m de altura, respectivamente, del 1º de septiembre de 2002 al 31 de agosto de 2003.

Palabras clave: Potencial energético, energía eólica, energía solar

Abstract

This paper describes the methodology and the results obtained from a study of wind and solar potentials in the border strip found in the state of Nuevo León, Mexico, wind speed and direction and solar global irradiance measurements were carried out in five states: Anahuac, Cerralvo, Colombia, Loma Alta and Vallecillos. Wind measurements were made at 27, 54, 35, 42 and 42 m high and those of solar global irradiance at 9, 6, 6, 5 and 8 m high, respectively, from September 1, 2002 to August 31, 2003.

Keywords: Energy potential, wind energy, solar energy

Introducción

De septiembre de 2002 a agosto de 2003 se llevaron a cabo mediciones de viento e irradiancia solar global en cinco sitios ubicados en la franja fronteriza del estado de Nuevo León, México con el objeto de determinar el potencial energético de los recursos eólico y solar en la región. Los equipos se localizaron en: Anáhuac (100° 08.19' W, 27° 14.26' N), Cerralvo (99° 36.86' W, 26° 05.42' N), Colombia (99° 49.99' W, 27° 39.33' N), Loma Alta (99° 07.12' W, 25° 48.85' W) y Vallecillos (100° 00.32' W, 26° 40.08' N). Las mediciones fueron realizadas en conjunto por el Fideicomiso para el Desarrollo del Norte del Estado

de Nuevo León y la Gerencia de Energías no Convencionales del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Metodología

Los anemómetros fueron instalados en una antena de televisión y cuatro torres repetidoras de teléfono a 27 m de altura en Anáhuac, 54 m en Cerralvo, 35 m en Colombia, 42 m en Loma Alta y 42 m en Vallecillos. Los muestreos de la velocidad y dirección del viento se efectuaron cada dos segundos, almacenando el valor promedio de la velocidad y su rumbo asociado cada diez minutos. En cuanto a la irradiancia solar global, los muestreos se realizaron cada dos segundos, almacenando el valor promedio cada diez minutos.

Con los valores promedio de la velocidad del viento y su rumbo asociado, e irradiancia solar global cada diez minutos, se estimó en los cinco sitios la velocidad promedio, la desviación estándar, los factores de forma k y de escala c de la f.d.p. de Weibull [Manwell, *et al.*, 2002], la densidad de potencia, la velocidad máxima y la irradiación solar global.

Con los archivos de velocidad y dirección del viento se modeló la densidad de potencia en áreas de 50 km x 50 km, mediante el programa Wind Atlas Análisis and Application Program (WAsP), desarrollado por los laboratorios RISØ de Dinamarca, empleando los modelos digitales de elevación del terreno y los valores de rugosidad del área circundante [Mortensen, *et al.*, 2000]. Las figuras 1, 2, 3, 4 y 5 muestran la ubicación de los sitios de medición y las áreas de modelación de la densidad de potencia del viento.

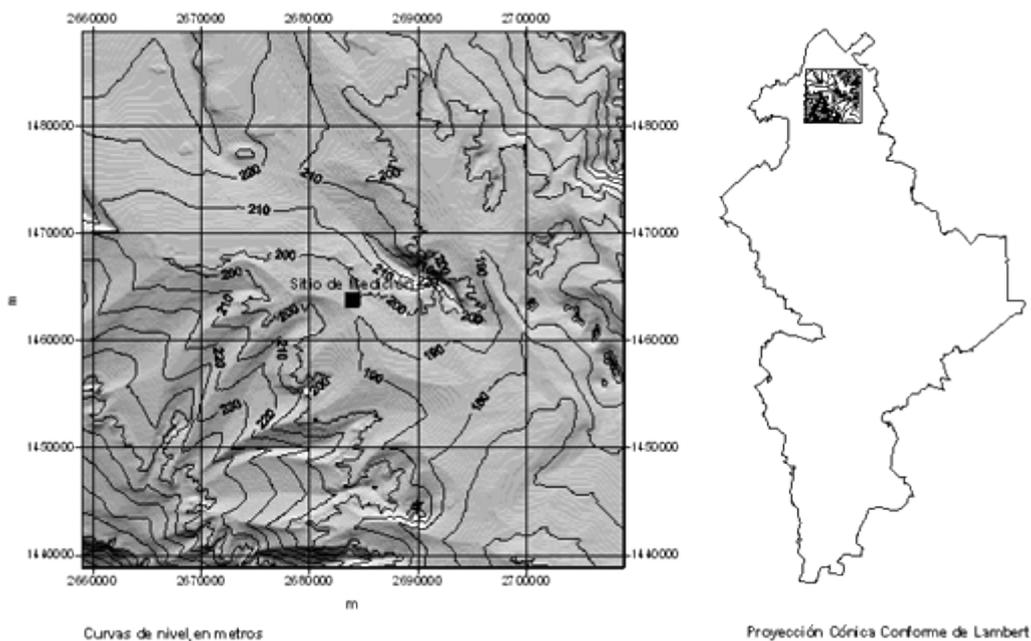


Fig. 1. Ubicación de la estación Anáhuac (municipio de Anáhuac).

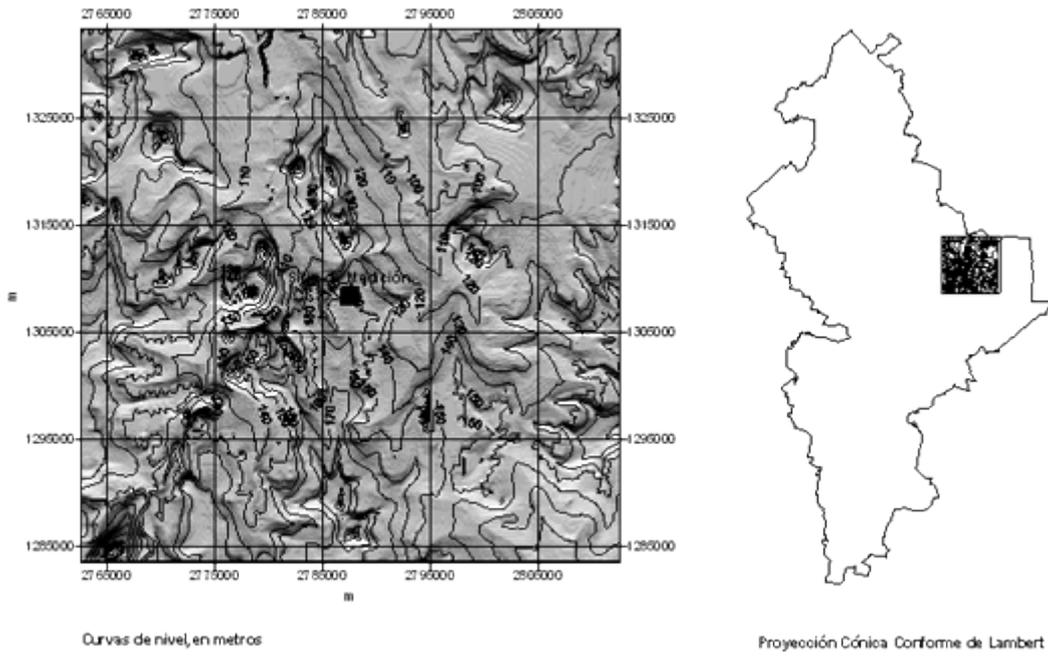


Fig. 4. Ubicación de la estación Loma Alta (municipio de General Bravo).

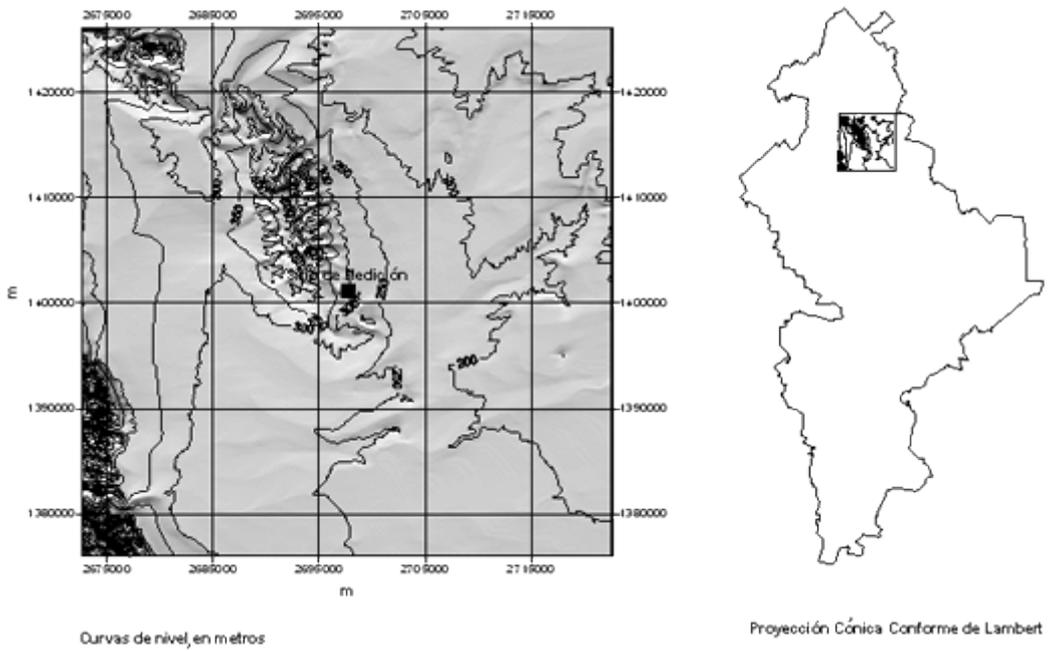


Fig. 5. Ubicación de la estación Vallecillos (municipio de Vallecillo).

Resultados

La tabla 1 muestra un resumen de los resultados obtenidos durante el año de medición.

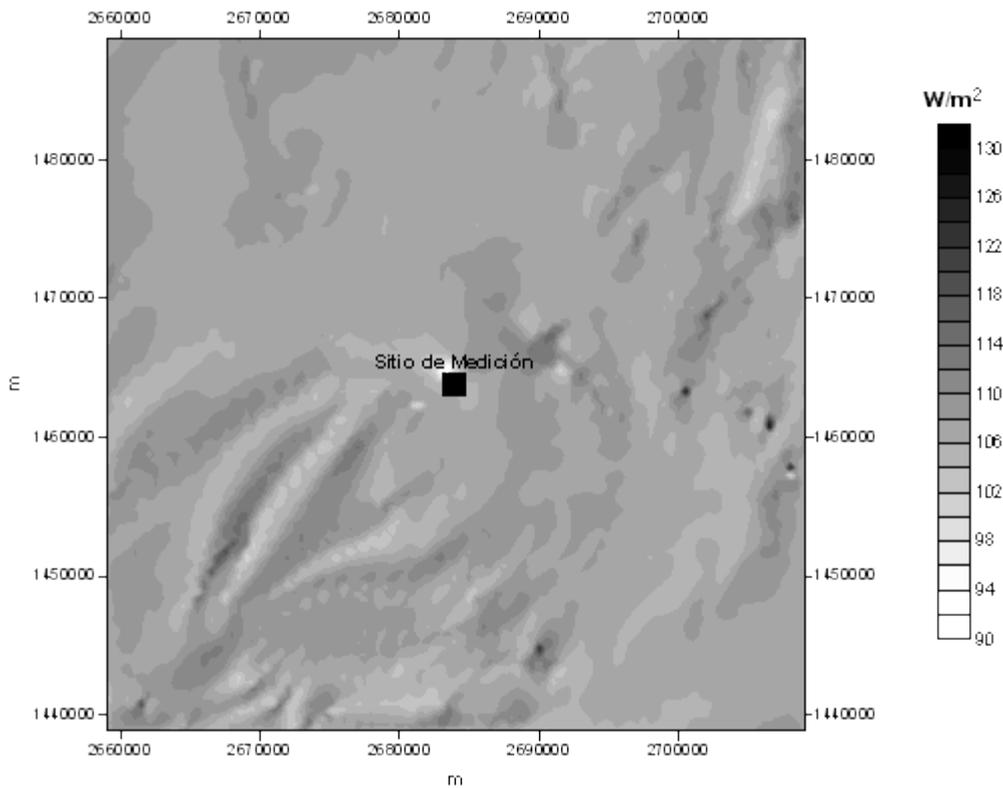
Tabla 1. Resumen de los resultados generales obtenidos durante el período de mediciones comprendido de septiembre de 2002 a agosto de 2003 [Saldaña, et al., 2003]

| Estación | Velocidad promedio (m/s) | Desviación estándar (m/s) | k(adim) | C(m/s) | Densidad de potencia (W/m ²) | Velocidad máxima promedio en 10 minutos (m/s) | Irradiación solar global (kWh/m ² -día) |
|---------------------------|--|---------------------------|---------|--------|--|---|--|
| Septiembre de 2002 | | | | | | | |
| Anáhuac | 3,12 | 1,59 | 2,08 | 3,52 | 33,50 | 8,84 | 4,96 |
| Cerralvo | 4,31 | 2,09 | 2,19 | 4,86 | 84,47 | 12,45 | 5,20 |
| Colombia | 3,68 | 1,73 | 2,27 | 4,15 | 51,09 | 9,67 | 5,40 |
| Loma Alta | 4,38 | 2,24 | 2,07 | 4,95 | 95,46 | 22,90 | 5,25 |
| Vallecillo | 3,59 | 2,21 | 1,70 | 4,03 | 42,76 | 18,83 | 4,89 |
| Octubre de 2002 | | | | | | | |
| Anáhuac | 3,27 | 1,81 | 1,90 | 3,69 | 42,83 | 9,25 | 3,66 |
| Cerralvo | 3,79 | 2,12 | 1,88 | 4,27 | 67,79 | 11,52 | 3,67 |
| Colombia | 3,67 | 1,74 | 2,24 | 4,14 | 51,95 | 12,55 | 3,62 |
| Loma Alta | 4,38 | 2,36 | 1,96 | 4,94 | 98,52 | 13,19 | 3,81 |
| Vallecillo | 3,86 | 2,29 | 1,77 | 4,33 | 62,16 | 11,22 | 3,79 |
| Noviembre de 2002 | | | | | | | |
| Anáhuac | 2,98 | 1,65 | 1,90 | 3,36 | 32,08 | 8,39 | 3,46 |
| Cerralvo | 5,23 | 2,48 | 2,25 | 5,91 | 147,15 | 13,01 | 3,92 |
| Colombia | No se contó con información debido al robo del equipo | | | | | | |
| Loma Alta | 5,15 | 2,44 | 2,25 | 5,81 | 140,91 | 13,99 | 3,85 |

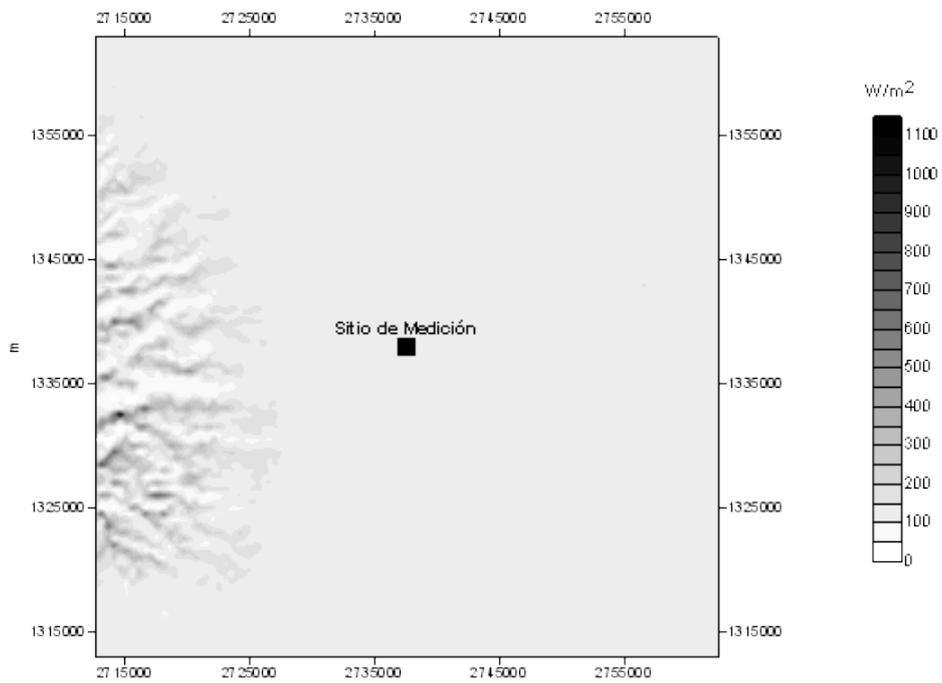
| | | | | | | | |
|--------------------------|--|------|------|------|--------|-------|------|
| Vallecillo | 3,33 | 2,18 | 1,58 | 3,71 | 47,16 | 11,66 | 3,72 |
| Diciembre de 2002 | | | | | | | |
| Anáhuac | 3,23 | 2,20 | 1,52 | 3,59 | 56,65 | 16,42 | 3,24 |
| Cerralvo | 4,94 | 2,83 | 1,83 | 5,56 | 154,71 | 18,20 | 3,58 |
| Colombia | No se contó con información debido al robo del equipo | | | | | | |
| Loma Alta | 4,87 | 2,98 | 1,71 | 5,46 | 160,69 | 20,95 | 3,33 |
| Vallecillo | 3,56 | 2,36 | 1,57 | 3,97 | 58,48 | 14,70 | 3,39 |
| Enero de 2003 | | | | | | | |
| Anáhuac | 2,62 | 1,62 | 1,69 | 2,94 | 25,37 | 9,98 | 2,61 |
| Cerralvo | 4,57 | 2,94 | 1,62 | 5,10 | 142,15 | 18,19 | 2,88 |
| Colombia | No se contó con información debido al robo del equipo | | | | | | |
| Loma Alta | 4,52 | 2,74 | 1,72 | 5,07 | 128,12 | 15,67 | 2,78 |
| Vallecillo | El anemómetro no operó correctamente | | | | | | 2,86 |
| Febrero de 2003 | | | | | | | |
| Anáhuac | 3,38 | 2,04 | 1,73 | 3,79 | 52,96 | 13,56 | 3,44 |
| Cerralvo | 4,67 | 2,72 | 1,80 | 5,26 | 133,48 | 16,98 | 3,72 |
| Colombia | 4,28 | 2,30 | 1,96 | 4,82 | 92,63 | 12,23 | 3,49 |
| Loma Alta | 4,97 | 2,85 | 1,83 | 5,59 | 157,12 | 17,37 | 3,39 |
| Vallecillo | 3,97 | 2,66 | 1,54 | 4,41 | 83,66 | 17,56 | 3,62 |
| Marzo de 2003 | | | | | | | |
| Anáhuac | 3,72 | 2,26 | 1,72 | 4,17 | 72,91 | 15,41 | 4,63 |
| Cerralvo | 4,78 | 2,92 | 1,71 | 5,36 | 154,48 | 18,09 | 4,82 |
| Colombia | 4,51 | 2,51 | 1,89 | 5,08 | 119,14 | 16,58 | 4,48 |
| Loma Alta | 4,86 | 2,84 | 1,79 | 5,46 | 153,62 | 18,50 | 4,70 |
| Vallecillo | 4,32 | 2,75 | 1,63 | 4,82 | 97,61 | 16,32 | 4,63 |
| Abril de 2003 | | | | | | | |
| Anáhuac | 4,55 | 2,28 | 2,11 | 5,14 | 102,26 | 11,85 | 5,05 |
| Cerralvo | 4,81 | 2,38 | 2,14 | 5,43 | 124,63 | 17,28 | 4,84 |
| Colombia | 4,76 | 1,79 | 2,89 | 5,34 | 94,81 | 12,11 | 4,97 |
| Loma Alta | 5,40 | 2,40 | 2,41 | 6,09 | 156,31 | 17,84 | 4,98 |
| Vallecillo | 5,17 | 2,66 | 2,06 | 5,84 | 127,51 | 15,71 | 4,96 |
| Mayo de 2003 | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-----------------------|------|------|------|------|--------|-------|------|
| Anáhuac | 4,63 | 2,01 | 2,48 | 5,22 | 98,10 | 20,14 | 5,98 |
| Cerralvo | 4,48 | 2,15 | 2,22 | 5,06 | 98,43 | 14,58 | 5,61 |
| Colombia | 4,63 | 1,65 | 3,07 | 5,18 | 84,39 | 15,99 | 5,93 |
| Loma Alta | 5,31 | 2,58 | 2,19 | 6,00 | 160,64 | 16,31 | 5,98 |
| Vallecillo | 5,31 | 2,41 | 2,36 | 5,99 | 124,20 | 12,32 | 5,88 |
| Junio de 2003 | | | | | | | |
| Anáhuac | 4,36 | 2,07 | 2,25 | 4,92 | 87,10 | 12,17 | 6,76 |
| Cerralvo | 4,09 | 2,45 | 1,74 | 4,59 | 96,55 | 15,67 | 6,10 |
| Colombia | 4,46 | 1,87 | 2,57 | 5,03 | 86,48 | 14,85 | 6,75 |
| Loma Alta | 5,10 | 2,66 | 2,03 | 5,76 | 150,80 | 20,28 | 6,18 |
| Vallecillo | 5,04 | 2,65 | 2,01 | 5,69 | 123,74 | 13,99 | 6,45 |
| Julio de 2003 | | | | | | | |
| Anáhuac | 4,57 | 2,24 | 2,16 | 5,16 | 102,73 | 12,79 | 6,32 |
| Cerralvo | 4,19 | 2,56 | 1,71 | 4,70 | 106,03 | 14,67 | 6,08 |
| Colombia | 4,52 | 1,90 | 2,57 | 5,09 | 89,00 | 16,00 | 6,27 |
| Loma Alta | 5,84 | 2,40 | 2,63 | 6,58 | 182,16 | 15,88 | 6,11 |
| Vallecillo | 5,44 | 2,81 | 2,05 | 6,14 | 149,80 | 16,86 | 6,20 |
| Agosto de 2003 | | | | | | | |
| Anáhuac | 4,04 | 1,84 | 2,35 | 4,56 | 66,81 | 11,77 | 6,19 |
| Cerralvo | 4,02 | 2,33 | 1,81 | 4,52 | 89,61 | 15,07 | 6,10 |
| Colombia | 4,18 | 1,59 | 2,86 | 4,70 | 65,12 | 13,04 | 6,28 |
| Loma Alta | 5,14 | 2,52 | 2,17 | 5,81 | 147,66 | 15,66 | 6,29 |
| Vallecillo | 4,99 | 2,61 | 2,02 | 5,63 | 116,46 | 18,39 | 6,01 |

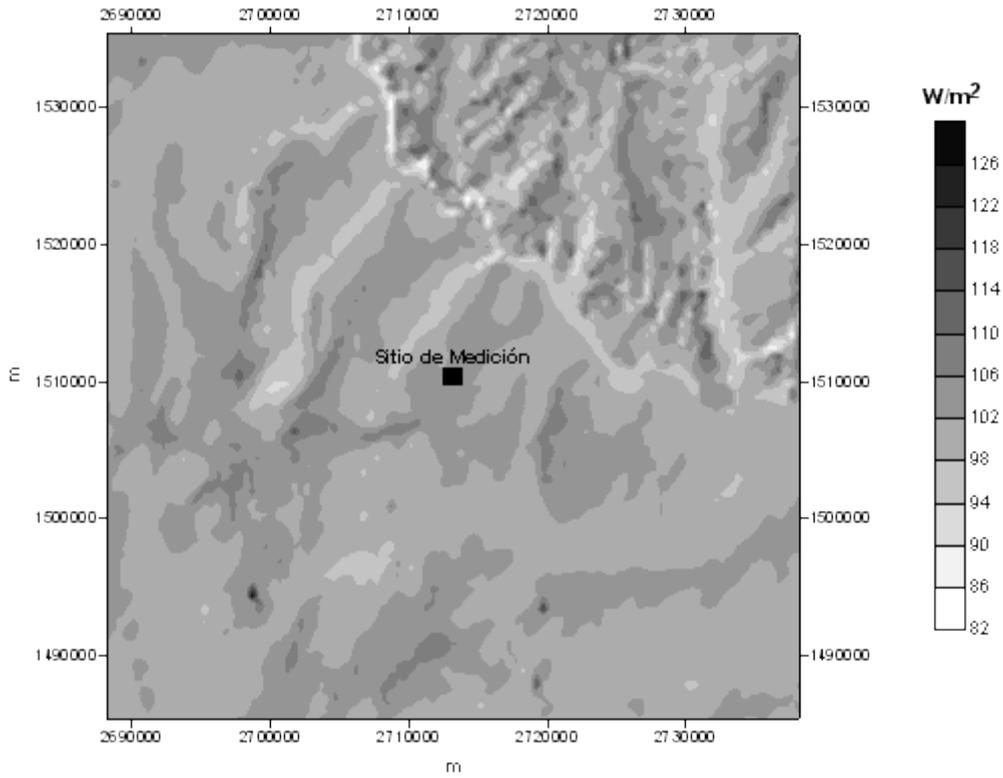
Las figuras 6, 7, 8, 9 y 10 muestran la distribución de la densidad de potencia del viento resultante de la modelación en los alrededores de los sitios de medición a 50 m de altura.



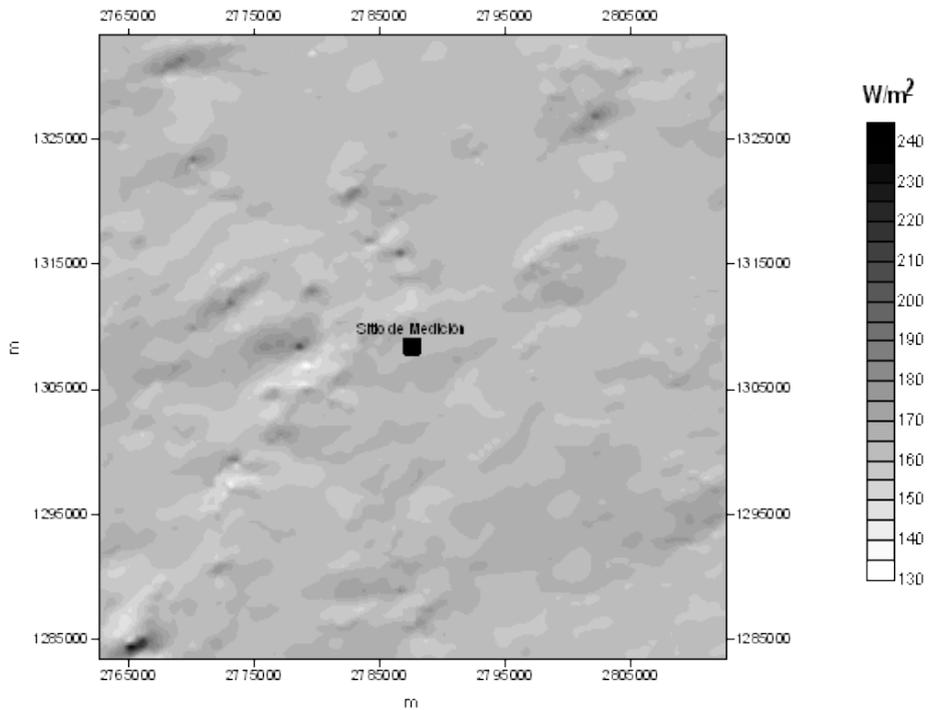
*Fig. 6. Modelación de la densidad de potencia en Anáhuac (50 m).
Septiembre de 2002 a agosto de 2003.*



*Fig. 7. Modelación de la densidad de potencia en Cerralvo (50 m).
Septiembre de 2002 a agosto de 2003.*



*Fig. 8. Modelación de la densidad de potencia en Colombia (50 m).
Septiembre de 2002 a agosto de 2003.*



*Fig. 9. Modelación de la densidad de potencia en Loma Alta (50 m).
Septiembre de 2002 a agosto de 2003.*

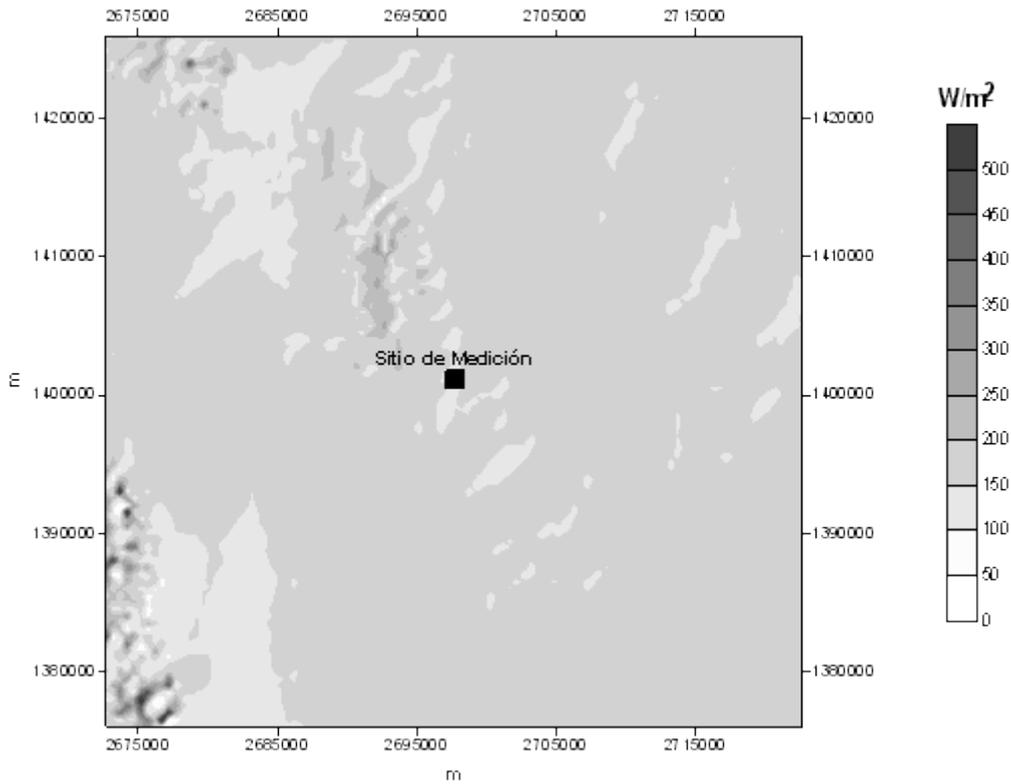


Fig. 10. Modelación de la densidad de potencia en Vallecillo (50 m). Septiembre de 2002 a agosto de 2003.

Las figuras 11, 12, 13, 14 y 15 muestran los patrones anuales de irradiancia solar global observados en los sitios de medición.

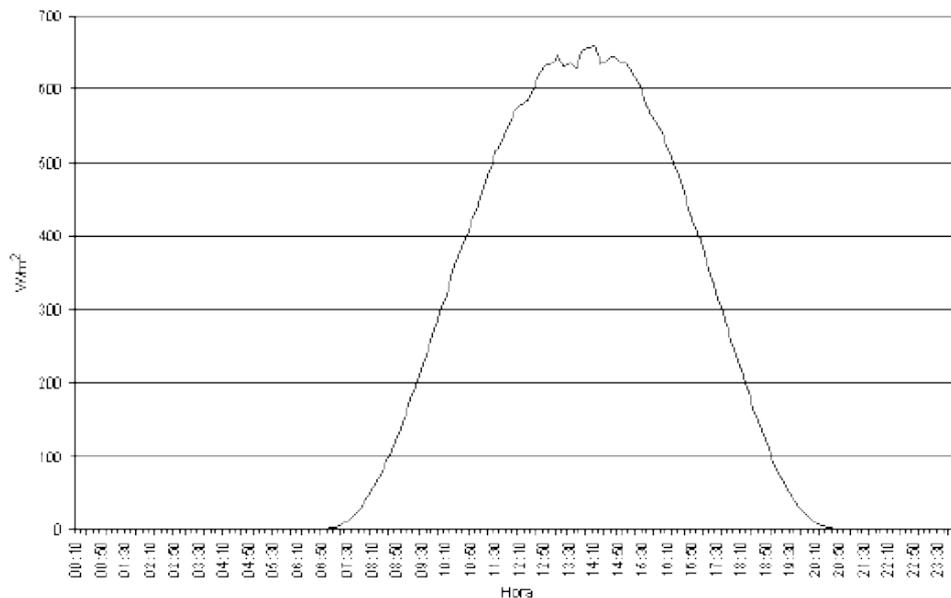


Fig. 11. Patrón anual de irradiancia solar global en Anáhuac.

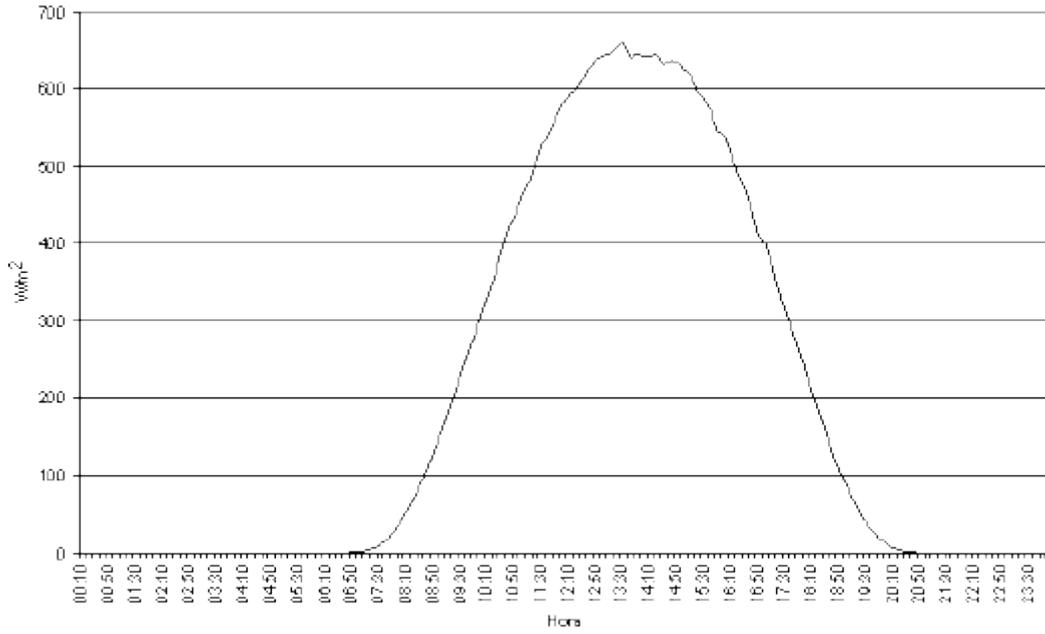


Fig. 12. Patrón anual de irradiancia solar global en Cerralvo.

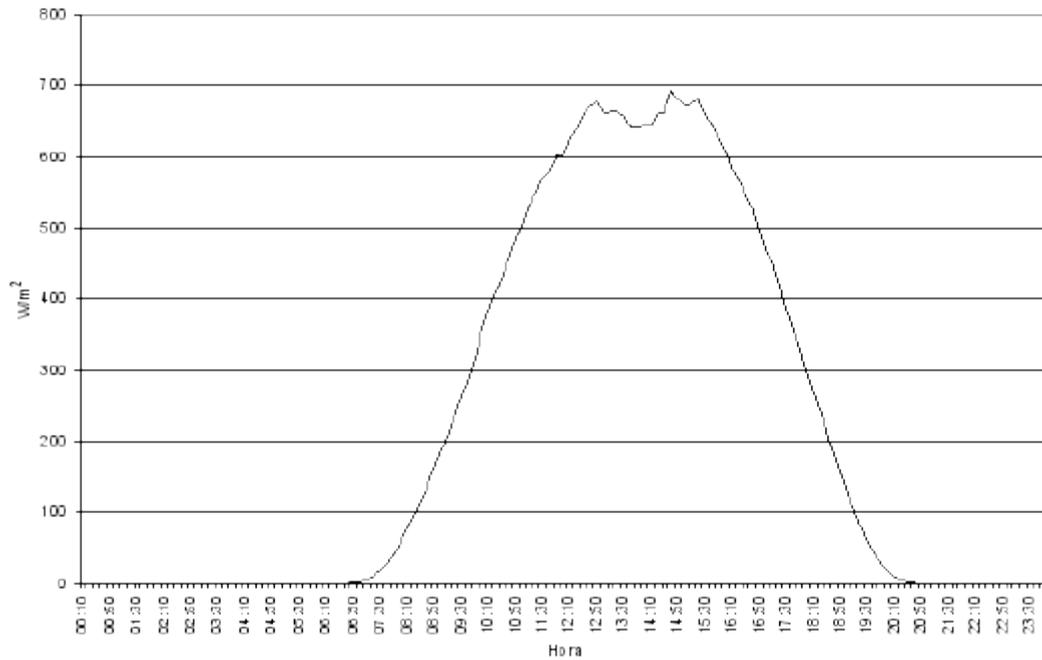


Fig. 13. Patrón anual de irradiancia solar global en Colombia.

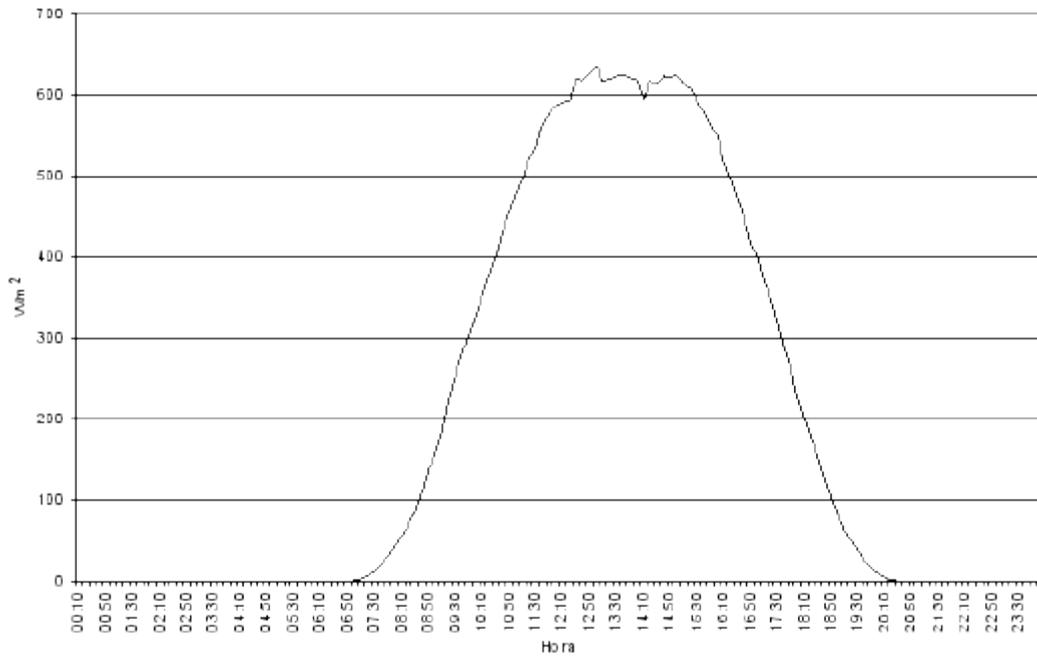


Fig. 14. Patrón anual de irradiancia solar global en Loma Alta.

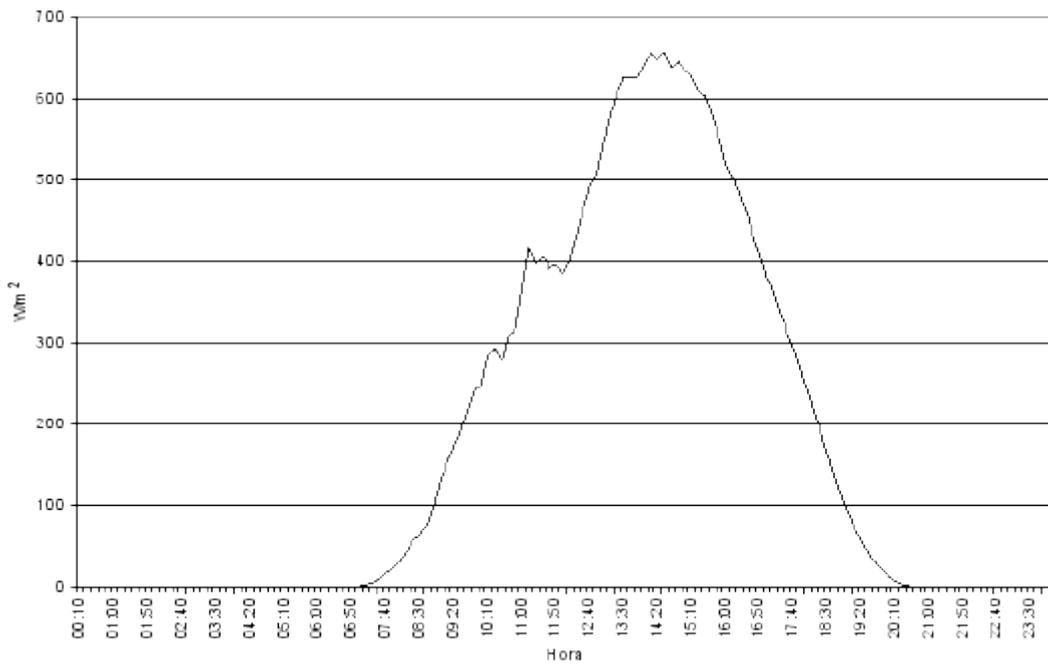


Fig. 15. Patrón anual de irradiancia solar global en Vallecillo.

Conclusiones

Las regiones que presentan las mejores condiciones de recurso eólico se localizan en las inmediaciones de Cerralvo, Loma Alta y Vallecillos, en las áreas elevadas. En estos lugares puede ser factible el aprovechamiento del potencial eólico para la generación eléctrica.

Se recomienda continuar los estudios en dichas regiones, instalando una red anemométrica que registre información real en los lugares donde se estimaron los valores más altos de la densidad de potencia mediante la modelación.

A partir de los resultados que se obtengan de dichas mediciones se realizaría la estimación de la generación eléctrica, a partir de curvas de potencia de aerogeneradores comerciales, a fin de estimar los factores de planta y costos de generación.

En cuanto al recurso solar, aunque en toda la franja fronteriza existen condiciones favorables para su explotación, son Anáhuac y Colombia los sitios donde se presenta con mayor potencialidad este recurso.

Bibliografía

BORJA, M. A.; R. GONZÁLEZ, F. MEJÍA, J. HUACUZ, R. SALDAÑA Y M. C. MEDRANO. *Estado del arte y tendencias de la tecnología eoloeléctrica. Programa Universitario de Energía. Coordinación de Vinculación*. México: UNAM, 1998.

MANWELL, J. F.; J. G. MCGOWAN Y A. L. ROGERS. *Wind Energy Explained. Theory, Design and Application*. Inglaterra: John Wiley & Sons, LTD., 2002.

MORTENSEN, N.; D. HEATFIELD, L. LANDBERG, O. RATHMANN, I. TROEN Y E. PETERSEN. *Getting Started with WAsP 7.0. Riso-I-1532(EN)*. Dinamarca: 2000.

SALDAÑA, R.; U. MIRANDA, R. GONZÁLEZ, M. BORJA Y M. F. MORALES. «Evaluación del potencial eólico y solar para la generación de energía eléctrica en los cinco polos de desarrollo identificados en el plan FIDENOR». Informe final. Instituto de Investigaciones Eléctricas. México: 2003.

Eco Solar es una publicación científica electrónica trimestral para los especialistas de las fuentes renovables de energía. Se dedica a la promoción de temas relacionados con la energética, las energías alternativas, la física ambiental, la arquitectura bioclimática, el impacto sobre el medio ambiente la educación ambiental, la termoconversión, la eficiencia energética, y las energías de origen hidráulico, fotovoltaico, eólico, solar, biomasa y ciencias relacionadas.

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

DIRECTOR:

Lic. Manuel Álvarez
González.

EDITOR:

Lic. Alejandro Montecinos
Larrosa.

CORRECCIÓN:

M Sc. Roberto Manzano
Díaz.

Ing. Jorge Santamarina

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

TRADUCCIÓN:

Lic. Lázaro O´Farril Lazo.

CONSEJO ASESOR:

Dr. Luis Hernández (Energía fotovoltaica)

Dr. Conrado Moreno Figueredo (Energía
eólica)

Lic. Bruno Henríquez Pérez (Física
ambiental)

Dr. Jorge Luis Paretas (Energía hidráulica)

Dr. Dania González Couret (Arquitectura
bioclimática)

Dr. Jorge Guardado (Biomasa)

Dr. Sergio Corp Linares (Energía solar
térmica)

Lic. Leonor Turtós Carbonell (Impacto
ambiental)

Lic. Alejandro Montecinos Larrosa (Energía
humana)

Lic. Ricardo Bérriz Valle (Educación
ambiental)



**SOCIEDAD CUBANA PARA LA PROMOCIÓN
DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EL RESPETO
AMBIENTAL**

Calle 20 no. 4113, esquina a 47, Miramar, Playa,
Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal: 11300.

Teléfono: (537) 205-9949.

Apartado postal: 6611, CP: 10600, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>